

Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil

Eduardo Viola ^I
Vinícius Mendes ^{II}

Resumo: Este artigo introduz o debate sobre transições sociotécnicas de baixo-carbono no agronegócio brasileiro, partindo da premissa de que parcela crescente do setor adota tecnologias digitais em seus modelos de negócios, configurando um novo paradigma produtivo, a agricultura 4.0. Utilizamos a teoria de Transições para a Sustentabilidade para examinar a relação entre agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. Para tanto, classificamos o agronegócio em três subsetores: agricultura familiar, agronegócio conservador, e agronegócio sustentável. O artigo demonstra desafios de ordem técnica, institucional e político-econômica para cada um desses subsetores avançar em direção a uma economia de baixo carbono, sendo o agronegócio sustentável o que tem tido melhor desempenho até o momento.

Palavras-chave: Agricultura 4.0; mudanças climáticas; Brasil; agronegócio sustentável; transições para a sustentabilidade

^I Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

^{II} Instituto de Relações Internacionais da Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200246r2vu2022L3AO>

Introdução

A agricultura 4.0 desperta crescente interesse político, econômico e ambiental. Técnicas como edição genômica de safras, monitoramento por satélites de variáveis meteorológicas, softwares de gestão agrícola, sensores de controle de pesticidas e irrigação, mapeamento digitalizado de índices de fertilidade, umidade, temperatura e condições físico-geo-químicas do solo caracterizam a agricultura 4.0 (CLAPP; RUDER, 2020; THIELE, 2020). Essas práticas têm se difundido há algum tempo nos países desenvolvidos, particularmente em potências agrícolas como Estados Unidos, dado o incremento na produtividade que proporcionam. Podemos verificar, ainda, movimento recente de incorporação dessa prática em potências agrícolas de renda média, como o Brasil.

Estudos recentes têm se debruçado sobre os aspectos ambientais da agroindústria 4.0., particularmente no que diz respeito às mudanças climáticas, uso de agroquímicos e eficiência no emprego de recursos naturais. Nicholson e Reynolds (2020) exploraram como a geo-engenharia pode ajudar a reverter as mudanças climáticas antropogênicas, se utilizada na produção de energia de baixo custo e zero carbono, armazenamento de eletricidade e remoção de CO₂ da atmosfera. Outros analisaram experimentos e redes informais de difusão tecnológica, e como afetam a governança da sustentabilidade (BERNARDS et al., 2020). Alguns vêm estudando a biologia sintética aplicada à evolução assistida, de-extinção e tecnologias de restauração da diversidade biológica (THIELE, 2020), enquanto outros buscam compreender a inter-relação entre organismos geneticamente modificados e organismos condutores de genes, e como podem contribuir com a conservação da natureza (REYNOLDS, 2020).

Apesar de alguns trabalhos sobre agricultura 4.0 já terem sido publicados no país (ALBIERO et al, 2020; MASSRUHÁ; LEITE, 2017), esse debate ainda passa ao largo da comunidade brasileira de Ciências Sociais. Particularmente, ainda não foram analisadas as possíveis relações entre a agricultura 4.0 e as mudanças climáticas no Brasil. Neste artigo, buscamos ajudar a preencher esta lacuna, partindo do marco teórico das Transições para a Sustentabilidade (GEELS, 2011), para examinar como a agricultura 4.0 vem avançando no país e as relações entre esse novo paradigma e as mudanças climáticas. As transições à sustentabilidade na agricultura ainda são pouco estudadas, se comparadas com estudos nos setores energético e mobilidade (LOORBACH et al. 2017). Assim, nosso artigo traz uma contribuição original, ao ilustrar, através do caso brasileiro, como as promessas das transições à sustentabilidade avançam apenas parcialmente com a agricultura 4.0, já que essas tecnologias são aplicadas por uma parcela ainda pequena do setor, além do que seus impactos climáticos ainda são largamente desconhecidos.

Para a construção do ensaio, optamos pelos seguintes caminhos metodológicos: a) análise de literatura nacional, internacional e documentos secundários; b) a bibliografia e documentos foram analisados qualitativamente, via leitura e sistematização, sem auxílio de softwares específicos. O artigo divide-se em quatro partes além desta introdução. A próxima define agricultura 4.0 no contexto do Antropoceno. A seguinte faz uma revisão teórico-conceitual sobre as Transições para a Sustentabilidade, sendo seguida pela análise do caso brasileiro em três seções: agricultura familiar, agronegócio conservador, e

agronegócio sustentável. A seção subsequente conclui o artigo.

Agricultura 4.0 no Antropoceno

O Antropoceno define, de partida, que o Sistema Terra não mais se encontra num estágio de transformações ecossistêmicas naturais (Holoceno), mas sim, num momento em que a agência humana tem corroído intensivamente os recursos naturais do planeta. Vivenciamos uma crise planetária, na qual as mudanças climáticas são apenas um dos eixos de tensão (embora extremamente grave). Pelo menos dois outros limites, o nível de perda da biodiversidade e as mudanças no ciclo do nitrogênio adicionam-se ao câmbio climático, conformando fronteiras já ultrapassadas, e nos aproximando dos limites Sistema Terra (ROCKSTRÖM et al. 2009; BIERMANN et al., 2012; VIOLA et al. 2013; STEFFEN et al. 2015).

O Antropoceno é, assim, uma época geológica caracterizada pela interferência antropogênica irreversível nas dinâmicas do planeta. Porém, esta nova época tem um significado ambivalente. Por um lado, os recursos naturais têm sido progressivamente dilapidados pelo modelo de desenvolvimento socioeconômico, particularmente acelerado no Pós-Guerra. Por outro lado, os progressos científicos e tecnológicos têm sido enormes, permitindo, em apenas dois séculos, uma evolução da humanidade mais acelerada que durante os onze mil anos do Holoceno. Desta forma, considera-se três marcos inaugurais para o Antropoceno: “a revolução industrial iniciada entre fins do século 18 e primeira metade do século XIX; a grande aceleração iniciada em 1945 (bomba atômica, crescimento populacional, uso progressivo de recursos naturais e energia, erosão da biodiversidade); início do século XXI, com o consenso científico sobre o caráter antropogênico do aquecimento global” (VIOLA; FRANCHINI; BARROS-PLATIAU, 2017, p.180).

Nesse contexto, a agricultura 4.0 foi definida a partir de um conceito anterior: Indústria 4.0. Desde a segunda década do século XXI, o termo Indústria 4.0 passou a ser utilizado para designar os mais recentes progressos tecno-científicos. Em 2011, o governo dos Estados Unidos lançou o *programa Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing*, uma tentativa de alavancar a economia estadunidense diante do fraco crescimento industrial da década anterior. Governos ao redor do globo mimetizaram a estratégia, incluindo a Alemanha, que lançou o plano paralelo ‘Industrie 4.0’ em 2014. O termo propagou-se rapidamente, inclusive no discurso do Fórum Econômico Mundial, sendo referenciado em programas mundo afora, a exemplo do *Made in China 2025*, o *Make in India*, e o japonês *Society 5.0*.

Com a Indústria 4.0, novas tecnologias entraram no mercado, a exemplo de: inteligência artificial, blockchain, 5G, impressão 3D, realidade aumentada, virtual e mista, big data e analytics, nanotecnologia, drones, para citar apenas alguns. Nesse processo de avanço tecnológico sem precedentes, ferramentas analíticas (virtualização, visão computacional, realidades mistas, algoritmos preditivos, etc.) e tecnoestruturas físicas (robótica, drones, manufatura 3D, veículos autônomos, etc.) têm reestruturado as capacidades tecnológicas dos sistemas produtivos (MENDES, 2020, 2021). Dentre esses desenvolvimentos está a agricultura 4.0, conforme definimos a seguir.

