

CLASSIFICAÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DO MONITORAMENTO

CLASSIFICATION OF PRECISION AGRICULTURE BASED ON MONITORING CHARACTERISTICS

Luiz Carlos Pittol Martini – luiz.martini@ufsc.br
 Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Florianópolis – Santa Catarina – Brasil

Monique Souza Teixeira – monique.teixeira@uniasselvi.com.br
 Centro Universitário Leonardo da Vinci (Uniasselvi) – Indaial – Santa Catarina – Brasil

DOI: 10.31510/infa.v21i1.1846
 Data de submissão: 12/03/2024
 Data do aceite: 10/03/2024
 Data da publicação: 20/06/2024

RESUMO

A agricultura de precisão (AP) tem contribuído significativamente para o esforço contínuo de desenvolvimento de métodos para monitoramento dos cultivos e manejo eficiente de insumos agrícolas. Dado o avanço nas últimas décadas, o propósito deste trabalho foi obter um critério para agrupar as diversas modalidades de AP em um sistema classificatório capaz de mostrar a evolução dessa tecnologia. Como resultado, verificou-se que o critério baseado nas características de monitoramento dos cultivos é adequado para definição das classes pois permite agrupar tecnologias similares. A partir do critério classificatório escolhido, foram identificados quatro tipos básicos de AP: 1^a grau, fundamentado no monitoramento de colheita; 2^a grau, que utiliza monitoramento por sensoriamento remoto durante o ciclo de cultivo; 3^a grau, embasado no uso de sensores proximais instalados nos cultivos; e 4^a grau, no qual as práticas de manejo são apoiadas por monitoramento em tempo real da área de cultivo. A definição das quatro classes permite organizar de maneira simples e acessível as tecnologias precursoras e atuais da AP. O sistema classificatório proposto possui flexibilidade para inclusão de classes ou níveis categóricos adicionais à medida que novas tecnologias sejam assimiladas nos sistemas de produção agrícola.

Palavras-chave: Veículo aéreo não tripulado. Manejo do solo. Tecnologia agrícola. Agricultura 4.0.

ABSTRACT

Precision agriculture (PA) has made significant contributions to the ongoing effort of generating data to monitor crops and developing novel approaches for efficiently managing agricultural inputs. Given the progress made in recent decades, the objective of this study was to establish a criterion for categorizing the different types of PA into a classification system capable of evolution highlighting this technology. As a result, the criterion based on crop monitoring characteristics was considered appropriate for delineating the classes, as it facilitates the grouping of similar technologies. Utilizing the selected classification criteria, four fundamental

types of PA were delineated: Level 1, centered on harvest monitoring; Level 2, employing remote sensing monitoring throughout the crop cycle; Level 3, relying on proximal sensors installed in the crop; and Level 4, wherein management practices are assisted by real-time monitoring of the crop area. The delineation of the four classes enables the organization of precursor and contemporary PA technologies in a straightforward and accessible manner. Moreover, the suggested classification system exhibits flexibility to accommodate supplementary classes or categorical levels as novel technologies are assimilated into agricultural production systems.

Keywords: Unmanned aerial vehicle. Soil management. Agricultural technology. Agriculture 4.0.

1 INTRODUÇÃO

Em comparação a outras atividades econômicas, a adoção de recursos computacionais, *softwares* e redes nas práticas de manejo das terras cultivadas foi iniciada tarde. Somente a partir da década de 1990 começaram a surgir abordagens que incorporavam algumas das tecnologias digitais precursoras do que hoje é reconhecida como Agricultura de Precisão (AP). Naquela época, no entanto, frequentemente utilizava-se o termo "agricultura de precisão" de forma intercambiável com outras expressões, tais como manejo localizado de cultivos, agricultura espacialmente manejada, agricultura por satélite e agricultura auxiliada por computador (ROBERT et al., 1994).

