



**AGRICULTURA DE PRECISÃO E NOVAS TECNOLOGIAS: IMPACTOS E
DESAFIOS NO SETOR SUCROENERGÉTICO**

**PRECISION AGRICULTURE AND NEW TECHNOLOGIES: IMPACTS AND
CHALLENGES IN THE SUGARCANE SECTOR**

Silvia Angélica Domingues de Carvalho

Universidade Estadual de São Paulo

silvia.carvalho@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0001-7623-8590>

Ana Carolina Fidelis Fonseca

Universidade Estadual de São Paulo

ana.c.fonseca@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0002-7680-8706>

Resumo

O objetivo geral deste estudo foi discutir a absorção e a difusão da agricultura de precisão no setor sucroenergético e, para isso, foi dividido em dois objetivos específicos: 1. compreender os impactos econômicos, sociais e ambientais que esse conjunto de tecnologias têm causado; 2. identificar as dificuldades encontradas pelos produtores na sua implantação e uso. A metodologia foi pautada em revisão sistemática de literatura, pesquisa teórico-exploratória e dados secundários. Os resultados indicaram que a agricultura de precisão trouxe impactos econômicos positivos como a redução de custos, precisão na tomada de decisão e melhor gerenciamento da propriedade, uniformidade no manejo e menor utilização de insumos. Os potenciais impactos sociais foram identificados nos níveis de instrução educacional, devido ao baixo investimento em capacitação dos funcionários, a tecnologia acaba não sendo utilizada de forma adequada. Também foi constatada a diminuição dos impactos negativos ao meio ambiente envolvendo menor contaminação do ambiente, repercutindo na redução no aquecimento global, diminuição da compactação do solo e menor esgotamento fóssil. As dificuldades principais identificadas para a implantação da agricultura de precisão foram os

altos custos da tecnologia e dos serviços terceirizados, além da falta de mão-de-obra capacitada para operá-las.

Palavras-chave: Mudança tecnológica; Inovação; Cana-de-açúcar; Sustentabilidade.

Abstract

The general objective of this study was to discuss the absorption and the diffusion of precision agriculture in the sugarcane sector, for this purpose, it was divided in two specific objectives: 1. to understand the economic, social and environmental impacts that this set of technologies has caused; 2. to identify the difficulties encountered by producers in its implementation and use. The methodology was based on a systematic literature review, theoretical-exploratory research, and secondary data. The results indicated that precision agriculture brought positive economic impacts such as cost reduction, improved decision-making and property management, uniformity in agricultural practices, and less use of inputs. Potential social impacts were identified at levels of educational instruction, due to low investment in employee training, technology is not used appropriately. Reducing negative environmental impacts was also noted, involving less environmental contamination, resulting in decreased global warming, soil compaction, and less fossil depletion. The main difficulties identified for implementing precision agriculture were the high costs of technology and outsourced services and the lack of skilled labor to operate them.

Keywords: Technological change; Innovation; Sugar cane; Sustainability.

1. Introdução

A agricultura de precisão representa um conjunto de tecnologias que permite analisar de forma mais completa as informações do campo. De acordo com a *International Society of Precision Agriculture* (2023), a agricultura de precisão é definida como “uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais, combinando-os com outras informações para apoiar as decisões de gestão”. A agricultura de precisão, associada às tecnologias 4.0, tem levado a mudanças significativas na gestão de propriedades agropecuárias em todo o país.

O Brasil, na importante posição de principal fornecedor mundial de alimentos, precisa buscar, cada vez mais, por maior produtividade e redução de custos, combinando conservação

ambiental e uso racional dos recursos naturais, e também condições adequadas de trabalho e inclusão social. E neste processo de consolidação e fortalecimento da agricultura brasileira na indissociação dos três pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social, as tecnologias de agricultura de precisão são importantes aliadas.

O uso de tecnologia no campo permite avaliar a variabilidade espacial, ou seja, analisar o campo de forma heterogênea, buscando melhorar a eficiência no uso de recursos, qualidade, produtividade, rentabilidade e sustentabilidade (Carrer, Filho, Vinholis & Monzambani, 2022). As principais tecnologias utilizadas são: sistematização de plantio com auxílio de sistemas de posicionamento global (GPS) e imagens (satélite/drone); colheita com piloto automático; análise de solo georreferenciada; levantamento de pragas e doenças utilizando imagens (satélite/drone); aplicação de fertilizantes, corretivos e defensivos a taxa variada (Monzambani, Filho, Vinholis & Carrer, 2021). Estas tecnologias permitem observar dados sobre a variabilidade das culturas e do solo, permitindo uma tomada de decisão mais precisa, além de otimizar o uso de insumos, podendo levar a redução de custos e a diminuição dos riscos de contaminação ambiental. Neste sentido, constata-se que a agricultura de precisão vem sendo utilizada, e alcançando bons resultados, em diversas culturas, como a soja, milho, trigo, feijão e cana-de-açúcar (Santi, Sebem, Giotto & Amado, 2016; Carrer, et. al, 2022; Borges, Nascimento & Morgado, 2022).

No setor sucroenergético, especialmente as últimas duas décadas, nota-se que ocorreram mudanças tecnológicas impulsionadas por aspectos como o crescimento da demanda por biocombustíveis e a mecanização da colheita. Investimentos em novas tecnologias e cultivares tornaram-se essenciais para melhorar os indicadores de produção da cana-de-açúcar no campo e na indústria (Nyko, Valente, Milanez, Tanaka & Rodrigues, 2013; Carvalho & Furtado, 2016a, 2016b). Com isso, o Brasil se mantém como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma produção próxima a 610 milhões de toneladas em 2022/2023 (Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB], 2023).

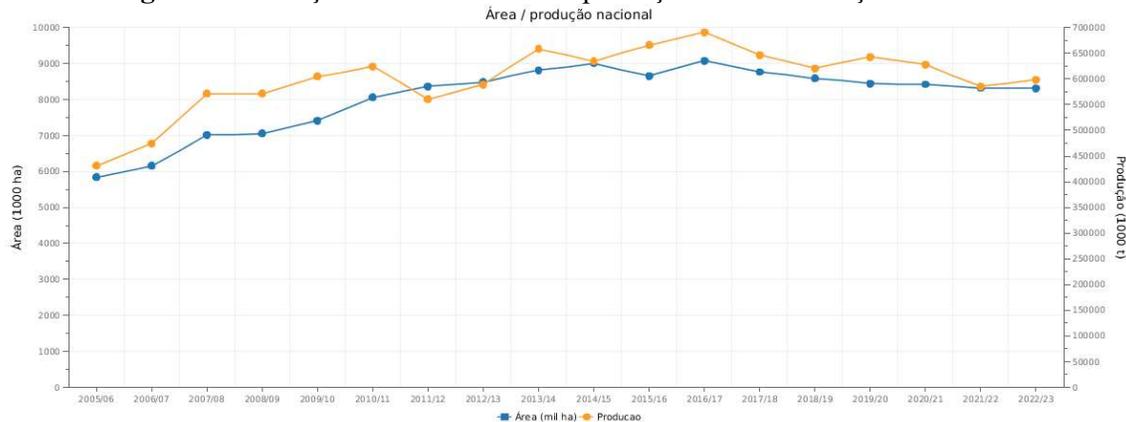
Neste contexto, busca-se discutir qual o papel das tecnologias de agricultura de precisão neste processo de mudança setorial. Assim, o objetivo geral deste estudo foi discutir a absorção e a difusão da agricultura de precisão no setor sucroenergético e, para isso, foi dividido em dois objetivos específicos: 1. compreender os impactos econômicos, sociais e ambientais que esse conjunto de tecnologias têm causado; 2. identificar as dificuldades encontradas pelos produtores na sua implantação e uso.