Definição de Agricultura 4.0

A agricultura atravessou pelo menos quatro estágios evolutivos através do tempo. A agricultura 1.0 caracterizou-se pela mecanização rústica, alta dependência do trabalho humano, tração animal e baixa intensidade tecnológica, predominante até meados do século XX. Na sequência veio a agricultura 2.0 (revolução verde), que incorporou progressivamente tecnologias como insumos sintéticos (fertilizantes, pesticidas, herbicidas), biotecnologia e tecnologia agrônômica adaptativas, voltadas à produção de *commodities* em larga escala, sendo predominante entre 1950-1990. Entretanto, foi só a partir dos 1990s, com a agricultura 3.0, que se iniciou o uso das tecnologias digitais, ou tecnologias da informação e comunicação (TICs), na agricultura, caracterizando-se por sistemas integrados de gerenciamento agropecuário e gestão de fazendas, monitoramento remoto de safras, e agricultura de precisão, com fortes avanços em biotecnologia, incorporando os estágios iniciais do desenvolvimento da agroinformática e da bioinformática.

Em que pesem esses desenvolvimentos lineares, os fatores tecnológicos sofreram inflexões disruptivas a partir da segunda década do século XXI. Isso se deu através da incorporação de tecnologias inteligentes (AI - inteligência artificial, IoT - internet das coisas, big data, etc.) ao contexto agrícola, através de agricultura autônoma de precisão, modelagem complexa de sistemas agrícolas e agroalimentares, e sensoriamento agrícola onipresente, conformando o que vem sendo chamado de agricultura 4.0 (ALBIERO et al., 2020; EMBRAPA, 2019; MASSRUHÁ; LEITE, 2017).

É importante ressaltar as diferenças entre agricultura 3.0 e 4.0, haja vista que ambas incorporam TICs, porém em níveis de sofisticação e complexidade consideravelmente distintos. O uso de sistemas digitais no agronegócio e na pesquisa agrícola existe desde pelo menos os anos 1990, inclusive no Brasil. Por exemplo, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) possui a Agência Embrapa de Informação Tecnológica (Ageitec) desde 1991, tendo sido responsável pelo desenvolvimento de diversos sistemas informatizados, tanto para pesquisa básica quanto para aplicações agroindustriais. A Ageitec faz parte do paradigma da agricultura 3.0, tendo desenvolvido aplicações como o Sistema Interativo de Suporte ao Licenciamento Ambiental (SISLA), o Sistema Interativo de Análise Geoespacial da Amazônia Legal (SiaGeo), e o Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg) (MASSRUHÁ; LEITE, 2017, p.32). Diferentemente desses desenvolvimentos lineares, a agricultura 4.0 refere-se a desenvolvimentos na mais recente fronteira tecnológica, sob o paradigma da Indústria 4.0. A título de exemplo, a agricultura 4.0 envolve tecnologias como: a) IoT (dispositivos físico-digitais aplicados à agricultura de precisão, monitoramento de gado, estufas inteligentes, controle de irrigação, verificação remota de condições climáticas, etc.); b) robôs e sistemas autônomos (cultivos biodiversos, impressão 3D de alimentos, fertilização aérea via drones); c) inteligência artificial (controle autônomo de sementes, sistemas inteligentes de classificação e colheita, diagnóstico automatizado de pragas e doenças, *machine learning* para modelagem preditiva de colheitas e preços, reconhecimento computacional de espécies), dentre outras (LIU et al., 2021).

Com a agricultura 4.0, a intensidade, robustez e complexidade tecnológicas dos

sistemas agroindustriais avançam consideravelmente. Isso resulta em: geração de volume de dados sem precedentes sobre a agricultura nacional, que poderão ser utilizados como insumos para políticas setoriais; redução progressiva no total da mão de obra empregada, com impactos consideráveis para o mercado de trabalho agrícola no país, além de crescente especialização necessária a essa mão de obra; necessidade de adequação regulatória em termos de políticas de privacidade de dados e segurança dos sistemas computacionais (públicos e privados) que gerenciam e armazenam dados sobre a agricultura brasileira. Nesse cenário, o potencial da agricultura 4.0 para uma transição de baixo-carbono tem sido debatido, podendo ser examinado através dos modelos de Transições para a Sustentabilidade.

Transições para a Sustentabilidade

Os modelos de *Sustainability Transitions* (STs) surgiram a partir da compreensão de que certas dinâmicas têm afetado profundamente os sistemas de suporte do planeta: aumento populacional, desenvolvimento tecnológico, desenvolvimento econômico. Verificou-se a necessidade urgente de se discutir objetivos, indicadores e métricas que guiassem o caminho para a sustentabilidade. Nos anos 1990, dois campos contribuíram para originar essa abordagem: os estudos de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e as pesquisas sobre meio ambiente e sustentabilidade. Entretanto, foi apenas em 2001 que o termo STs foi utilizado pela primeira vez, no *Dutch National Environmental Policy Plan*. Nesse plano, o governo holandês apresentou quatro transições absolutamente urgentes para um futuro sustentável: (i) energética; (ii) uso sustentável dos recursos naturais e da biodiversidade; (iii) agricultura; e (iv) mobilidade (LOORBACH et al. 2017). Definiu-se STs como “processos de transformação de longo prazo, multidimensionais e fundamentais, através dos quais os sistemas sociotécnicos atuais são gradativamente transformados em modelos sustentáveis de produção e consumo” (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012, p.1).

Geels (2011) desenvolveu uma abordagem bastante sofisticada e muito aceita sobre STs, conhecida como *Multi-Level Perspective* (MLP). Ao incorporar elementos da teoria neo-institucional e o debate agência-estrutura, o modelo de Geels (2011) baseia-se em três componentes - regime, nichos e panorama: (i) regime sociotécnico: ‘estrutura profunda’ que explica a estabilidade de um sistema sociotécnico existente; refere-se ao conjunto semi-coeso de regras que orientam e coordenam as atividades dos grupos sociais que reproduzem os vários elementos do sistema tecnológico em vigor; (ii) nichos: ‘espaços protegidos’, como laboratórios de P&D, projetos de pesquisa estruturados, ou nichos de mercado em que usuários têm demandas específicas e estão dispostos a apoiar inovações emergentes; atores de nichos (cientistas, empreendedores, startups, etc.) trabalham em inovações que se afastam do regime existente; (iii) panorama: ‘contexto amplo,’ que influencia a dinâmica de nichos e regimes; destaca-se não apenas o cenário técnico e material que sustenta a sociedade, mas também tendências demográficas, ideologias políticas, valores sociais, cultura, e padrões macroeconômicos; é o ‘cenário’ externo, que atores de nichos e regimes não podem influenciar no curto prazo.

Apesar da sofisticação, o modelo de Geels (2011) enfatiza as estruturas e, portanto, não explora em profundidade a dimensão da agência. Para endereçar isso, novas perspectivas foram propostas. Avelino e Wittmayer (2016, p.642), por exemplo, desenvolveram a *Multi-actor Perspective* (MaP), na qual situam o Estado, o mercado, a comunidade, e o terceiro setor em distintos níveis de interação nos eixos público-privado, formal-informal, com-sem fins lucrativos. Através do enfoque na agência, é possível refletir melhor sobre quem são os atores exercendo poder nas STs, como ocorrem as mutações nas relações de poder entre eles, quais recursos são mobilizados, e às custas de quem.