Todas essas designações buscavam aplicar técnicas de manejo que consideravam a heterogeneidade do terreno ao longo de toda área cultivada, como fertilidade do solo, topografia, necessidades hídricas e densidade populacional de plantas. Para implementar efetivamente essas técnicas, tornava-se primordial amostrar e processar digitalmente dados de pequenas unidades de área distribuídas regularmente em todo o campo cultivado (FRANZEN e MULLA, 2015). Inicialmente, a meta principal era monitorar e mapear a produtividade por meio de dispositivos acoplados às colhedoras, tarefa facilitada mais tarde pelo uso civil de sistemas de navegação global por satélite (GNSS) a partir dos anos 1990. O crescimento na oferta de imagens orbitais com melhor resolução espacial e o uso de GNSS levaram naturalmente à difusão do termo “agricultura por satélite”. Simultaneamente, devido à necessidade de processar grandes volumes de dados, alguns pesquisadores adotaram a denominação “agricultura auxiliada por computador”.

Com o passar do tempo, compreendeu-se que todas as nomenclaturas poderiam ser agrupadas em uma definição mais geral, como a formulada pela The International Society of Precision Agriculture:

Agricultura de Precisão é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, individuais e espaciais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária (ISPA, 2023, tradução nossa).

Pode-se observar que a definição formal de Agricultura de Precisão (AP) destaca seus objetivos sem especificar os meios para alcançá-los. Embora, no passado, os sistemas computacionais fossem a principal novidade tecnológica, desde sua origem a AP tem incorporado inovações que permitem a obtenção e o processamento de dados geoespaciais relevantes para o manejo localizado de cultivos. Um exemplo recente é a integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) na prática agrícola de AP (GONÇALVES & CAVICHIOLI, 2021). Com a disponibilidade para fins civis, os VANTs passaram a ser empregados para levantamentos aerofotográficos e, mais recentemente, para a aplicação de agrotóxicos em taxas variáveis. Além disso, os VANTs são capazes de coletar dados em tempo real e fornecer informações precisas sobre a saúde das plantas, permitindo aos produtores tomarem decisões com base em dados concretos (JUNIOR & NUÑEZ, 2024).

Embora o escopo da AP permaneça aberto a novas abordagens para a obtenção e processamento de dados espacialmente distribuídos, surgiram recentemente variantes terminológicas que se apresentam como alternativas ou até mesmo uma evolução da AP. Tais variantes incluem termos como "agricultura de decisão", "agricultura digital", "agricultura inteligente" e "agricultura 4.0" (KLERKX et al., 2019; JUNIOR & NUÑEZ, 2024). Respectivamente, essas variantes têm como objetivo priorizar tomadas de decisão mais efetivas por meio de *softwares* projetados especificamente para essa finalidade (ROSE et al., 2016), usar dispositivos para coletar e analisar dados agrícolas obtidos diretamente no formato digital (SHEPHERD et al., 2020), integrar as tecnologias chamadas “inteligentes” com a internet das coisas (BLOK e GREMMEN, 2018) e, finalmente, com a chamada agricultura 4.0 ou 4^a revolução agrícola, incorporar a inteligência artificial na tomada de decisão para maximizar a eficiência integrada dos fatores de produção (ROSE e CHILVERS, 2018; LATINO et al., 2023).

Deve-se reconhecer que a polissemia é um fenômeno que ocorre durante as transições tecnológicas, muitas vezes refletindo diferentes perspectivas, ênfases ou nuances na aplicação do conhecimento. Entretanto, é válido questionar se as variantes recentemente propostas representam de fato novas acepções semânticas ou se são, na realidade, formas redundantes

para os mesmos requisitos e objetivos presentes na definição abrangente de AP formulada pela ISPA (2023).