2. Referencial Teórico

O setor sucroenergético, historicamente, possui papel importante para o país. Além de ser um dos principais fornecedores de açúcar ao mercado mundial, é uma grande fonte de energia renovável, com a produção de etanol e a geração de energia elétrica, e também agrega inúmeros outros produtos com pegada sustentável produzidos a partir de subprodutos da sua cadeia produtiva.

Segundo dados da CONAB (2023), a estimativa de produção de cana-de-açúcar para a safra de 2022/2023 foi de cerca de 610 milhões de toneladas, ocupando uma área de 8,3 milhões hectares (Figura 1). A produtividade média estimada foi de 73,6 ton/ha, com a área colhida muito próxima da área plantada devido às condições climáticas mais favoráveis que na safra passada. Além disso, os dados do Observatório da Cana (2023) apontam que o setor sucroenergético gera cerca de 701 mil empregos formais para a economia brasileira.

Figura 1. Evolução histórica da área e produção de cana-de-açúcar nacional



Fonte: CONAB (2023)

Nas últimas décadas, o setor sucroenergético passou por uma série de mudanças que impactaram sua produção e rendimento. Segundo Nyko, et al (2013), houve uma queda de competitividade no setor quando a produtividade sofreu reduções consideráveis. A análise da série histórica demonstra que houve uma queda no rendimento agrícola, além da deterioração de importantes difusores de inovação tecnológica como os níveis de açúcar total recuperável (ATR) da cultura (figura 2).

Observa-se que os períodos de queda na produção corresponderam aos períodos com quedas nos níveis de ATR, especialmente 2010-2012, ocasionados por corte nos investimentos em tecnologia no setor e na renovação dos canaviais, também a introdução da mecanização da colheita, além de variações climáticas que afetaram a cultura. Houve queda da produtividade

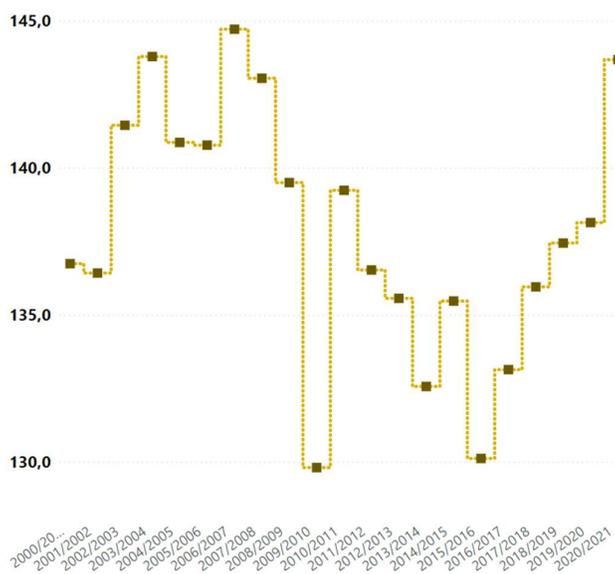
principalmente nos anos de 2011 e 2012, nos anos seguintes ela voltou a subir, mas continuou oscilando entre 70 e 80 toneladas por hectare até a safra 2021/2022.

A geografia do setor sucroenergético apresenta peculiaridades que se relacionam com características da própria cultura. Segundo Castillo (2015), a cana-de-açúcar é uma matéria prima que não pode ser armazenada. Esta característica faz com que haja limitação na produção do açúcar e etanol, impossibilidade de exportar matéria-prima não processada e necessidade de proximidade entre as áreas de cultivo e a unidade industrial.

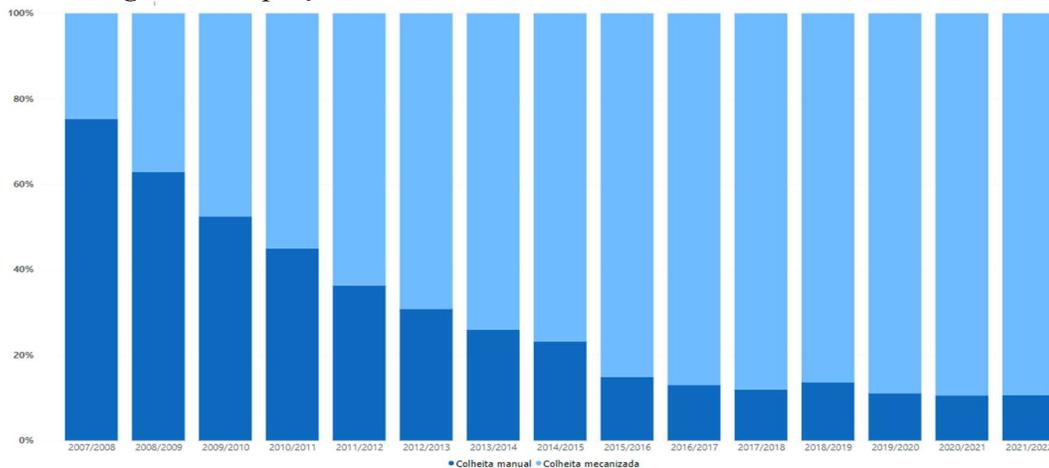
Estes atributos fazem com que o setor sucroenergético tenha uma certa rigidez locacional e um maior engessamento do uso territorial. Sampaio, Faria, Mesquita & Pereira (2020) aponta que os municípios onde estão localizadas as usinas ficam muito dependentes dessa atividade, sendo muito afetados por crises e problemas na produção.

A introdução da colheita mecanizada a partir do Protocolo Agroambiental de São Paulo, em 2007, trouxe também atenção e exigiu um tempo de adaptação dos produtores. A iniciativa previa diminuir a queimada da palha da cana-de-açúcar, uma das grandes responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO₂), além de causar problemas na saúde da população por questões respiratórias. A figura 3 demonstra a crescente participação da colheita mecanizada da área plantada com cana-de-açúcar no país.

Figura 2. Evolução Histórica dos Níveis de ATR, média nacional



Fonte: Observatório da Cana (2023).

Figura 3. Proporção da área com colheita manual e mecanizada, Brasil.

Fonte: Elaborado a partir de dados do Observatório da Cana (2023).

Segundo Castillo (2015), a área cultivada entre 2000 e 2012 se expandiu preferencialmente para os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. Estados como Pernambuco, Alagoas e Rio de Janeiro passaram a ter diminuição da área plantada. O estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil, portanto, com grande impacto no contexto do setor.