Outro modelo amplamente reconhecido de STs foi proposto por Kivimaa e Kern (2016), que enfatizaram os *policy mixes*, inspirados na teoria schumpeteriana de motores de inovação e destruição criativa. A destruição criativa foi conceituada como um “processo, no qual um empreendedor desafia empresas e tecnologias existentes de forma a torná-las ultrapassadas, forçando empresas do paradigma obsoleto a se retirarem do mercado” (KIVIMAA; KERN, 2016, p.207). Foram desenvolvidos indicadores em duas dimensões. Primeiro, a criação de tecnologias ‘verdes’ (políticas de CT&I, nichos de mercado, experimentação, alinhamento custo/preço, recursos a serem mobilizados, suporte de elites e grupos de poder). Em segundo lugar, a descontinuação (*phase-out*) dos regimes sociotécnicos intensivos em carbono (políticas de transição e controle, mudança nas normas e leis, redução de incentivos às tecnologias ‘sujas’, substituição de atores-chave).

Esses modelos conceituais são importantes na medida em que fornecem subsídios para investigarmos como as STs vêm ocorrendo (ou como poderão ocorrer) em diversos setores econômicos, a exemplo da agroindústria. Entretanto, limitações vêm sendo apontadas nos modelos de STs. Aykut, Morena e Foyer (2020) criticam a “cultura tecnocrático-gerencial” existente na governança das transições sociotécnicas de baixo-carbono. Outras limitações incluem: (i) as STs visam prioritariamente à transição energética, mas são escassos estudos em domínios sociotécnicos como água, agricultura, mobilidade, etc.; (ii) o debate ainda é focado nos países desenvolvidos, em particular da Europa e Japão, e distante das comunidades epistêmicas da África, América Latina e Ásia; (iii) a difusão de inovações de baixo carbono é interrompida se elas não se alinharem com mudanças mais amplas nos sistemas sociotécnicos e culturais; (iv) as STs nos diferentes domínios ambientais são interdependentes, mas comportam atores, regras e instituições cujos objetivos não necessariamente convergem; (v) a eliminação progressiva de tecnologias insustentáveis enfrenta múltiplas resistências, principalmente de grandes firmas em setores incumbentes (óleo e gás, automotivo, químico, elétrico, etc.); (vi) as STs não estão associadas apenas a políticas públicas que estimulem a inovação de baixo-carbono e ao declínio de tecnologias insustentáveis, mas comportam também uma série de desafios de governança de bens públicos comuns, com necessidade de coordenação política horizontal e vertical.

Na próxima seção articulamos como esses modelos de STs nos ajudam a interpretar as distintas trajetórias de transições de baixo-carbono em três segmentos da agricultura brasileira.

Agricultura 4.0 e Transições de Baixo Carbono no Brasil

Agricultura Familiar: baixa capacidade tecnológica e baixo engajamento climático

Há diversos tipos de pequenas propriedades rurais, de modo que agricultores de pequena escala dificilmente se enquadram como um grupo homogêneo. Entretanto, a Lei 11.326, de 24 de julho de 2006 e suas atualizações descrevem quatro critérios para que um empreendimento seja considerado familiar: a área deve ser menor que 4 módulos fiscais (variando de 5 a 110 ha), deve utilizar predominantemente mão-de-obra da própria família, percentual mínimo da renda familiar deve ser proveniente de atividades na propriedade rural, e o estabelecimento deve ser dirigido e gerenciado pela própria família.

Ainda assim, é difícil dimensionar a agricultura familiar no Brasil, o que torna a análise de seu potencial para a transição de baixo carbono uma tarefa complexa. Analistas da Embrapa estimaram, com base no Censo Agropecuário 2017, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que 76,8% dos 5,073 milhões de estabelecimentos rurais do Brasil pertencem à agricultura familiar. Em 2017, a produção familiar gerou receita de R\$ 106,5 bilhões (23% do total do setor), enquanto a agricultura não familiar gerou R\$ 355,9 bilhões (77% do total); houve redução de 10,2% no valor gerado pela agricultura familiar, em relação aos dados do censo anterior, de 2006 (NETO; SILVA; ARAÚJO, 2020, p.1). Este subsetor representa 24% da área agrícola e 74% da mão de obra no campo (12 milhões de pessoas) (MASSRUHÁ; LEITE, 2017, p.30).

Um segmento crescente, mas ainda minoritário, da agricultura familiar tem transitado da agricultura convencional para a agricultura orgânica (em alguns casos seguindo os princípios da Agroecologia ou da Permacultura), ganhando mercados crescentes em várias regiões metropolitanas do Brasil e, no caso das empresas familiares mais capitalizadas, mercados externos (particularmente europeu).

Partindo disso, dois eixos de análise são relevantes para compreendermos o impacto climático e o potencial de avanço de uma transição para a sustentabilidade na agricultura familiar no Brasil: primeiro, é necessário compreender se vem adotando práticas sustentáveis e o perfil de emissões do subsetor; em segundo lugar, vale examinar o arcabouço institucional que possibilita (ou dificulta) a adoção de tecnologias 4.0 de baixo-carbono por pequenos empreendimentos agrícolas.

O aumento global pela demanda de alimentos e a evolução tecnológica impulsionaram a agricultura a utilizar cultivos padronizados e monocultura. “Com a expansão da fronteira agrícola e com o manejo mecanizado do solo e o uso de agroquímicos e da irrigação, as atividades agrícolas, pecuárias e florestais passaram a ser realizadas de maneira intensificada, independente e dissociada” (BALBINO et al., 2011, p.1). Isso acarretou, ao longo do tempo, aumento na degradação de solos e pastagens, baixa reposição de nutrientes no solo, e baixos investimentos tecnológicos. Com mentalidade ainda bastante tradicional, quer seja pelo baixo nível de conhecimento e interesse na sustentabilidade, pela falta de acesso a tecnologias, ou pela preponderância do aspecto econômico de subsistência, parte da agricultura familiar brasileira mantém modelos de negócios pautados

no desmatamento e degradação dos solos.

Para enfrentar isso, algumas técnicas vêm sendo testadas e recomendadas, sobretudo pela Embrapa. Por exemplo, o sistema plantio direto (SPD), os sistemas agrossilvipastoris, e integração entre lavoura e pecuária (ILP). Porém, dificilmente essas técnicas são incorporadas à agricultura familiar (exceto no seu setor mais capitalizado), uma vez que são associados a investimentos extensivos em capital e conhecimento técnico que usualmente excede a escala de agricultura de pequeno porte.

Ao mesmo tempo que a agricultura impacta as mudanças climáticas, estas representarão riscos ao setor, sendo a agricultura familiar (menos dotada de recursos e capacidades tecnológicas) a mais ameaçada. O Brasil tem sistematicamente apresentado grande parte de suas emissões de GEE provenientes de LULUCF (uso da terra, mudança no uso da terra e florestas/silvicultura), particularmente pelo desmatamento na Amazônia. Em 2015, as emissões LULUCF representaram quase 46%, enquanto o setor de energia representou 24%, a agricultura 22%, a indústria pesada 5% e os resíduos 3% do total de emissões do Brasil (VIOLA; FRANCHINI, 2018). Além disso, as emissões do setor agrícola experimentaram um aumento de cerca de 100% entre 1990 e 2019, passando de 290 MtCO₂e para 598 Mt CO₂e (SEEG, 2019).