Por outro lado, o surgimento desses novos termos pode justamente decorrer do fato de a AP carecer de subdivisões que permitam agrupar as tecnologias emergentes de maneira sistemática. Para preencher esta lacuna, o objetivo desse trabalho é propor um esquema de classificação que se baseia no tipo de monitoramento utilizado nas diversas modalidades de AP. Este critério foi escolhido por sua capacidade tanto de diferenciar as tecnologias atualmente disponíveis quanto de demonstrar a evolução do uso da informação digital na agricultura. Abordaremos nas seções seguintes os critérios utilizados para proposição da classificação da AP e as limitações e perspectivas futuras do sistema classificatório proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Seleção de critérios para a classificação da agricultura de precisão

O termo classificação pode ser definido como o arranjo sistemático de elementos em grupos ou categorias de acordo com critérios pré-definidos (MERRIAM-WEBSTER, 2024). Dessa forma, o ponto de partida neste trabalho foi obter um ou mais critérios adaptáveis às características das modalidades de AP mais difundidas desde os anos 1990.

Numa fase preliminar foram testados os seguintes critérios considerados promissores para agrupar tecnologias de acordo com suas características comuns:

- Setorial: agrupou-se as modalidades por grandes setores (agrícola, florestal, pecuário) e, em seguida, por tipo de cultivo, operação de manejo, tipo de criação etc.;
- Funcional: avaliou-se o nível de emprego agrícola de recursos digitais, como sensores, softwares, hardwares e equipamentos associados;
- Nível de inovação: utilizou-se como diferencial o grau de incorporação das tecnologias emergentes na execução de procedimentos agrícolas;
- Integração tecnológica: avaliou-se a interação ou conectividade de diferentes tecnologias, como sensoriamento remoto, GNSS, VANTs, internet das coisas (IoT) e automação de processos;
- Maturidade tecnológica: agrupou-se as tecnologias em classes de acordo com seu estágio de desenvolvimento (emergentes, consolidadas e obsoletas).

Nenhum dos critérios testados conseguiu separar de forma coerente as classes de AP, cada um devido a particularidades distintas. O critério setorial mostrou-se inadequado porque originalmente a AP destinava-se às lavouras de grãos, com os demais casos sendo adaptações dessa aplicação. A separação por operação de manejo, como irrigação e adubação, também não se mostrou promissora devido à diversidade de métodos empregados nas práticas de manejo agrícola. O uso de categorias funcionais confronta na multiplicidade de dispositivos, *softwares* e aplicativos para coleta e análise de dados. Os critérios nível de inovação e integração tecnológica também se revelaram inadequados, pois as modalidades de AP frequentemente envolvem diversas gerações tecnológicas de dispositivos e métodos computacionais. Por basear-se no grau de evolução da AP, a maturidade tecnológica permitiu agrupar coerentemente as tecnologias disponíveis. No entanto, esse critério envolve subjetividade ao definir quando uma tecnologia pode ser considerada emergente, consolidada ou obsoleta.

Diante da inadequação dos enfoques testados, buscou-se identificar um critério alternativo capaz de agrupar as diversas modalidades de AP. Com base no histórico de desenvolvimento dessa tecnologia (FRANZEN e MULLA, 2015), constatou-se haver uma relação direta entre o tipo de monitoramento utilizado para a coleta de dados de campo e o momento da tomada de decisão operacional. Nos anos 1990, as aplicações predominantes de AP centravam-se no monitoramento da colheita para gerar mapas de produtividade da área colhida. Esses mapas viabilizavam a aplicação de fertilizantes em taxa variável na safra seguinte. Essa técnica de adubação difundiu-se rapidamente na primeira fase da AP. Com o surgimento de outras tecnologias adicionais, incluindo imagens de alta resolução espacial e menor intervalo de revisita por satélites ou VANTs, a tomada de decisão podia ser antecipada (GONÇALVES & CAVICHIOLI, 2021). Isso permitiu a execução de ações corretivas durante a safra em curso, destacando-se novamente a aplicação em taxas variáveis em operações como adubação de cobertura ou aplicação de agrotóxicos.