Segundo a CONAB (2023), a produção do Estado foi estimada em torno de 283,4 milhões de toneladas, em 4 milhões de hectares, com a produtividade de 71 toneladas colhidas por hectares na safra de 2022/2023. Em estudo realizado por Dotta & Périco (2022), das 335 usinas investigadas por todo o Brasil, 170 estão localizadas no Estado de São Paulo.

A evolução do plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo se caracterizou por um período de euforia durante os anos de 2000 e 2009, época em que ocorreu uma forte expansão na área cultivada da cana-de-açúcar, na produção de açúcar e etanol e no número de unidades processadoras. O estado de São Paulo foi o que mais aumentou a produção neste intervalo, 160%. No período seguinte, 2009 até 2014, houve uma expressiva retração no avanço da área cultivada e nas unidades processadoras, além da queda de produtividade.

Estima-se que 58 firmas processadoras de cana-de-açúcar encerraram as atividades, representando uma retração de 20%, ocasionada principalmente pela crise financeira internacional em 2008 e seu reflexo sobre o preço dos combustíveis (Piacente, Silva & Armas, 2022).

De acordo com Sampaio et al. (2020), as crises no setor sucroenergético são recorrentes, há muitas variáveis envolvidas: dependência de políticas estatais para a definição da tributação; baixa competitividade do etanol em relação à gasolina; imprevisto de intempéries climáticas,

além da sazonalidade da produção. Assim, o adequado gerenciamento da produção, agregando formas de manejo que permitam reduzir custos, agregar valor por meio da maior sustentabilidade ambiental e/ou melhorar as margens de lucro tornaram-se fundamentais. Desta forma, o investimento em tecnologias voltadas à agricultura de precisão, sistemas integrados de manejo, planejamento e controle da produção passaram a representar ferramentas importantes para o produtor.

3. Metodologia

A metodologia pautou-se em revisão sistemática de literatura que é um tipo de revisão planejada e metódica. Este tipo de pesquisa busca ser replicável de forma independente, conferindo maior rigor científico, além de encontrar, avaliar e resumir as evidências sobre o tópico de pesquisa, com um alto nível de validade (Velásquez, Cisternas & Rodríguez, 2020).

Primeiramente, foi realizado o planejamento da revisão considerando a necessidade da pesquisa e definição dos termos de busca. A pesquisa foi feita tanto em português como em inglês, com o objetivo de alcançar o maior número de resultados. Foram utilizadas as bases de periódicos: Scopus, Scielo, Google Acadêmico e referências cruzadas. Esta primeira etapa foi importante para compreender termos e palavras-chave que seriam de interesse e como eles seriam combinados, conforme apresentado no quadro 1.

Quadro 1. Termos de Busca Utilizados

Português	Inglês
“Agricultura de Precisão”	“Precision Agriculture”
“Cana-de-açúcar”	“Sugar Cane”
“Brasil”	“Brazil”
“Impacto”	“Impact”
“Impacto Social”	“Social Impact”
“Impacto Econômico”	“Economic Impact”
“Impacto Ambiental”	“Environmental Impact”
Combinação dos Termos de Busca	
(“Agricultura de Precisão” AND “Cana-de-açúcar” AND “Brasil”)	(“Precision Agriculture” AND “Sugar Cane” AND “Brazil”)
(“Agricultura de Precisão” OR “Cana-de-açúcar”) AND (“Brasil” OR “Impacto”)	(“Precision Agriculture” OR “Sugar Cane”) AND (“Brazil” OR “Impact”)
(“Agricultura de Precisão” OR “Cana-de-açúcar”) AND (“Brasil” OR “Impacto”) AND (“Impacto Social” OR “Impacto Econômico” OR “Impacto Ambiental”)	(“Precision Agriculture” OR “Sugar Cane”) AND (“Brazil” OR “Impact”) AND (“Social Impact” OR “Economic Impact” OR “Environmental Impact”)

Fonte: elaborado pelos autores.

Em seguida, definiu-se o objetivo da busca e as questões representativas das necessidades da revisão sistemática (Velásquez et al., 2020). As perguntas orientadoras da busca foram:

Q1: Quais são as principais tecnologias utilizadas na agricultura de precisão no setor sucroenergético brasileiro?

Q2: Quais os impactos econômicos, sociais e ambientais do uso da agricultura de precisão no setor sucroenergético brasileiro?

Q3: Quais as principais dificuldades do uso de agricultura de precisão encontradas pelos produtores no setor sucroenergético brasileiro?

O protocolo de busca definido foi analisar as publicações compreendidas no período 2015 a 2023. Assim, as publicações encontradas passaram por um processo de seleção por meio do título e das palavras-chave, tendo em vista a adequação para responder as perguntas orientadoras. As publicações que não se enquadraram foram consideradas não relevantes para o objetivo do trabalho e foram excluídas. Dos cerca de 825 artigos inicialmente identificados, após a aplicação do referido filtro, foram mantidos 105. . Em seguida, foi realizada uma análise mais detalhada destas 105 publicações a partir da leitura dos resumos. Os artigos foram classificados de acordo com os impactos das tecnologias no setor sucroenergético e as dificuldades e ou desafios para o uso da agricultura de precisão, descartando ainda aqueles que não continham tais elementos e, portanto, não se enquadravam ao objetivo deste trabalho. Assim, dos 105 textos analisados a partir do resumo, restaram 26 publicações para a leitura completa do artigo.

- O trabalho também contou com dados secundários utilizados para contextualização setorial e foram coletados a partir da Plataforma Observatório da Cana e das informações da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

4. Resultados

4.1 Tecnologias de agricultura de precisão aplicadas no setor sucroenergético

Monzambani et al. (2021) realizaram um estudo com 131 produtores de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, cujo objetivo foi efetuar um mapeamento sobre as principais tecnologias e problemas enfrentados no campo. Segundo o autor, foi possível identificar seis tipos de tecnologias de agricultura de precisão que têm sido aplicadas na cultura: sistematização de plantio com auxílio de sistemas de posicionamento global (GPS) e imagens (satélite/drone); colheita com piloto automático; análise de solo georreferenciada; levantamento de pragas e

doenças utilizando imagens (satélite/drone); aplicação de fertilizantes e corretivos a taxa variada; e aplicação de defensivos a taxa variada. A participação dos produtores que utilizavam agricultura de precisão foi de 40%.

A tecnologia mais utilizada, segundo Monzambani et al. (2021), foi a sistematização do plantio com auxílio de GPS. Foram 52 produtores que adotaram esta inovação (40%), sendo uma tecnologia importante para maximizar as linhas de plantio e minimizar o número de manobras, reduzindo o tempo e o custo das operações mecanizadas, incluindo a redução da compactação do solo. A segunda tecnologia mais utilizada foi a navegação por satélite e piloto automático, inovação adotada por 32 produtores (24%). Este instrumento também permite melhor preservação das linhas de plantio e menor compactação do solo, aumentando a produtividade e qualidade do canavial.

A terceira tecnologia mais empregada no campo foi a análise de solo georreferenciada e o levantamento de pragas e doenças utilizando imagens de satélite e drone. Houve uma redução considerável no número de produtores, apenas 11 ou 6% dos agricultores utilizavam estes métodos em sua propriedade. A aplicação de fertilizantes e corretivos adotada por apenas oito produtores (6% da amostra), enquanto três agricultores realizavam aplicação a taxa variada de defensivos. A principal causa da baixa adesão destas tecnologias foi a dificuldade de operação no campo e o alto custo inicial. Outro problema relatado pelos agricultores foi a falta de equipamentos no mercado, dificultando a realização destas atividades (Monzambani et al., 2021).