Embora o agronegócio sustentável (conforme caracterizaremos adiante) tenha melhorado sua eficiência, reduzindo a intensidade de GEE da produção, sua expansão foi sem dúvida um dos principais motores do desmatamento e conversão florestal nos biomas Amazônia e Cerrado (PEREIRA; VIOLA 2021). Há poucos dados desagregados sobre a participação da agricultura familiar nessa trajetória de emissões, mas Rivero et al. (2009) estimaram que, entre 2000 e 2006, o desmatamento na Amazônia foi fortemente correlacionado com a pecuária (causou ~ 54% do desmatamento no período), agricultura de corte e queima, ou associado à exploração madeireira, além de cultivos extensivos em terras, como a soja (ibid., p.42).

Sabe-se que mudanças no clima reduzirão a produtividade agrícola, incorrendo em gradual perda da capacidade de planejar a produção. Cerca de 30% da produtividade dos alimentos é explicada pela variação climática, e 70% são explicados por insumos, fertilizantes, genética, práticas agrícolas. Ou seja, quando há imprevisibilidade sobre o clima, a produtividade cai, independente do quanto se investiu em tecnologia. Secas prolongadas nas regiões Norte e Nordeste, grandes concentradoras da agricultura familiar, também poderão ter consequências drásticas sobre os meios de subsistência desses pequenos agricultores.

Para enfrentar esses desafios, a Embrapa realiza ações de P&D com foco em produtores rurais, agricultores familiares, cooperativas e outros segmentos para que adotem tecnologias de suporte à agricultura sustentável (MASSRUHÁ; LEITE, 2017, p.30-1). Algumas delas incluem sistema de informações agrometeorológicas (Agritempo), que fornece dados para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura. Certos bancos condicionam a concessão do crédito rural ao uso desse tipo de zoneamento, e a Embrapa trabalha com outros setores do governo para geração de mais zoneamentos agroclimáticos.

Por outro lado, pesquisas recentes demonstram que políticas públicas para o setor agrícola familiar no Brasil, apesar de avanços importantes, são problemáticas em certos aspectos, impactando negativamente o potencial do subsetor para uma transição à sustentabilidade. Programas de acesso a crédito, assistência técnica e formação, como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), tiveram grande concentração dos contratos no Sul e Sudeste, em comparação com o Norte e Nordeste. Mesmo políticas posteriores, como o Programa Nacional de Desenvolvimento Sustentável de Territórios Rurais (PRONAT) e o Programa Território da Cidadania (PTC), continuaram concentrando fortemente os créditos nos agricultores mais dotados em capital e recursos (SABOURIN, 2017; GRISA; SCHNEIDER, 2015).

Já foi demonstrando que variáveis socioeconômicas (propriedade da terra, opções de financiamento, acesso a informações e assistência técnica, nível de escolaridade, o percentual da renda advinda do manejo da propriedade, tamanho da família, idade do produtor) e agronômicas (disponibilidade de água e qualidade do solo) influenciam a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) na agricultura nacional, tornando-a melhor adaptada às mudanças climáticas (CARLOS; CUNHA; PIRES, 2019; SCHEMBERGUE et al., 2017). Porém, com acesso desigual a esses recursos, a vasta maioria dos agricultores familiares não recebe incentivos para a adoção de modelos de negócios sustentáveis e de baixo-carbono. Ou seja, apesar do potencial sustentável do subsetor (e.g., agricultura orgânica, potencial flexibilidade para adoção de SPD e ILP), o arcabouço institucional não tem sido propício para isso. Ressalta-se que, apesar do ambiente desfavorável, a agricultura familiar orgânica tem aumentado no entorno das grandes e médias cidades brasileiras.

Conforme identificado no marco teórico das STs, esses desafios de governança das transições de baixo-carbono na agricultura familiar brasileira ilustram a necessidade de maior coordenação interinstitucional (e.g., instituições de financiamento, cooperativas agrícolas, redes mercadológicas de distribuição e consumo, instituições políticas) e técnica (e.g., Embrapa, universidades) no apoio a essas iniciativas. Utilizando o modelo de *policy mixes* (KIVIMAA; KERN, 2016), verifica-se que a descontinuação de práticas agrícolas intensivas em carbono, no subsetor de agricultura familiar, carece, ainda, não apenas de normas e políticas que direcionem essas iniciativas, mas também do fomento à criação e difusão de tecnologias verdes com foco na agricultura de pequena escala, envolvendo políticas de CT&I, construção de nichos específicos de mercado, e rearranjos setoriais que levem em consideração escalas, capacidades e limites econômicos dos pequenos proprietários rurais.

Agronegócio Conservador: tecnologicamente moderno, mas baixo compromisso climático

O agronegócio de grande escala, alta intensidade tecnológica, mas práticas desalinhas com a sustentabilidade e a mitigação às mudanças climáticas, é o maior representativo da bancada ruralista no Congresso Nacional. Para compreender os fatores que justificam por que essa parcela da agroindústria mantém padrões insustentáveis de produção, é necessário analisar a constituição social e interesses dessa “burguesia agrária”

(BARROS, 2018), que historicamente influenciou a política brasileira. Quais os vetores de degradação ambiental ocasionados pela agroindústria? Vale também pontuar as crescentes demandas globais por maior sustentabilidade na cadeia agroindustrial, de forma a compreender por que esse modelo de “agronegócio sujo” representa um risco ao comércio internacional brasileiro, pois as cadeias agroindustriais e alimentícias globais começaram a, gradativamente, distanciar-se de fornecedores com práticas nocivas ao meio ambiente. O modelo MLP (GEELS, 2011) - que enfatiza o papel do regime socioinstitucional vigente, os nichos de mercado prioritários, e o panorama político-econômico do setor - será útil na condução de nossa análise.

Ao longo do século XIX e XX a burguesia agrária desempenhou papel de destaque na política nacional, já que o país se manteve (e se mantém) como potência agroexportadora. A burguesia agrária que compõe a bancada ruralista é representativa de setores como: grandes latifundiários, que mantêm largas extensões de terras improdutivas, e parcelas da agroindústria de finalidade exportadora, mas contrária ou imune às práticas sustentáveis.

Entre 1990-2020, dadas as pressões da globalização e financeirização econômica, o agro tornou-se setor estratégico para inserção do Brasil nas cadeias globais de valor, num processo de agro-industrialização marcado pelo estreitamento das relações Estado-agronegócio (BARROS, 2018; SØNDERGAARD, 2020). Essa parcela da agroindústria passou a ter prioridade nas políticas públicas setoriais, em detrimento dos pequenos agricultores e setores ligados a agroecologia. Em paralelo, houve forte acesso a crédito e apoio do capital financeiro a esses empreendimentos, de modo que as commodities agrícolas tornam-se importantes dinamos do mercado financeiro, incluindo mercados futuros agropecuários, e o comércio nacional e internacional de terras (GOLFARB, 2015).