Nos últimos anos, houve uma expansão no uso de dispositivos que coletam dados diretamente na área cultivada. Denominados de “proximais” (HARDIE, 2020), esses sensores podem ser integrados via IoT com centrais eletrônicas ou smartphones dotados de aplicativos para controle de processos automatizados ou semiautomatizados. O acionamento de sistemas de irrigação é um exemplo de emprego dessa tecnologia (KAMIENSKI et al., 2019). Em outra modalidade de monitoramento, sensores são instalados diretamente em equipamentos como pulverizadores autopropelidos ou VANTs, utilizados em aplicações em taxas variáveis. Um exemplo dessa abordagem é a identificação da presença ou ausência de plantas indesejáveis durante o controle

químico com herbicidas, podendo incorporar ferramentas de inteligência artificial para tomada de decisão em tempo real (KHAIRE et al., 2023).

Em resumo, as características do monitoramento mostraram-se adequadas para classificar as modalidades de AP porque consideram tanto a tecnologia utilizada para monitorar variáveis de interesse como o momento chave para a tomada de decisão operacional. Esse momento pode variar desde um intervalo computado em meses, como no monitoramento da colheita, até tempo real, como no controle automático de plantas indesejáveis por meio de sensores especialistas embarcados em equipamentos agrícolas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a obtenção dos dados e informações necessárias ao aporte teórico deste estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica que buscou soluções, atento ao objeto de estudo, e que permitisse aos pesquisadores obterem respostas para o problema de pesquisa. Levando em consideração essas premissas, a pesquisa foi realizada em materiais como livros, artigos, revistas científicas, periódicos, teses, monografias e outras fontes que se julgaram pertinentes no decorrer da elaboração deste trabalho. Assim, a intenção foi obter a maior quantidade possível de informações atuais que pudesse embasar o estudo e, também, alcançar os objetivos propostos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

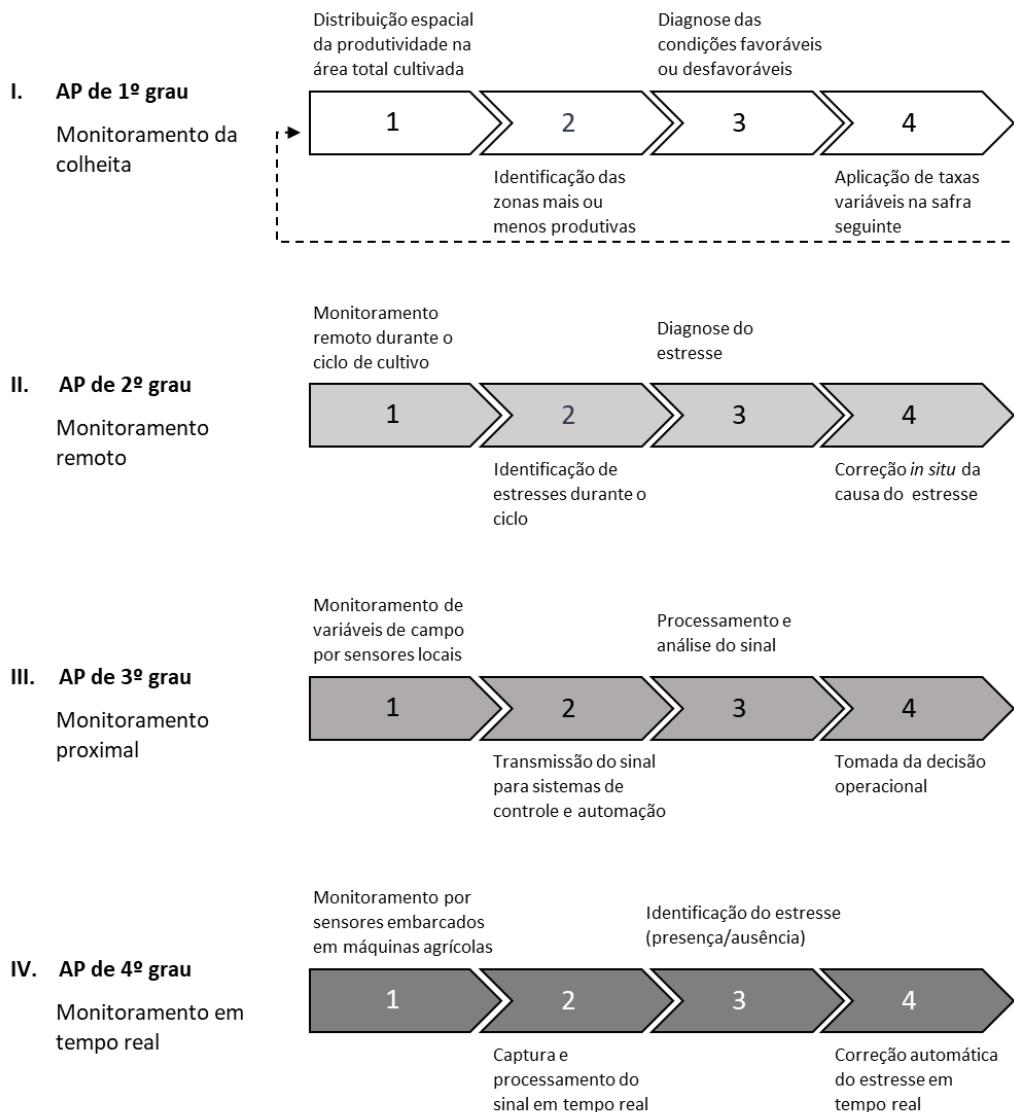
4.1 Definição das classes de agricultura de precisão