O principal facilitador da aplicação da agricultura de precisão no setor foram as usinas enquanto a maior dificuldade encontrada no campo para a difusão destas tecnologias foi a conectividade (25%), em seguida, foram apontadas a falta de assistência técnica do fornecedor do equipamento (19%), dificuldades de contratação de mão-de-obra especializada (15%) e incompatibilidade de comunicação entre os sistemas computacionais de diferentes equipamentos agrícolas para a aplicação de tecnologia. É necessário que as empresas invistam em suporte técnico qualificado para auxiliar o produtor com relação aos novos equipamentos.

Os principais motivos para a não adoção da agricultura de precisão foram o investimento inicial elevado e a escala de produção necessária para tornar a tecnologia viável, pois para pagar o investimento inicial é necessário o aumento da produção agrícola. Portanto, sendo uma barreira para os pequenos e médios agricultores (Monzambani et al., 2021).

Silva, Moraes e Molin (2011), em estudo com 87 usinas no estado de São Paulo, observou, já naquele momento, que mais de 50% adotavam alguma prática de agricultura de precisão e que a produção média de cana-de-açúcar em empresas adotantes destas tecnologias

era cerca de duas vezes maior do que as empresas que não adotavam. As principais tecnologias adotadas pelos produtores eram o uso de imagens de satélite (76%) e fotografia aérea (33%) e tecnologias com piloto automático (39%), enquanto a amostragem georreferenciada foi utilizada por 31% e aplicação de fertilizantes à taxa variada por 29%. Naquele momento, os sensores e mapeamento de condutividade elétrica do solo não eram adotados por nenhuma usina e a aplicação à taxa variada de defensivos era adotada por apenas 4% delas.

No estudo, o tempo médio em uso da agricultura de precisão era de apenas quatro anos, portanto a adoção era muito recente. Contudo, cerca de 96% das usinas afirmaram terem interesse em ampliar o uso de tais tecnologias e 65% das empresas adotantes da agricultura de precisão o faziam a partir de serviços terceirizados. Silva et al. (2011) afirmam ainda que as principais fontes de informação a respeito destas tecnologias eram os próprios fornecedores da tecnologia (92%); universidades e centros de pesquisa (83%); conferências, reuniões e publicações especializadas (77%) e empresas de consultoria independentes (75%). O estudo também apontou que as principais mudanças ocasionadas pela utilização da agricultura de precisão foram: alterações significativas no manejo (94%), maiores rendimentos (78%), menor impacto ambiental (73%) e redução dos custos de produção (71%). Os principais problemas observados foram os altos custos da tecnologia (96%) e a falta de mão-de-obra especializada (89%).

Os trabalhos mencionados (Monzambani et al., 2021; Silva et al., 2011) demonstraram, a partir de estudos no estado de São Paulo, o grande potencial de impacto das tecnologias de agricultura de precisão no setor sucroenergético. A seguir, serão discutidos os resultados destes e de outros estudos, organizados segundo a metodologia proposta neste estudo, cujos impactos identificados foram separados em econômicos, sociais e ambientais.

4.1.2 Evidências dos impactos econômicos da agricultura de precisão no setor sucroenergético

A partir da revisão de literatura, foram selecionados 18 artigos que apontaram impactos econômicos da agricultura de precisão no setor sucroenergético. Como impacto econômico entende-se os efeitos da adoção da agricultura de precisão sobre a margem de lucro do produtor, quer seja afetando seus custos ou a produtividade. O quadro 2 destaca os trabalhos que identificaram impactos econômicos relevantes para o setor.

A tecnologia mais utilizada foi o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), ou seja, veículo aéreo não tripulado (VANT). Segundo Amarasingam, Salgados, Powell, Gonzalez e Natarajan (2022), os UVAs podem ser utilizados para a construção de mapas com alta resolução (82% de resolução) e modelos tridimensionais de objetos naturais e artificiais. O VANT pode ser

equipado com diferentes sensores, permitindo a avaliação da saúde da cana com o uso de menos mão-de-obra. Desta forma, a tecnologia auxilia o agricultor na tomada de decisão de forma mais precisa, diminuindo despesas com o manejo. Moriya, Imai, Tommaselli e Miyoshi (2017) também reforça a ideia de que o VANT é uma tecnologia extremamente interessante para a cana-de-açúcar, uma vez que possui alta resolução espacial, com o potencial de evitar a cobertura de nuvens, além de ser uma forma mais precisa, confiável e econômica para se obter informações do campo. Outra tecnologia identificada foi o NIRS (espectroscopia no infravermelho próximo), uma ferramenta que possibilita obter dados da qualidade da matéria prima de forma rápida, acessível, com alta precisão e a preços mais econômicos (Corrêdo, Wei, Ferraz & Molin, 2021).

Quadro 2. Trabalhos que abordam os impactos econômicos da agricultura de precisão no setor sucroenergético

Autor(es)	Tecnologia/metodologia	Resultado	Impactos Econômicos
Wei, Mendes, Furtado, Takeshita, Pissolito, Molin e Tornisielo (2021)	Aplicação à taxa variada	Kd de sorção de tebutiuron e hexazinona variaram de 1,2 a 2,9 mL gl e 0,4e0,6 mL gl , respectivamente. Para a dessorção de tebutiuron e hexazinona, os valores de Kd variaram de 3,4 a 4,4 mL gl e 2,6e3,0 mL gl , respectivamente.	A tecnologia promoveu uma aplicação de herbicidas mais eficiente, diminuindo o custo de produção.
Souza, Amaral, Oliveira, Coutinho e Netto (2021)	SIMCA (modelagem independente suave por analogia de classe)	A câmera RGB apresentou um acerto de 97% sem nenhuma abordagem de inteligência artificial.	A tecnologia auxiliou no mapeamento de infestação de plantas daninhas, diminuindo o uso de herbicidas na lavoura.
Silva e Magalhães (2017)	Sistema de dosagem de injeção (N)	Sistema apresentou maior uniformidade de aplicação (entre 8 e 15%). O sistema convencional obteve variações maiores do que 20% na aplicação.	Houve maior disponibilidade de N com menor utilização de fertilizante.
Amarasinga, N. <i>et al.</i> (2022)	VANT	Sensores RBG apresentaram uma precisão de 82%.	Esta tecnologia apresenta baixo custo, leveza, facilidade de uso, auxiliando na tomada de decisão e diminuição dos custos.
Silva, Franco e Magalhães (2017)	Fertilização de nitrogênio líquido em um campo de cana-soca	Rendimento de fertilização de nitrogênio líquido foi de 98-96 Mg/ha-1.	Diminuição do uso de N e menor impacto ambiental.