Em termos de estrutura de mercado, verifica-se alto nível de concentração na agroindústria brasileira, em que “10% dos estabelecimentos controlam 80% do valor da produção” (BARROS, 2018, p.179). No agronegócio conservador, imperativos mercadológicos e financeiros sempre foram preponderantes em detrimento da proteção ambiental, apesar da crescente consciência dos mercados da União Europeia e do Japão, e por parcela da sociedade civil, acerca dos impactos deletérios que a agroindústria pode ter sobre o meio ambiente e clima. Conforme modelo de Geels (2011), esse regime socioinstitucional e as forças profundas que estruturam a relação Estado-agronegócio conservador no Brasil justificam por que esse subsector representa uma barreira para a Transição à Sustentabilidade na agricultura. Cabe apontar que esta parcela conservadora do agronegócio também utiliza tecnologias da agricultura 4.0, mas visando unicamente aumentos de produtividade, sem interesse em tornar-se sustentável ou reduzir emissões.

Os impactos ambientais do agronegócio são largamente conhecidos. O avanço da fronteira agrícola a partir da década de 1960, inicialmente nos estados do Sul, em seguida para o Cerrado, e recentemente de modo acelerado em direção à Amazônia, causou, dentre outros impactos: a) desapropriação ou compra de terras de agricultores familiares anteriormente ocupadas por culturas diversificadas; b) compactação e impermeabilização dos solos pelo uso intensivo de máquinas agrícolas; c) erosão; d) contaminação por agrotóxicos nas águas, alimentos e animais; e) impactos danosos da retirada da vegetação nativa

de áreas contínuas extensas; f) assoreamento de rios e reservatórios; g) aparecimento de novas pragas ou aumento das já conhecidas; h) risco à sobrevivência de espécies vegetais e animais com a perda de habitat natural devido a expansão agrícola; i) e alterações no clima local (DOMINGUES; BERGMANN; MANFREDINI, 2014, p.37).

Sauer (2018) observou que o agronegócio conservador, sobretudo em sua expansão para a região amazônica, tem causado novas formas de disputas por terras, novos meios de concentração de terras e conflitos com tribos indígenas, comunidades quilombolas e grupos de camponeses. Apesar de não termos a pretensão de diferenciar estatisticamente o quanto desses impactos vêm do agronegócio conservador e o quanto vem do agronegócio globalizado, a principal constatação que fazemos é que, ao passo que o segundo vem demonstrando intenções de reduzir tais impactos, o primeiro atribui importância mínima ao problema.

Em termos de impactos em emissões e consumo energético, com foco a soja (principal *commodity* agrícola brasileira), entre 2000-2014, o consumo energético aumentou a uma taxa de 7,1% ao ano. No mesmo período, as emissões totais de GEE do agronegócio aumentaram 90,75%, ao passo que na cadeia da soja, o aumento foi de 155% (MONTTOYA et al., 2019).

O agronegócio conservador utiliza tecnologias da agricultura 4.0 de modo progressivo no Brasil, com algumas nuances importantes, porém, sem compromisso ambiental. Essas tecnologias otimizam a produtividade, pois aumentam a performance tecnológica dos equipamentos, diminuem o tempo e recursos, podendo melhorar a previsibilidade das safras. Porém, ainda são acessíveis apenas à parcela mais capitalizada do setor, pois os investimentos são custosos. A automação e digitalização agrícola também enfrenta o desafio da péssima infraestrutura de conectividade no campo, desmotivando investimentos. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) vem fornecendo recursos e desenhando projetos para endereçar esse problema (MILANEZ et al., 2020).

O modelo MaP de Avelino e Wittmayer (2016), que enfatiza a importância de arranjos público-privados e da diversidade de atores no avanço das transições sociotécnicas de baixo carbono, aplica-se ao caso do agronegócio conservador, pois ajuda a entender os distintos movimentos políticos e econômicos em direção à adoção da agricultura 4.0. Ou seja, apesar dos impactos ambientais e climáticos do setor, o agronegócio conservador exerce sua influência nas instituições públicas e no mercado no sentido de adotar a agricultura 4.0 para aumentar a produtividade, porém, com pouco ou nenhum interesse na sustentabilidade e mudanças climáticas. Esse é exatamente o aspecto que o diferencia do agronegócio sustentável, conforme definimos a seguir.

Agronegócio Sustentável: tecnologicamente moderno e crescente compromisso climático

Em 2017, o agronegócio representava 23% do PIB, 40% das exportações, e cerca de 20% dos empregos no Brasil. Sendo o terceiro maior exportador agrícola do mundo, o país é líder global em carne bovina, aves, soja, açúcar, milho, suco de laranja e café. Em

market share, possui 18% do mercado internacional de carne bovina e 32% do de aves (VALE, 2018). Em 2011, os impostos gerados pelo setor agropecuário (20,68%) eram superiores à média dos demais setores econômicos (13,59%), além de ser o principal motor de entrada de moeda estrangeira no país (MOREIRA et al., 2016). As exportações agrícolas atingiram 180 países em 2016, incluindo 350 produtos, destacando-se a soja, com 29,9% do valor total (81% grãos, 16% alimentos, 3% óleo) (ABRAHAM et al., 2020).

Sendo força medular na economia nacional, o agronegócio responde por parcela expressiva das emissões de GEE. Desde 2010, as emissões brasileiras são aproximadamente 2 Gt CO₂e anuais, sendo que em 2019 os três principais vetores foram: mudança no uso da terra e florestas, i.e., desmatamento (968 Mt CO₂e), agropecuária (598 Mt CO₂e), e energia (413 Mt CO₂e) (SEEG, 2019). As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) propostas pelo Brasil no Acordo de Paris almejam reduzir o total de emissões para 1.3 Gt CO₂e até 2025, e para 1.2 Gt CO₂e até 2030, sendo consideradas de ambição média. Nos NDCs, a agropecuária e o uso da terra e florestas (AFOLU) representam o cerne da estratégia brasileira de descarbonização, ao passo que as iniciativas para os demais setores são vagas (KÖRBELE ET AL., 2020).

Destaca-se nos NDCs o Plano Nacional para Agricultura de Baixo-Carbono (Plano ABC), que vislumbra reduzir entre 133,9 e 162,1 Mt CO₂e as emissões do setor, através da intensificação da pecuária sustentável e sistemas produtivos de baixo-carbono. O plano prioriza: recuperação de pastagens degradadas, integração lavoura-pecuária-floresta e sistemas agroflorestais, plantio direto (*no-till agriculture*), fixação biológica de nitrogênio, e aumento da eficiência agrícola. O NDC brasileiro propõe ainda acabar com o desmatamento ilegal (BRASIL, 2018).

Essas medidas visam a uma redução nas emissões do setor, porém sem prejudicar a produtividade. Entre 2009 e 2050, estima-se que o consumo global de alimentos aumentará 70%, pressionando o setor agrícola por maior produção, e, por consequência, aumentando suas emissões (PIVOTO et al., 2018). Por esse motivo, a FAO (2019) recomenda inclusão de planos de mitigação e adaptação às mudanças climáticas nos NDCs relativos a sistemas agroalimentares. É nesse contexto que a Agricultura 4.0 vem sendo progressivamente aplicada em âmbito global e no Brasil.