A proposição das quatro classes de AP delineadas com base nas características do monitoramento das variáveis de entrada está elucidada na Figura 1. A modalidade de monitoramento, por sua vez, determina o momento da tomada de decisão operacional para a execução de práticas de manejo específicas ou ações de controle. Optou-se pela graduação 1º, 2º, 3º e 4º graus exclusivamente para ordenar cada classe de acordo com a evolução histórica das tecnologias mais preponderantes na AP.

A classe de AP de 1º grau, destacada na Figura 1-I, caracteriza-se principalmente pelo processamento de dados de produtividade após a colheita. Esta classe, definida pelo termo "monitoramento da colheita", implica em uma dimensão temporal que pode abranger meses

entre o ato de monitorar e a efetiva ação operacional para corrigir as anomalias detectadas. Neste cenário, o procedimento típico envolve o registro georreferenciado do fluxo ou acúmulo da produção no momento da colheita. Esse processo permite a geração de mapas que exibem a distribuição das produtividades em toda a área colhida. Por sua vez, o mapeamento da produtividade subsidia ações corretivas para anomalias identificadas, como problemas de fertilidade do solo, por exemplo. Dessa forma, o manejo consiste na aplicação de fertilizantes em taxas variáveis durante a safra subsequente, operação realizada por uma adubadora equipada com dispositivos capazes de identificar as coordenadas da área e distribuir a quantidade prescrita de fertilizante.

Figura 1 - Classificação da agricultura de precisão (AP) de acordo com a tipo de monitoramento das variáveis de campo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Vale ressaltar que a linha pontilhada apresentada na Figura 1-I sugere a repetição desse processo a cada safra. Embora a tecnologia de AP de 1º grau tenha sido possível no passado utilizando-se coordenadas locais obtidas por meio de equipamentos fixos, sua adoção se acelerou significativamente com a disponibilidade pública de sistemas de navegação global por satélite (GNSS) com precisão adequada. Atualmente, uma parcela considerável do cultivo mecanizado no Brasil e em países desenvolvidos incorpora a tecnologia de monitoramento de colheita em seus sistemas de produção (VIAN et al., 2022; NOWAK, 2021).