Sanches, Magalhães, Kolln, Otto, Rodrigues, Cardoso, Chagas e Franco (2021)	Aplicação à taxa variada	O custo de produção do campo com aplicação à taxa variada foi de 18,93 US\$, enquanto o campo com aplicação convencional foi 19,48 US\$.	Houve diminuição no custo de produção.
Moriya, Imai, Tommaselli e Miyoshi. (2017)	Imagens hiperespectrais (UVS)	A acurácia foi de 92,5%	Imagens de baixo custo, auxiliando na tomada de decisão e melhorando o gerenciamento da propriedade.
Monzambani, Filho, Vinholis, Carrer (2021)	Entrevista	Eficiência técnica dos produtores de cana-de-açúcar foi 16,60% maior. O índice de GAP tecnológico foi 2,07% maior.	Aumenta a eficiência técnica e melhora a gestão da propriedade.

Fonte: elaboração própria.

As tecnologias para agricultura de precisão, quando associadas a programas de gestão como o ERP (planejamento de recursos empresariais) pode dar mais suporte à tomada de decisão de alto risco para os produtores, melhorando o gerenciamento da propriedade. O ERP é um pacote de softwares que busca automatizar o fluxo de materiais, informações e recursos financeiros de forma a realizar um diagnóstico de negócio (Junior, Tiago & Yanaze, 2019). Este método é eficiente para o controle de vendas, compras, logística e operacional, apresentando menor custo.

Wei et al (2021) buscou avaliar a correlação dos atributos físico-químicos do solo com os processos de sorção e dessorção de hexazinone e tebuthiuron, realizando mapas de aplicação considerando a variabilidade do campo. Segundo o autor, a sorção de hexazinone e tebuthiuron é maior em solos com alto nível de matéria orgânica, sendo importante avaliar as características da propriedade para aplicar de forma adequada os insumos. Ele concluiu que a aplicação de herbicidas à taxa variada permitiria a redução dos custos de produção, uma vez que a recomendação seria mais precisa, gerando maior rentabilidade ao agricultor.

Resultado similar também foi encontrado por Silva et al. (2017) que desenvolveu um sistema de dosagem de injeção e aplicação à taxa variada para o nitrogênio. Este elemento, na cultura da cana-de-açúcar, é um dos nutrientes que mais gera perdas na lavoura, sendo importante haver investimentos em tecnologias que melhorem a eficiência na recuperação do nitrogênio. O sistema apresentou maior uniformidade de aplicação (entre 8 e 15%), enquanto o plantio convencional obteve variações maiores do que 20%. As aplicações apresentaram

resultados satisfatórios, com maior precisão, reduzindo perdas e aumentando a absorção de nutrientes.

Sanches et al. (2021) também avaliou a aplicação à taxa variada de cal, nitrogênio, potássio e fósforo, além de construir mapas de produtividade. E constatou melhores ganhos econômicos, o custo de produção com aplicação à taxa variada foi de US\$18,93, enquanto com a aplicação convencional foi US\$19,48. Desta forma, os mapas de produtividade se mostraram uma ferramenta poderosa para o manejo da cana-de-açúcar, diminuindo os custos de produção e fornecendo informações úteis e precisas sobre as necessidades nutricionais da propriedade.

Souza et al. (2021) avaliaram o desempenho de dois métodos de modelagem, o SIMCA (modelagem independente suave por analogia de classe) e o algoritmo RF (floresta aleatória). O resultado foi que ambos os métodos permitiram o mapeamento de ervas daninhas com alto índice de precisão, 97%. Desta forma, os sensores dedicados a quatro bandas poderiam ser desenvolvidos para auxiliar no manejo de plantas daninhas e na aplicação de herbicidas pós-emergência em locais específicos, diminuindo o uso deste insumo na propriedade.

Monzambani et al. (2021) buscou avaliar os impactos do uso da agricultura de precisão de forma mais ampla, na eficiência técnica (TE) e no índice de GAP tecnológico (TRG) em propriedades de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Foram realizadas 131 entrevistas com produtores. De acordo com o autor, as propriedades com agricultura de precisão obtiveram 16,8% de aumento na produtividade e 16,6% de aumento na eficiência. Desta forma, os produtores que utilizavam a agricultura de precisão melhoraram a tomada de decisão e aumentaram a eficiência no uso de insumos. O índice de GAP tecnológico também foi maior (2,07%) nos adotantes da agricultura de precisão e a TEM, que é o desvio observado na produção máxima que poderia ser obtida com a melhora tecnológica do setor, foi 18,57% maior para os produtores com tecnologia, ou seja, demonstrou que a agricultura de precisão aumentou a eficiência técnica e melhorou a gestão da propriedade.

De forma geral, os resultados apontados nesses estudos indicaram que a agricultura de precisão trouxe impactos econômicos positivos para os produtores do setor sucroenergético, com redução de custos, maior precisão na tomada de decisão e melhor gerenciamento da propriedade, maior uniformidade no manejo e menor utilização de insumos.

4.1.3 Evidências do impacto social da agricultura de precisão no setor sucroenergético

No que diz respeito ao impacto social, buscou-se por efeitos relacionados ao nível educacional, inclusão, saúde e qualidade das condições de trabalho provocados pela adoção da agricultura de precisão.

As publicações que abordaram efeitos que podem ser associados a impactos sociais foram aquelas que se pautaram, principalmente, em entrevistas feitas com produtores. Foram encontrados apenas 5 artigos que abordaram tais impactos, apontando, inclusive, uma lacuna neste tipo de estudo quando relacionado à agricultura de precisão. Os artigos encontrados buscaram entender de que forma a utilização da agricultura de precisão impactou os trabalhadores empregados na cultura da cana-de-açúcar e estão apresentados no quadro 3.

Quadro 3. Trabalhos que abordam os impactos sociais da agricultura de precisão no setor sucroenergético

Autor(es)	Tecnologia/metodologia	Resultados	Impactos sociais
Pivoto, Waquil, Talamini, Spanhol, Corte e Moraes (2018)	Entrevista	A pesquisa demonstrou que 27% dos proprietários rurais são analfabetos, 9% não concluíram o ensino fundamental (não-analfabetos) e 53% possuem apenas o ensino fundamental	O investimento em educação é extremamente importante para haver a disseminação da agricultura de precisão.
Carrer et al. (2022)	Entrevistas	Agricultores com maior nível educacional e maior acesso à assistência técnica são mais propensos a adotar tecnologias de agricultura de precisão.	com o acesso à informação, a capacidade geracional aumentaria a adoção da agricultura de precisão.
Monzambani et al. (2021)	Entrevista	Metade (49,0%) dos produtores adotantes tem ensino superior completo, enquanto apenas 23% dos produtores do grupo dos não adotantes completaram essa fase.	Existe uma relação entre o nível de escolaridade do produtor e a adoção de práticas e tecnologias de agricultura de precisão.
Amarasingam et al. (2022)	VANT	Utilização de menos mão de obra no campo e dificuldade em projetar modelos mais acessíveis ao usuário.	Mão-de-obra com rendas maiores e necessidade de investimento em tecnologias com simplicidade de uso

Fonte: elaboração própria.