Redes neurais artificiais vêm sendo usadas no cálculo das áreas ótimas de cultivo e previsão produtiva nas safras de soja brasileiras (ABRAHAM et al., 2020). Aplicativos como o *BovChain* controlam parâmetros socioambientais via *big data* e *cloud computing*. Através de smartphones, conectam-se fazendeiros, abatedouros, compradores e investidores, de modo a monitorar em tempo real rebanhos e transações comerciais, em mercado comum digital, que idealmente facilitaria a *accountability* e a gestão ambiental da cadeia agropecuária (BERGIER et al., 2020). No caso da agricultura de precisão, embora dominante em economias avançadas, como os EUA, vem crescendo nos mercados emergentes. No Brasil, é utilizada tanto no monitoramento por satélites e visualização computacional de lavouras e rebanhos, quanto na irrigação inteligente e otimização de agroquímicos. Por exemplo, a empresa *Agrosmart* é uma plataforma brasileira de agricultura digital que visa à redução dos impactos ambientais e aumento da performance das lavouras (COOK;

O'NEIL, 2020).

Outros ramos da agroindústria vêm adotando tecnologias 4.0. Com relação aos Organismos Geneticamente Modificados (OGMs), o Brasil possui uma regulação muito mais restritiva se comparado a potências avançadas como EUA e Japão. Por exemplo, a Lei N. 11105/2005 instituiu o Conselho Nacional de Biossegurança (CNBS) e restaurou a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CNTBio), impondo mecanismos de vigilância e proteção, e associando a liberação comercial de OGMs à conveniência socioeconômica e interesse nacional. Apesar disso, em 2013 o país já era segundo no mundo em área cultivada de OGMs. Se, em 2007, Monsanto, Bayer e Syngenta tiveram aprovadas as três primeiras cepas de milho transgênico no país, em 2016 a CTNBio já havia aprovado 18 espécies transgênicas. Há atualmente 66 cultivos transgênicos no Brasil, sendo os três principais o milho, o algodão e a soja. Por outro lado, entre 2010-2016, havia apenas uma empresa brasileira (EMBRAPA) entre as 10 maiores solicitantes de patentes de transgênicos no país (FIGUEIREDO et al., 2020). Ainda, comparando-se cultivos de soja comum, geneticamente modificada, e soja orgânica, esta última tem 77% de probabilidade de menores impactos climáticos, e 60% de chance de ser mais lucrativa ao agricultor (KAMALI et al., 2017). Portanto, se comparados aos produtos orgânicos, os OGMs não são necessariamente as tecnologias agrícolas mais sustentáveis, além de utilizarem glifosato, molécula pesticida com impactos deletérios à saúde humana, contribuindo para minar a integridade da microbiota intestinal, fundamental na regulação do sistema imunológico.

Os biocombustíveis também são vetores de descarbonização e estão diretamente relacionados à agricultura 4.0. A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017, visa a atender aos NDCs brasileiros no Acordo de Paris. O objetivo é expandir os biocombustíveis na matriz energética, reduzindo as emissões na produção, comercialização e uso. A lei não incentiva nenhuma geração específica de biocombustíveis, porém a partir da segunda geração eles são considerados menos ambientalmente agressivos, e podem ser produzidos através de: OGMs; transformação da biomassa em biogás ou biohidrogênio; biomassa através de técnicas de procriação molecular, tornando colheitas mais robustas mesmo quando provenientes de terras ácidas ou solos de baixa fertilidade; árvores modificadas, que armazenam significativamente mais gás carbônico, como vem sendo testado com variedades de eucalipto (SAHA et al., 2018). Os biocombustíveis das gerações mais avançadas reduzem significativamente as emissões de CO₂ e outros poluidores (NO_x, SO_x), sendo considerados ultra limpos. Em sistemas agrobiológicos de quarta-geração, mais avançados, as biomassas sinteticamente produzidas são consideradas máquinas de sequestro de carbono, pois retêm elevados níveis de CO₂, quando comparados a organismos naturais. São considerados métodos de geo-engenharia de baixo risco, ou carbono-negativos. Por incentivá-los, a RenovaBio é um instrumento importante no caminho para uma economia de baixo-carbono no Brasil (KLEIN et al., 2019).

A EMBRAPA (2018) recomenda algumas técnicas para incrementar a sustentabilidade agrícola. Por exemplo, o sistema plantio direto (SPD), positivo para o clima na medida

em que mitiga as emissões de N₂O, cujo impacto em termos de efeito estufa chega a ser 310 vezes maior que o do CO₂. Entretanto, o SPD é considerado negativo para a saúde humana e animal, já que utiliza glifosato, pesticida de alto potencial cancerígeno, além de destrutivo da microbiota intestinal. Deste ponto de vista, seria importante controlar rigorosamente a aplicação de glifosato no caminho para seu banimento, substituindo-o por substâncias mais saudáveis. Outras técnicas incluem os sistemas agrossilvipastoris e integração entre lavoura e pecuária (ILP), alternativas para a recuperação de pastagens degradadas, melhorando a produção e as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Nesse contexto, algumas experiências na Amazônia brasileira, via Programa Nacional de Recuperação de Pastagens (“Propasto”), têm se mostrado promissoras. Ressalta-se o potencial sustentável dessas técnicas, já que a integração de SPD com ILP incrementa o sequestro de carbono no solo.

A cobertura e uso da terra e florestas, quando associada ao seu potencial de sequestro e como sumidouros de carbono, é fundamental no combate às mudanças climáticas. Práticas recomendadas para preservação das terras e florestas envolvem redução no uso da terra, via intensificação na produtividade agrícola, e uso de técnicas agrícolas virtuosas ao ciclo do carbono (VIOLA, 2011). Controle de desmatamento, replantio de florestas, regeneração de pastos degradados, e não utilização de áreas de baixa produtividade agrícola são políticas nesse sentido (KÖRBELE et al., 2020). Essas medidas são recomendadas, por exemplo, na governança da floresta amazônica.

A Amazônia sul-americana possui dois “pontos de inflexão”: aumentos de temperatura iguais ou superiores a 4°C, e desmatamento superior a 30% da cobertura original. Caso algum deles seja transgredido, será dado início a um processo irreversível de savanização. Nos últimos 60 anos, a temperatura subiu em torno de 1,2°C, e 20% da cobertura original já foram desmatados. Entre 2004-2012 as taxas de desmatamento na bacia amazônica brasileira caíram 80%, porém, a partir de 2013 vem ocorrendo um aumento gradual (e acelerado desde 2019) dessa prática. Além do desmatamento, em 2015 e 2019 houve incêndios de grandes proporções na floresta (NASCIMENTO et al., 2019). No ano amazônico 2020 (que vai de agosto de 2019 até julho de 2020), o desmatamento foi de 11 mil Km², mais que o dobro de 2012. No ano amazônico de 2021, o desmatamento cresceu 22%, chegando a 13,200 Km².

Estratégias diversas têm sido propostas para preservar a floresta Amazônica, incluindo tecnologias 4.0. Exemplos: inspeções ambientais mais frequentes; mecanismos de gestão florestal que integrem políticas públicas e governança privada; intensificação do agronegócio em territórios menores e mais produtivos, de modo a controlar a fronteira agrícola. Outros sugerem um novo paradigma de desenvolvimento sustentável na Amazônia, incorporando plataformas e serviços pautados na agricultura 4.0. Destacam-se: inovações biomiméticas, emulando formações naturais, processos e ecossistemas amazônicos via desenhos sustentáveis; e biomateriais, como sensores biomecânicos inseridos em processos funcionais da floresta, através de inteligência artificial e robótica. Nesses arranjos, modelos de governança recomendados incluem laboratórios de P&D públicos e privados, empreendedorismo social, e investimentos em firmas geradoras de tecnologias

limpas. Porém, como a região produz apenas 2% dos doutores do país (330 de 16.745 titulados em 2014), há poucos recursos humanos capacitados em tecnologias digitais, biotecnologia e materiais avançados (NOBRE et al., 2016), problema que precisa ser urgentemente endereçado.