Enquanto na AP de 1º grau as intervenções se desdobram de uma safra para outra, a AP de 2º grau, representada na Figura 1-II, possibilita a realização de ações durante o ciclo atual de cultivo. Esta categoria, denominada aqui como "monitoramento remoto", destaca-se pelo

uso predominante de meios de monitoramento baseados em imagens capturadas por sensores embarcados em satélites ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

Caso o monitoramento identifique qualquer anomalia, uma investigação direta no local ou o conhecimento prévio dos fatores causais podem permitir a correção do estresse detectado. Um exemplo típico de AP de 2º grau é a aplicação em taxas variáveis de herbicidas por meio de pulverizadores terrestres. Entretanto, a vantagem substancial dos VANTs pulverizadores sobre os sistemas terrestres tem levado à sua crescente adoção em extensas lavouras de soja e cana-de-açúcar (CANICATTÌ, 2024). Além disso, problemas fitossanitários representam causas estressantes comuns que podem ser identificadas pelo monitoramento via satélite ou VANTs, especialmente por meio do processamento de imagens para a obtenção de índices de vegetação (RADOČAJ et al., 2023). A 3ª categoria de AP apresentada na Figura 1-III é denominada "monitoramento proximal", pois suas diversas aplicações baseiam-se em operações realizadas por sensores que monitoram continuamente variáveis ambientais ou culturais. Esses sensores transmitem os dados coletados para sistemas de armazenamento e controle. O termo "proximal" foi escolhido pelos desenvolvedores dessa tecnologia para diferenciá-la dos sensores remotos tradicionais, que não são instalados diretamente no solo ou na área cultivada.

Plataformas de coleta de dados (PCDs) utilizadas na agrometeorologia representam exemplos consolidados dessa tecnologia, pois possibilitam a medição e transmissão contínua de variáveis micrometeorológicas para sistemas de controle e automação, tanto em cultivos a campo quanto em áreas protegidas. Embora PCDs venham sendo empregadas há vários anos para computar o balanço hídrico em parcelas irrigadas (CARLESSO et al., 2009), a lista de aplicações vem crescendo rapidamente (CHAMARA et al., 2022).

Uma característica relevante dos sistemas proximais é sua conectividade. A Internet das Coisas (IoT) e a telefonia móvel viabilizam o controle das operações por meio de aplicativos amigáveis. O aumento do uso de *smartphones* e a expansão da internet em áreas rurais têm tornado essa tecnologia mais acessível para pequenos agricultores em todo o mundo (PNUD, 2021).

A AP de 4º grau, apresentada na Figura 1-IV, implica o monitoramento e controle automático de estresses ou de suas causas em tempo real, ou seja, durante a execução de atividades específicas de cultivo. Um exemplo representativo é o controle de plantas indesejáveis durante o deslocamento de equipamentos de pulverização, seja terrestre ou aéreo. Nesse contexto, o equipamento de pulverização deve incorporar sensores para identificação das plantas a serem

controladas, além de um sistema calibrado para aplicar herbicidas em taxas variáveis conforme o nível de infestação.

Para alcançar eficácia, entretanto, a AP de 4º grau demanda equipamentos com elevado nível de desenvolvimento tecnológico e *softwares* avançados para o gerenciamento do sistema. A utilização de algoritmos baseados em inteligência artificial para o reconhecimento e controle de plantas indesejáveis é uma área ativa de pesquisa e desenvolvimento (SU, 2020; KHAIRE et al., 2023). No entanto, a AP de 4º grau ainda enfrenta restrições de emprego devido às limitações técnicas e econômicas. A viabilidade da implementação dessa tecnologia em lavouras extensivas de grãos foi estudada por Zanin et al. (2022).