A maior dificuldade no meio rural, apontada pelos autores estudados, relacionou-se aos baixos níveis de instrução ou educacionais, sendo poucos os profissionais que apresentavam um nível educacional que permitia compreender e lidar com estas tecnologias com maior facilidade, o que pode representar um importante obstáculo ao uso e disseminação da

agricultura de precisão. Ao mesmo tempo, observou-se que os produtores investem pouco em capacitação para seus funcionários, e a tecnologia acaba não sendo utilizada de forma adequada, muitas vezes é subutilizada.

Uma característica marcante da agricultura brasileira, e também do setor sucroenergético brasileiro, é a heterogeneidade das propriedades agrícolas, algumas são muito tecnificadas enquanto outras possuem características de produção rudimentares. Pivoto et al. (2018) aponta que muitas fazendas apresentam baixo nível tecnológico. Em algumas regiões do Brasil existem fazendas de cana-de-açúcar com reduzida adoção de tecnologia, muitos produtores apresentam resistência a ferramentas capazes de aumentar a produtividade, empregam baixo nível tecnológico no manejo, dificultando a inserção de tecnologias de agricultura de precisão. Observou ainda que a falta de conhecimento era a principal dificuldade dos agricultores na hora de adquirir máquinas agrícolas, 27% dos proprietários rurais eram analfabetos, 9% não concluíram o ensino fundamental e 53% possuíam apenas o ensino fundamental. Segundo o estudo, o investimento em educação poderia aumentar a capacidade dos agricultores em processar informações, tomar decisões e utilizar a agricultura de precisão de forma adequada, principalmente na região Norte e Nordeste do país, que apresentavam os níveis tecnológicos mais baixos.

Outra dificuldade apontada pelo estudo de Pivoto et al. (2018) foi a baixa conectividade no campo, aspecto que dificulta o acesso à informação e prejudica a inclusão digital desses produtores. O acesso à internet é um grande desafio para a adoção de agricultura de precisão no Brasil e para viabilizar capacitações e treinamentos que poderiam ser feitos de forma remota, evitando grandes deslocamentos dos interessados. Tal obstáculo precisa ser superado e, paralelamente a ele, precisam ser implantadas políticas e investimentos em educação voltados a treinamentos e cursos que forneçam tal conhecimento aos produtores.

Carrer et al. (2022) em estudo com 131 produtores de cana-de-açúcar pautou-se em um coeficiente para medir a escolaridade. O estudo apontou que os agricultores com maior nível de escolaridade são mais propensos a adotar tecnologias de precisão, pois o uso de inovação no campo requer capacidades tecnológicas e gerenciais da propriedade. O estudo também constata que a probabilidade de adoção aumenta com o tamanho da propriedade. O tamanho médio das fazendas com agricultura de precisão foi de 1.125 hectares, enquanto a média das propriedades convencionais foi de 279 hectares. O maior tamanho da propriedade faz com que os agricultores tenham que processar mais informações e lidar com ambientes mais complexos, o que torna mais necessário o uso de tecnologia para gerenciar estas propriedades.

A falta de profissionais qualificados não se restringe a realidade dentro da propriedade, mas também aos prestadores de serviços. Carrer et al. (2022) também ressalta que a agricultura de precisão, ao avaliar dados do solo, mapas e imagens, demanda de forma fundamental a assistência técnica das tecnologias para desenvolver mais confiança no produtor. O acesso a profissionais competentes faz com que os agricultores sejam auxiliados de forma adequada no gerenciamento da propriedade e na análise de dados, aumentando a segurança no uso da agricultura de precisão e na tomada de decisão.

Na pesquisa realizada por Monzambani et al. (2021), no estado de São Paulo, os produtores entrevistados apresentaram a idade média de 52 anos e a experiência profissional de 27 anos, em média, no ramo de cana-de-açúcar. Os produtores que estão adotando a agricultura de precisão estão, em média, a menos tempo na atividade (23,2 anos) do que os produtores chamados de convencionais (30,4 anos), que não utilizam tais tecnologias. Quase metade (49%) dos produtores adotantes têm ensino superior completo, enquanto 23% do grupo dos não adotantes completaram o ensino superior, ou seja, o nível educacional também foi um aspecto importante para a adoção da agricultura de precisão.

Para Amarasingam et al. (2022), as características socioeconômicas dos agricultores, como a localização das fazendas, investimento financeiro inicial, compatibilidade de novas tecnologias, benefícios potenciais e complexidade da tecnologia, representam fatores de atenção. A aceitação de tecnologias que utilizam VANT é dificultada pelo alto valor inicial e falta de habilidade e conhecimento. O autor considera necessário projetar e criar modelos mais eficazes para orientação e utilização do usuário, aumentando assim a aceitação por determinada tecnologia.

Desta forma, foi possível observar que o nível educacional representa uma dificuldade importante na difusão da agricultura de precisão. O baixo nível de escolaridade dos produtores faz com que haja barreiras para a aceitação de novas tecnologias, muitos produtores não conseguem utilizar essas ferramentas de forma adequada, diminuindo a sua eficiência. Não foi possível averiguar se a chegada destas tecnologias ao campo sucroenergético está motivando a busca por conhecimento de produtores e colaboradores ou melhorados as condições de trabalho, aspecto que representa um excelente tema para pesquisas futuras.

4.1.4 Evidências do impacto ambiental da agricultura de precisão no setor sucroenergético

Cada vez mais, a sustentabilidade ambiental tem representado uma grande preocupação para a agricultura brasileira e, em função disso, buscou-se evidências sobre o impacto ambiental da agricultura de precisão para o setor sucroenergético. Impacto ambiental foi compreendido

como os efeitos benéficos ao meio ambiente provocados pela adoção destas tecnologias. Foram encontrados seis artigos relacionados ao assunto e estão reunidos no quadro 4.

Quadro 4. Trabalhos que abordam os impactos ambientais da agricultura de precisão no setor sucroenergético

Autor(es)	Tecnologia/metodologia	Resultados	Impactos Ambientais
Wei et al. (2021)	Aplicação à taxa variada	Kd variou com uma variação de 1,2 a 2,9 mL	Houve aplicação mais eficiente de herbicidas, diminuindo a contaminação ambiental.
Fonseca, Caldeira, Folho, Oliveira, Pereira e Vilela (2020)	Criação de um software para medir a sustentabilidade (Agro 4.0)	Apresentou 94% de precisão para avaliar o nível de sustentabilidade de uma propriedade rural.	Permite auxiliar na melhora da sustentabilidade e diminuir o impacto ambiental.
Casagrande e Torkomian (2021)	Entrevista	Houve bom desempenho das tecnologias em usinas de cana-de-açúcar, melhorando o gerenciamento e mapeamento das áreas agrícolas.	Ocorreu economia de recursos, como: água, energia, fertilizantes, pesticidas; além de melhorar a qualidade dos alimentos.
Sanches et al. (2021)	Aplicação por taxa variada e mapas de produtividade	A agricultura de precisão permitiu melhores índices com relação à mudança climática (3,4%) e esgotamento fóssil (4,2%).	Melhor eficiência na aplicação de fertilizantes diminui o impacto ambiental.
Carrer et al. (2022)	Entrevista	Os produtores que adotaram a agricultura de precisão apresentaram 18,57% a mais na eficiência técnica e na gestão na propriedade.	Houve a redução de manobras que diminui a compactação do solo, além da economia de insumos e menor contaminação ambiental.
Monzambi et al. (2021)	Entrevista	A navegação por piloto automático foi adotada por 34 produtores (24%).	A navegação por piloto automático permitiu a preservação das linhas de plantio, compactação do solo e maior produtividade no canavial.