O Brasil possuía 182 start-ups atuando no setor de *smart farming* em 2017. Essas empresas são conhecidas como agtechs (ABSTARTUPS, 2017), e estavam localizadas 31% em São Paulo, 16% em Minas Gerais, 10% no Paraná e 10% em Santa Catarina, ou seja, apenas proporções mínimas localizam-se nos demais estados e regiões. As soluções ofertadas envolvem: softwares de gerenciamento de fazendas, drones e sensores IoT (44% destas empresas); plataformas de comercialização (22%); gestão de dados agrícolas e analytics (15%); plataformas para rastreabilidade e segurança alimentar (9%); ferramentas de comunicação (7%); e biomateriais, bioenergia e biotecnologia (3%). A maioria dessas empresas opera através do modelo SAAS (*software as a service*), através de licenças e assinaturas de uso por tempo determinado. O crescimento no número de agtechs acompanhou o *boom* no uso de tecnologias 4.0 no agronegócio brasileiro (PIVOTO et al., 2018). Apesar disso, poucas agtechs têm modelos de negócios centrados na sustentabilidade agrícola ou em serviços relacionados ao meio ambiente ou mudanças climáticas, sendo o foco ainda majoritariamente direcionado a incrementos na produtividade agroindustrial.

Conclusão

Os modelos teóricos de Transições para a Sustentabilidade são úteis para compreendermos as distintas trajetórias setoriais em direção a uma economia de baixo-carbono, porém, ainda são largamente negligenciados nas ciências sociais ambientais brasileiras. Neste artigo propomos o uso desse arcabouço teórico-conceitual para aprofundar o debate sobre a agricultura 4.0, expondo seu potencial e seus limites para a descarbonização do setor agrícola. Nosso ensaio secciona a agroindústria brasileira de forma tripartite: agricultura familiar, agronegócio conservador, e agronegócio sustentável. Através disso, pudemos analisar com maior nível de detalhamento as diferentes trajetórias e impasses para o avanço de uma transição de baixo-carbono nesses distintos subsetores. Com isso, buscamos preencher uma lacuna do conhecimento ainda pouco explorada, apesar de, paradoxalmente, o agronegócio ser um dos setores que mais contribuem com as emissões brasileiras de GEE, e de seu potencial considerável para o avanço da economia de baixo carbono.

Agradecimentos

Eduardo Viola agradece ao CNPq pelo financiamento com bolsa de produtividade em pesquisa nível 1B. Os autores também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (Código: 001) e aos pareceristas e editores anônimos da *Ambiente & Sociedade*.

Referências

- ABRAHAM, E. et al. Time Series Prediction with Artificial Neural Networks: An Analysis Using Brazilian Soybean Production. **Agriculture**, v.10, n.10, p.1-18, 2020.
- ABSTARTUPS. **Associação Brasileira de Start-Ups** - Mapeamento Agtech: investigação sobre o uso das tecnologias para o agronegócio no Brasil. 2017. Disponível em: <https://abstartups.com.br/mapeamento-agtech/> Acesso: 15 out. 2020.
- ALBIERO, D. et al. Agriculture 4.0: a terminological introduction. **Revista Ciência Agrônômica**, v.51, n. especial., pp.1-8, 2020.
- AVELINO, F.; WITTMAYER, J. M. Shifting power relations in sustainability transitions: a multi-actor perspective. **Journal of Environmental Policy & Planning**, v.18, n.5, pp.628-649, 2016.
- AYKUT, S. C., MORENA, E.; FOYER, J. 'Incantatory' governance: global climate politics' performative turn and its wider significance for global politics. **International Politics**, p.1-22, 2020.
- BALBINO, L. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, pp.1- 12, 2011.
- BARROS, I. O agronegócio e a atuação da burguesia agrária: considerações da luta de classes no campo. **Serviço Social & Sociedade**, 131, p. 175-195, 2018.
- BERGIER, I. ET AL. Cloud/edge computing for compliance in the Brazilian livestock supply chain. **Science of The Total Environment**, Oct. 2020.
- BERNARDS, N.; CAMPBELL-VERDUYN, M. Understanding technological change in global finance through infrastructures: Introduction to Review of International Political Economy Special Issue 'The Changing Technological Infrastructures of Global Finance'. **Review of International Political Economy**, v.26, n.5, p.773-789, 2019.
- BRASIL. **National Plan for Low Carbon Emission in Agriculture (ABC Plan)**. 2018. Disponível em: <http://redd.mma.gov.br/en/legal-and-public-policy-framework/national-plan-for-low-carbon-emission-in-agriculture-abc-plan> Acesso: 15 out. 2020.
- BIERMANN, F. et al. Navigating the Anthropocene: improving Earth system governance. **Science**, v. 335, n. 6074, pp. 1306-1307, 2012.
- CARLOS, S.; CUNHA, D.; PIRES, M. Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 57, p.455-471, 2019.
- CLAPP, J.; RUDER, S. L. Precision technologies for agriculture: Digital farming, gene-edited crops, and the politics of sustainability. **Global Environmental Politics**, v.20, n.3, pp.49-69, 2020.
- COOK, P.; O'NEILL, F. Artificial Intelligence in Agribusiness is Growing in Emerging Markets. **Banco Mundial**, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34304> Acesso: 20 set. 2020.

DOMINGUES, M.; BERMAN, C.; SIDNEIDE MANFREDINI, S. A produção de soja no Brasil e sua relação com o desmatamento na Amazônia. **Revista Presença Geográfica**, 1(1), p.32-47, 2014.

EMBRAPA. **Agricultura 4.0**: Embrapa Informática Agropecuária, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1354300/43332968/Apresenta%C3%A7%C3%A3o+Silvia+Masshur%C3%A1/587b3e58-b69c-2f16-44ec-57f8828ccf4c> Acesso em 5 nov. 2020.

EMBRAPA. **Plantio direto com rotação de culturas é eficaz na mitigação de gases de efeito estufa**, 2018. Disponível em: embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31857346/plantio-direto-com-rotacao-de-culturas-e-eficaz-na-mitigacao-de-gases-de-efeito-estufa Acesso em 24 mar. 2022.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Five practical actions towards low-carbon livestock**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca7089en/> Acesso: 20 set. 2020.

FIGUEIREDO, L. et al. An overview of intellectual property within agricultural biotechnology in Brazil. **Biotechnology Research and Innovation**, v.3, n.1, pp.69-79, 2019.

FRANCHINI, M.; VIOLA, E.; BARROS-PLATIAU, A. F. The Challenges of the Anthropocene: From International Environmental Politics to Global Governance. **Ambiente & Sociedade**, v.20, n.3, pp177-202, 2017.

GEELS, F. W. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v.1, n.1, pp.24-40, 2011.

GOLDFARB, Y. Expansão da soja e financeirização da agricultura como expressões recentes do regime alimentar corporativo no Brasil e na Argentina: o exemplo da Cargill. **Revista Nera**, (28), 32-67, 2015.

GRISA, C.; SCHNEIDER, C. Três gerações de políticas públicas para a agricultura familiar e formas de interação entre sociedade e estado no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 52(1), S125-S146, 2015.