4.2 Perspectivas e limitações da classificação

As quatro classes propostas facilitam a organização de maneira simples e acessível das tecnologias precursoras da AP, fundamentadas principalmente no monitoramento de colheita e no sensoriamento remoto, bem como das novas tecnologias baseadas em sensores e sistemas desenvolvidos para a automação de operações agrícolas. As categorias propostas levam em consideração a dimensão temporal em sua estrutura, uma vez que cada método de monitoramento implica em um momento específico para a tomada de decisão operacional.

Embora a classificação contenha apenas um nível categórico, o critério em que se baseia é flexível e pode acomodar tantas subdivisões dentro das classes quanto forem consideradas pertinentes. Além disso, a metodologia empregada possibilita a inclusão de novas classes à medida que a tecnologia de monitoramento agrícola evolui.

A tarefa de classificar apresenta algumas limitações que podem restringir as aplicações práticas de um sistema utilizado para categorizar tecnologias. Latino et al. (2023) apontaram subjetividade e ambiguidade como duas dificuldades ao elaborar uma taxonomia das tecnologias digitais voltadas para a agricultura.

A subjetividade implica algum grau de arbitrariedade na definição dos níveis categóricos. Da mesma forma, a inclusão ou exclusão de componentes nas classes tende a refletir apenas a experiência do classificador, o que pode resultar em juízos de valor equivocados. Como agravante, quando alguns componentes compartilham características comuns, a subjetividade também pode causar ambiguidade na atribuição da posição real de cada componente dentro de sua respectiva classe.

Entretanto, é importante considerar que a capacidade de agrupar adequadamente os componentes por suas afinidades é, por si só, uma medida da eficácia de qualquer sistema classificatório. Naturalmente, o nível de eficácia deverá ser posteriormente atribuído pela comunidade acadêmica ao validar ou não a classificação proposta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A classificação apresentada neste trabalho abrange a evolução da tecnologia de monitoramento disponível para a AP ao longo das últimas décadas. É importante destacar que qualquer classificação de tecnologias está sujeita ao desafio da imprevisibilidade dos avanços científicos, os quais podem rapidamente tornar obsoletos dispositivos, instalações e sistemas de controle. No entanto, o risco de a própria classificação tornar-se obsoleta é reduzido quando ela se baseia em critérios voltados para os propósitos das tecnologias, em vez de focar nos meios utilizados para coletar dados.

Independentemente da classificação e do monitoramento adotado, é fundamental que a coleta de dados sobre o solo, plantas, ataque de insetos e disseminação de doenças seja realizada de forma precisa e confiável, de forma a subsidiar um planejamento mais assertivo sobre as práticas de plantio, colheita, irrigação e aplicação de insumos. Como resultado, minimiza-se o desperdício de insumos, aumenta-se a eficiência da produção e reduzem-se os danos ambientais decorrentes da má aplicação de fertilizantes e pesticidas nas áreas cultivadas.

REFERÊNCIAS

BLOK, V.; GREMMEN, B. Agricultural technologies as living machines: Toward a biomimetic conceptualization of smart farming Technologies. **Ethics, Policy & Environment**, v. 21, n. 2, p. 246-263, 2018.

CANICATTÌ, M.; VALLONE, M. Drones in vegetable crops: A systematic literature review. **Smart Agricultural Technology**, v. 7, p. 100396, 2024.

CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; TROIS, C. The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management. **IFIP International Federation for Information Processing**, v. 293, p. 19-27, 2009.

CHAMARA, N.; ISLAM, MD D.; BAI, G.; SHI, Y.; GE, Y. Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. **Agricultural Systems**, v. 203, p. 103497, 2022.

FRANZEN, D.; MULLA, D. A history of precision agriculture. In: Zhang, Qin (Ed.). **Precision agriculture technology for crop farming**. 1 ed. CRC Press, 2015. p.1-19.

GONÇALVES, V. P.; CAVICHIOLI, F. A. Estudo das funcionalidades dos drones na agricultura. **Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 321-331, 2021.