Fonte: elaboração própria.

O trabalho realizado por Wei et al. (2021), ao estudar a aplicação por taxa variada de tebutiuron e hexazinona, avaliando as propriedades físico-químicas do solo, também apontou impactos ambientais positivos desta técnica. Segundo o autor, o conhecimento sobre as propriedades do solo é importante para aplicar os herbicidas de forma adequada, pois a variação no comportamento do herbicida em função das características do solo pode influenciar no risco

de contaminação ambiental, principalmente dos lençóis freáticos, pois o produto pode ser lixiviado para os corpos de água.

Como o herbicida é pouco sorvido há uma tendência a se concentrar na solução do solo, tornando mais suscetível à lixiviação com altas taxas de precipitação. O estudo constatou que em solo arenoso houve a absorção de 11% destes herbicidas, enquanto em solo argiloso houve a absorção de 71%. Desta forma, a recomendação de doses de tebutiuron e hexazinona em função dos atributos do solo é uma alternativa para o controle de plantas daninhas na cana-de-açúcar de forma ambientalmente segura e mais eficiente, evitando a contaminação ambiental.

Fonseca et al. (2020) se pautou em indicadores de sustentabilidade para analisar uma amostra de 100 propriedades. O sistema foi chamado de Agro 4.0 e permitiu comparar diferentes Índices de Sustentabilidade. O objetivo foi facilitar o trabalho de grupos e entidades que buscam melhorar a sustentabilidade de propriedades a partir do monitoramento anual de indicadores, como: contaminação e qualidade da água; uso de agrotóxicos; qualidade e contaminação do solo; tamanho e estado de conservação legal; área; gestão de resíduos; entre outros, buscando diminuir os impactos ambientais. Segundo o estudo, o Agro 4.0 permite maior entendimento sobre a propriedade, tais como gestão de negócios, acesso à assistência técnica e produtividade do solo, além disso, uma precisão de 94% sobre o nível de sustentabilidade nas propriedades, apresentando maior rapidez, facilidade na coleta de informações e diminuição da ocorrência de erros humanos. Desta forma, o sistema criado por Fonseca et al. (2020) pode auxiliar a tomada de decisão para que as propriedades consigam se tornar mais sustentáveis e gerar menos impactos negativos ao meio ambiente.

Para Casagrande e Torkomian (2021), a servitização se mostrou um modelo estratégico para disponibilizar soluções integradas de produtos e serviços aos produtores. Ele analisou como as estratégias de servitização podem contribuir para a disseminação de tecnologias da agricultura de precisão. De acordo com o estudo, há uma grande pressão na agricultura para diminuir a degradação ambiental sem a redução na produção. Assim, além de minimizar a perda de insumos, o uso de tecnologia no campo pode diminuir a pressão sobre o meio ambiente, sendo uma agricultura mais sustentável e ambientalmente responsável. A agricultura de precisão apresentou o potencial de reduzir o uso de recursos como água, energia, fertilizantes, pesticidas, entre outros.

Neste sentido, Sanches et al. (2021) reforça que a aplicação à taxa variada é uma tecnologia da agricultura de precisão extremamente interessante para o meio ambiente. Os resultados mostraram que a aplicação de fertilizantes de acordo com a variabilidade espacial do

solo produziu menores impactos ambientais. O autor calculou os dados de CO₂ equivalente, risco de acidificação terrestre, risco de eutrofização da água doce, risco de ocupação de terras agrícolas e esgotamento fóssil, constatando que o campo com agricultura de precisão obteve resultados melhores nas mudanças climáticas (3,4%) e no esgotamento fóssil (4,2%). Foi observado uma diminuição no uso de fertilizantes, reduzindo a contaminação ambiental, atenuação do consumo de diesel e impactos sobre o aquecimento global, com resultados positivos para a minimização das mudanças climáticas. Também constatou uma diminuição no uso de fertilizantes nitrogenados, acarretando a redução da contaminação de água e ar. Assim, a agricultura de precisão se mostrou eficiente tanto na melhora da tomada de decisão na propriedade e na maior eficiência no uso de recursos e quanto na melhoria da sustentabilidade ambiental da agricultura.

Monzambi et al. (2021) também identificaram que um impacto ambiental positivo da agricultura de precisão foi a diminuição da compactação do solo. A partir do uso de imagens GNSS foi possível reduzir as horas no uso de máquinas, combustível e mão-de-obra. A diminuição no número de manobras minimizou a compactação da lavoura, aumentando a produtividade, também prolongando a vida econômica da cultura.

Portanto, a agricultura de precisão se mostrou uma importante ferramenta para construir uma agricultura mais sustentável e com menos impactos negativos ao meio ambiente, indicando grande potencial para a diminuição da contaminação ambiental, redução no aquecimento global, diminuição da compactação do solo e menor esgotamento fóssil, além da diminuição da contaminação de corpos hídricos.

5. Conclusão

Este trabalho buscou compreender como a agricultura de precisão tem sido absorvida e difundida no setor sucroenergético e, de forma específica, quais os impactos econômico, social e ambiental que esse conjunto de tecnologias têm causado no setor. Além disso, identificou dificuldades e barreiras para implantar e/ou expandir o seu uso.

Dada a dimensão do setor sucroenergético no Brasil e as mudanças pelas quais passou nas últimas décadas, como o crescimento da demanda por etanol, a crise de 2008 e a mecanização da colheita, houve a necessidade de readequação tecnológica e a absorção e difusão das tecnologias de agricultura de precisão impactaram o setor.

Esta pesquisa apontou aspectos importantes sobre o panorama da utilização da agricultura de precisão, sendo os principais: a sistematização de plantio com auxílio de sistemas de posicionamento global (GPS) e imagens (satélite/drone); colheita com piloto automático;

análise de solo georreferenciada; levantamento de pragas e doenças utilizando imagens (satélite/drone); aplicação de fertilizantes e corretivos a taxa variada; e aplicação de defensivos a taxa variada. Também possibilitou entender as principais dificuldades encontradas pelos produtores para a adoção e implantação, destacando-se os altos custos da tecnologia e dos serviços terceirizados, além da falta de mão-de-obra especializada e capacitada.

Os resultados indicaram que a agricultura de precisão gerou impactos econômicos positivos como a redução de custos, maior precisão na tomada de decisão e melhor gerenciamento da propriedade, maior uniformidade no manejo e menor utilização de insumos. Os impactos sociais em potencial foram observados nos baixos níveis de instrução que limitam o uso e disseminação da agricultura de precisão, apontando a necessidade de maior investimento em capacitação para produtores e funcionários e de forma a permitir que a tecnologia seja utilizada da forma adequada e não subutilizada.

A agricultura de precisão também se mostrou como uma ferramenta importante para construir uma agricultura mais sustentável e com menos impactos negativos ao meio ambiente, como menor contaminação ambiental, redução no aquecimento global, diminuição da compactação do solo e menor esgotamento fóssil. Entre as principais dificuldades identificadas para a implantação da agricultura de precisão estão os altos custos da tecnologia e dos serviços terceirizados, além da falta de mão-de-obra capacitada para operá-las.