KAMALI, F. et al. Evaluation of the environmental, economic, and social performance of soybean farming systems in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.142, pp.385-394, 2017.

KIVIMAA, P.; KERN, F. Creative destruction or mere niche support? Innovation policy mixes for sustainability transitions. **Research Policy**, v.45, n.1, pp.205-217, 2016.

KLEIN, B. C. ET AL. Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 115, 109365, 2019.

LIU, Y. et al. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v.17, n.6, p.4322-4334, 2020.

LOORBACH, D.; FRANTZESKAKI, N.; AVELINO, F. Sustainability transitions research:

transforming science and practice for societal change. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 42, 2017.

MASSRUHÁ, S.; LEITE, M. **Agro 4.0 - rumo à agricultura digital**. In Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: MAGNONI JÚNIOR, L.; et al.(Ors.). JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil. 2. ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017, pp.28-35. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1073150/agro-40---rumo-a-agricultura-digital> Acesso em 5 nov. 2021.

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. **Research Policy**, v.41, n.6, pp. 955-967, 2012.

MENDES, V. The Limitations of International Relations regarding MNCs and the Digital Economy: Evidence from Brazil. **Review of Political Economy**, v.33, n.1, p.67-87, 2021.

MENDES, V. Mudança global do clima e as cidades no Antropoceno: escalas, redes e tecnologias. **Cadernos MetrÓpole**, v.22, n.48, p. 343-364, 2020.

MILANEZ, A.; MANCUSO, R.; MAIA, G.; GUIMARÃES, D.; ALVES, C.; MADEIRA, R. **Conectividade rural: situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no Brasil**. BNDES Set., Rio de Janeiro, 26(52), p.7-43, 2020.

MONTOYA, M.; BERTUSSI, L.; LOPES, R.; FINAMORE, E. Uma nota sobre consumo energético, emissões, renda e emprego na cadeia de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, 73(1), 345-369, 2019.

MOREIRA, R. V.; KURESKI, R.; PEREIRA, C. Assessment of the economic structure of Brazilian agribusiness. **The Scientific World Journal**, 2016.

NASCIMENTO, N. et al. A Bayesian network approach to modelling land-use decisions under environmental policy incentives in the Brazilian Amazon. **Journal of Land Use Science**, p.1-15, 2020.

NETO; C.; SILVA, F.; ARAÚJO, L. **Qual é a participação da agricultura familiar na produção de alimentos no Brasil e em Rondônia?** EMBRAPA Notícias, 08 de set. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/55609579/artigo---qual-e-a-participacao-da-agricultura-familiar-na-producao-de-alimentos-no-brasil-e-em-rondonia> Acesso em 5 nov. 2021.

NICHOLSON, S.; REYNOLDS, J. Taking Technology Seriously: Introduction to the Special Issue on New Technologies and Global Environmental Politics. **Global Environmental Politics**, v.20, n.3, pp.1-8., 2020.

NOBRE, C. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.113, n.39, pp.10759-10768, 2016.

PEREIRA, J., VIOLA, E. **Climate Change and Biodiversity Governance in the Amazon**. At

the Edge of Ecological Collapse? New York, Routledge, 2021.

PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information Processing in Agriculture**, v.5, n.1, pp.21-32, 2018.

RIVERO, S. et al. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v.19, n.1, pp. 41-66.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, art. 32, 2009b.

SABOURIN, E. Origens, evolução e institucionalização da política de agricultura familiar no Brasil. In: BERGAMASCO, Sonia; DELGADO, Guilherme (Orgs.). **Agricultura familiar brasileira: desafios e perspectivas de futuro**. Brasília, DF: Sead, pp. 263-269, 2017.

SAHA, S. ET AL. 14 Bio-plastics and Biofuel: Is it the Way in Future Development for End Users? In: **Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications**, p. 365-376, 2018.

SEEG. **Total emissions by sector**. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções Gases Efeito Estufa. 2019. Disponível em: http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission Acesso: 25 out. 2020.

SCHEMBERGUE, A. et al. Sistemas Agroflorestais como Estratégia de Adaptação aos Desafios das Mudanças Climáticas no Brasil 2. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 55, p. 9-30, 2017.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, pp. 1-16, 2015.

SAUER, S. Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. **Land Use Policy**, 79, p.326-338, 2018.

SØNDERGAARD, N. Food regime transformations and structural rebounding: Brazilian state-agribusiness relations. **Territory, Politics, Governance**, p.1-20, 2020.

THIELE, L. P. Nature 4.0: Assisted Evolution, De-extinction, and Ecological Restoration Technologies. **Global Environmental Politics**, v.20, n.3, pp.9-27, 2020.

VALE, H. Local-global linkages in the food regime: global history and the internationalization of Brazilian agribusiness. **Revista Brasileira de Política Internacional**, 61(1), e010, 2018.

VIOLA, E. Perspectivas internacionais para a transição para uma economia verde de baixo carbono. *Política Ambiental*. **Economia Verde: Desafios e Oportunidades**, n.8, p.36-42, junho 2011.

VIOLA, E., FRANCHINI, M., RIBEIRO, T. **Sistema Internacional de Hegemonia Conservadora**. Governança Global e Democracia na Era da Crise Climática. São Paulo, AnnaBlume, 2013.

VIOLA, E.; FRANCHINI, M. **Brazil and climate change: beyond the Amazon**. New York: Routledge, 2018.

Eduardo Viola

✉ eduviola@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-2443>

Submetido em: 15/12/2020

Aceito em: 18/04/2022

2022;25:e02462

Vinícius Mendes

✉ mvinicius.imendes@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7512-8533>

Agricultura 4.0 y cambios climáticos en Brasil

Eduardo Viola
Vinicius Mendes

Resumen: Este artículo introduce el debate sobre las transiciones socio-técnicas de bajo carbono en la agroindustria brasileña, partiendo de la premisa de que una porción creciente del sector adopta tecnologías digitales en sus modelos de negocio, configurando un nuevo paradigma productivo, la agricultura 4.0. Usamos la teoría de Transiciones hacia la Sostenibilidad para examinar la relación entre la agricultura 4.0 y el cambio climático en Brasil. Clasificamos la agroindustria brasileña en tres subsectores: agricultura familiar tradicional, agroindustria conservadora y agroindustria sostenible. El artículo demuestra los desafíos técnicos, institucionales y político-económicos para cada uno de estos subsectores contribuir al avance hacia una economía de bajo carbono, y observamos que la agroindustria sostenible tiene el mejor desempeño hasta el momento.

Palabras-clave: Agricultura 4.0; cambios climáticos; Brasil; agroindustria sostenible; transiciones hacia la sostenibilidad

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artículo original

Agriculture 4.0 and climate change in Brazil

Eduardo Viola
Vinicius Mendes

Abstract: This article introduces the debate on low-carbon socio-technical transitions in Brazilian agribusiness, starting from the premise that a growing portion of the sector adopts digital technologies in its business models, configuring a new productive paradigm, agriculture 4.0. We use the Sustainability Transitions theory to examine the relationship between agriculture 4.0 and climate change in Brazil. We classify the Brazilian agribusiness into three subsectors: family farming, conservative agribusiness, and sustainable agribusiness. The article demonstrates technical, institutional and political-economic challenges for each of these subsectors support Brazil's pathway towards a low-carbon economy, observing that the sustainable agribusiness has performed the best so far.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Original Article

Keywords: Agriculture 4.0; climate change; Brazil; sustainable agribusiness; sustainability transitions