HARDIE, M. Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. **Sensors** (Switzerland), v. 20, n. 23, p. 6934, 2020.

ISPA. The International Society of Precision Agriculture. **Precision Ag Definition**, January 2021. Disponível em: <<https://www.ispag.org/about/definition>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

JÚNIOR, J. C. A.; NUÑEZ, D. N. C. O uso de drones na agricultura 4.0. **Brazilian Journal of Science**, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2024.

KAMIENSKI, C.; SOININEN, J.-P.; TAUMBERGER, M.; DANTAS, R.; TOSCANO, A.; CINOTTI, T.S.; MAIA, R.F.; NETO, A.T. Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. **Sensors** (Switzerland), v. 19, n. 2, p. 276, 2019.

KHAIRE, P.; ATTAR, V.; KALAMKAR, S. A Comprehensive Survey of Weed Detection and Classification Datasets for Precision Agriculture. In: **14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)**, Delhi: India, 2023.

KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. NJAS: **Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90-91, n. 1, p.1-16, 2019.

LATINO, M.E.; CORALLO, A.; MENEGOLI, M.; NUZZO, B. Agriculture 4.0 as Enabler of Sustainable Agri-Food: A Proposed Taxonomy. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 70, n. 10, p. 3678-3696, 2023.

MERRIAM-WEBSTER. “**Classification**”. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/classification>. Acesso em: 28 jan. 2024.

NOWAK, B. Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. **Agricultural Research**, v. 10 n. 4, p. 515-522, 2021.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). 2021. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/publications/relatorio-anual-2021> Acesso em: 14 jun. 2024.

RADOČAJ, D.; ŠILJEG, A.; MARINOVIĆ, R.; JURIŠIĆ, M. State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in Web of Science: A review. **Agriculture** (Switzerland), v. 13, n. 3, p. 707, 2023.

ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. Preface of Proceedings of Site-Especific Management for Agricultural Systems. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. (Eds.). **Proceedings of Site-Especific Management for Agricultural Systems**. 2 ed. International Conference: Minneapolis, MN, USA, 1994.

ROSE, D.C.; CHILVERS, J. Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in a era of smart farming. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, 2018.

ROSE; D.C.; SUTHERLAND, W.J.; PARKER, C.; LOBLEY, M.; WINTER, M.; MORRIS, C.; TWINING, S.; FFOULKES, C.; AMANO, T.; DICKS, L.V. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. **Agricultural Systems**, v.149, p. 165-174, 2016.

SHEPHERD, M.; TURNER, J.A.; SMALL, B.; WHEELER, D. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the ‘digital agriculture’ revolution. **J. Sci. Food Agric.**, v. 100, n. 14, p.5083-5092, 2020.

SU, W.-H. Crop plant signaling for real-time plant identification in smart farm: A systematic review and new concept in artificial intelligence for automated weed control. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 262–271, 2020.

UNDP. United Nations Development Programme. **Precision agriculture for smallholder farmers**. UNDP Global Centre for Technology, Innovation and Sustainable Development: Singapore, 2021. 80p. Disponível em:
<https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2021-10/UNDP-Precision-Agriculture-for-Smallholder-Farmers.pdf> Acesso em: 15 ago. 2023.

VIAN, A.L.; BREDEMEIER, C.; PIRES, J.L.F.; CORASSA, G.M.; VANIN, J.P. Aplicações da agricultura de precisão na cultura da soja. In: MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.F.; VEY, R.T. (Eds.). **Tecnologias aplicadas para o manejo rentável e eficiente da cultura da soja**. Santa Maria: Editora GR, 2022. p.275-296

ZANIN, A.R.A.; NEVES, D.C.; TEODORO, L.P.R.; DA SILVA JÚNIOR, C.A.; DA SILVA S.P.; TEODORO P.E.; BAIO, F.H.R. Reduction of pesticide application via real-time precision spraying. **Scientific Report**, v. 12, n. 1, p. 5638, 2022.