Para trabalhos futuros, notou-se uma lacuna em pesquisas sobre os impactos sociais destas tecnologias no campo, assim como estudos de viabilidade econômica e análises sobre o retorno dos investimentos em tecnologia de agricultura de precisão, os quais poderiam contribuir para reduzir a aversão ao risco e corroborar com a tomada de decisão principalmente dos produtores mais conservadores.

6. Referências

Amarasingam, N., Salgadoe, A. S. A., Powell, K., Gonzalez, L. F., & Natarajan, S. (2022). A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, p. 1-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712>

Borges, L. C., Nascimento, A. dos R., & Morgado, C. M. A. (2022). Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos. *Scientific Electronic Archives*, 15(3). <https://doi.org/10.36560/15320221520>

Carrer, M. J., Filho, H. M. S., Vinholis, M. M. B. & Monzambani, C. I. (2022). Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, 177 (1), p. 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121510>

Carvalho, S. A. D. & Furtado, A. T. (2016a) Geração e difusão de tecnologias para a produção de cana-de-açúcar no Brasil: uma análise dos programas de melhoramento genético. In Zullo Junior, J., Furtado, A. T. & Pfeifer, C. C. (Orgs.) *Planejamento da Produção de Cana-de-açúcar no contexto das mudanças climáticas globais* (Parte 4, cap. 12, pp. 231-252) – Campinas, SP, Editora da Unicamp.

Carvalho, S. A. D. & Furtado, A. T. (2016b) Desafios para a adaptação da produção de cana-de-açúcar no Brasil às mudanças climáticas globais. In Zullo Junior, J., Furtado, A. T. & Pfeifer, C. C. (Orgs.) *Planejamento da Produção de Cana-de-açúcar no contexto das mudanças climáticas globais* (Parte 4, cap. 14, pp. 275-296) – Campinas, SP, Editora da Unicamp.

Casagrande, D. J., & Torkomian, A. L. V. (2021) A servitização e sua influência no processo de difusão das tecnologias de agricultura de precisão na produção canavieira. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 38 (2), p. 1-14. doi:<http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2021.v38.26683>

Castillo, R. (2015). Dinâmicas recentes do setor sucroenergético no Brasil: competitividade regional e extensão para o bioma cerrado. *GEOgraphia*, 17 (35), p. 1-25. doi:<https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2015.v17i35.a13730>

Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB] (2023). Acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, v10 – Safra 2022/23, n. 4 - Quarto levantamento, p. 1-49. Recuperado de: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.

Corrêdo, L. P., Wei, M. C. F., Ferraz, M. N. & Molin, J. P. (2021). Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the Fields. *Biosystems Engineering*, 206, p. 150-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.001>

Dotta, G. M. C. & Périco, A. E. (2022). Efficiency and sustainability: an economic, social, environmental and sustainable analysis of sugar cane mills in São Paulo. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60 (3), p. 1-22. Recuperado de: <https://www.scielo.br/j/resr/a/8HwVd3KF6vnhv8mW5mKxzdc/>

Fonseca, E. P. R., Caldeira, E., Filho, H. S. R., Oliveira, L. B., Pereira, A. C. M. & Vilela, P. S. (2020). A data science-based information system for sustainable agroecosystem management. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 102 (2), p.1-28. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102068>

International Society of Precision Agricultura (2023). Precision Ag Definition. Recuperado de: <https://www.ispag.org/about/definition>

Junior, C. H., Tiago, O. & Yanaze, M. (2019). The adoption stages (Evaluation, Adoption, and Routinisation) of ERP systems with business analytics functionality in the context of farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, p. 334-348. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.028>

Mantovani, E. C., de Miranda, R. A., Landau, E. C., & dos Passos, A. M. A. (2020). Agricultura de precisão no contexto do sistema de produção: lucratividade e sustentabilidade. – Sete Lagoas

: Embrapa Milho e Sorgo. Recuperado de:
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124732>>

Moriya, E. A. S., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G. & Miyoshi, G. T. (2017). Mapping Mosaic Virus in Sugarcane Based on Hyperspectral Images; *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10 (2), p. 740-748. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2635482>

Monzambani, C. I., Filho, H. M. S., Vinholis, M. M. B. & Carrer, M. J. (2021) Adoção da agricultura de precisão por produtores de cana-de-açúcar fornecedores para indústria no estado de São Paulo. *Embrapa*, 2 (1), p. 1-28. Recuperado de: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1132825/1/BOLETIM-50.pdf>>

Nyko, D., Valente, M. S., Milanez, A. Y., Tanaka, A. K. R. & Rodrigues, A. V. P. (2013) A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? *BNDÉS Setorial*, 37, p. 399-442. Recuperado de: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1503>

Piacente, J. F., Silva, V. C. & Armas, O. F. (2022). Evolução da produção agrícola canavieira na região noroeste do estado de São Paulo: fases de expansão e crise no setor e seus impactos no uso da terra entre 2000 e 2013. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60, p. 1-16.

Pivoto, D., Waquil, P. D., Talamini, E., Spanhol, F., Corte, V. F. D. & Mores, G. V. (2018) Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. *Information Processing in Agriculture*, 60, p. 21-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.002>

Sampaio, M. A. P., Faria, H. S., Mesquita, F. & Pereira, M. F. V. (2020) Crisis of the sugar-energy sector in Brazil and the territorial vulnerability of sugarcane municipalities. *Eure*, 48, p. 1-26.

Sanches, G. M., Magalhães, P. S. G., Kolln, O. T., Otto, R., Rodrigues, F. Cardoso, T. F., Chagas, M. F. & Franco, H. C. J. (2021) Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. *Geoderma Regional*, 24, p. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00360>

Santi, A. L., Giotto, E., Sebem, E., & Amado, T. J. C. (2016). Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul. CESPOL, Santa Maria.

Silva, C. B., Moraes, M. A. F. D. & Molin, J. P. (2011) Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. *Precision Agriculture*, 12, p. 67-81.

Silva, M. L. Franco, H. C. J. & Magalhães, P. S. G. (2017) Liquid fertilizer application to ratoon cane using a soil punching method. *Soil and Tillage Research*, v. 165, p. 279-285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.020>

Silva, M. J. & Magalhães, P. S. G. (2017) A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management. *Biosystems Engineering*, 163 (2), p. 150-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.005>

Souza, M. F., Amaral, L. R., Oliveira, S. R. M., Coutinho, M. A. N. & Netto, C. F. (2021) Spectral differentiation of sugarcane from weeds. *Biosystems Engineering*, 160 (3), p. 41-46. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.023>

Velásquez, I. C., Cisternas, I. A. & Rodríguez, A. (2020) Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176 (1), p. 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>

Wei, M. C. F., Mendes, K. F., Furtado, I. F., Takeshita, V., Pissolito, J. P., Molin, J. P. & Tornisielo, V. L. (2021) Spatial distribution of sorption and desorption process of ¹⁴C-radiolabelled hexazinone and tebuthiuron in tropical soil. *Elsevier*, 264, p. 1-11. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128494>