

# Transformações Na Agricultura: Uma Abordagem Crítica Sobre A Agricultura De Precisão

Wanderson De Vasconcelos Rodrigues Da Silva<sup>1</sup>, Renata Silva-Mann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Piauí – IFPI, Brasil)

<sup>2</sup>(Universidade Federal De Sergipe – UFS, Brasil)

## Resumo:

Este artigo examina a Agricultura de Precisão (AP) como resposta à busca global por métodos agrícolas eficientes e sustentáveis. Fundamentado em revisão crítica da literatura, o trabalho explora os alicerces conceituais, tecnologias e aplicações fundamentais da AP. A evolução agrícola, impulsionada por demandas ambientais e tecnológicas, destaca a necessidade de compreender as interações complexas entre variáveis ambientais, características do solo e requisitos das culturas. A AP, integrando tecnologias como Sistemas de Informação Geográfica, amostragens georreferenciadas do solo e sensoriamento remoto, surge como uma abordagem personalizada para otimizar o uso de insumos agrícolas, respondendo à variabilidade espacial e temporal das lavouras. O trabalho visa oferecer uma análise crítica das transformações agrícolas ao explorar aspectos históricos, definições e objetivos da AP, contribuindo para uma compreensão mais profunda desse modelo inovador. A transformação na abordagem agrícola é evidente, destacando não apenas avanços tecnológicos, mas uma mudança fundamental na gestão agrícola. As considerações finais deste trabalho enfatizam a importância da personalização nas práticas agrícolas, reconhecendo desafios econômicos, acessibilidade e questões éticas. Recomenda-se um compromisso contínuo com a inovação e pesquisa colaborativa para impulsionar a AP em direção a uma adoção mais ampla e eficaz.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão; Sustentabilidade Agrícola; Tecnologias Agrícolas.

Date of Submission: 08-12-2023

Date of Acceptance: 18-12-2023

## I. Introdução

A demanda global por alimentos aliada à dinâmica constante da agricultura tem impulsionado a busca por métodos mais eficientes e sustentáveis. Diante desse contexto, a Agricultura de Precisão (AP) surge como um paradigma inovador, redimensionando a abordagem convencional da prática agrícola. Este artigo, embasado em uma revisão crítica da literatura, tem como propósito explorar minuciosamente os alicerces conceituais, as tecnologias e as aplicações fundamentais que caracterizam a Agricultura de Precisão.

A evolução da agricultura, desde métodos tradicionais até abordagens tecnologicamente avançadas, exige uma compreensão mais profunda das interações entre variáveis ambientais, características do solo e exigências específicas das culturas. A Agricultura de Precisão surge como resposta a essa demanda, integrando tecnologias como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), amostragens georreferenciadas do solo, sensoriamento remoto e sistemas de aplicação diferenciada. A revisão de literatura a seguir delineou os pilares essenciais que constituem o Modelo da Agricultura de Precisão, fornecendo um arcabouço conceitual para a implementação dessas tecnologias.

O cerne deste trabalho é proporcionar uma análise crítica e abrangente das transformações na agricultura impulsionadas pela Agricultura de Precisão. Ao explorar aspectos históricos, definições e objetivos da AP, assim como as tecnologias e sistemas de suporte associados, busca-se contribuir significativamente para uma compreensão mais aprofundada desse modelo agrícola inovador.

A relevância deste estudo reside na sua capacidade de oferecer uma visão panorâmica das práticas da Agricultura de Precisão, destacando suas contribuições potenciais para a eficiência agrícola e a sustentabilidade ambiental. A análise crítica dessas tecnologias busca preencher lacunas no conhecimento existente, fornecendo insights valiosos para pesquisadores, profissionais e tomadores de decisão no campo agrícola.

No capítulo subsequente, adentraremos em uma revisão detalhada da literatura, explorando as transformações na agricultura, o Modelo da Agricultura de Precisão e as tecnologias que constituem essa abordagem inovadora.

## II. Revisão de Literatura

### Transformações da agricultura

Projeções globais apontam as tendências para o planeta na decorrer das próximas décadas e impõem diversos desafios à humanidade, em consequência, entre outros fatores, do grande aumento da população, da

urbanização crescente, das mudanças climáticas e da diminuição da disponibilidade dos recursos naturais. Nesse cenário crítico, os recursos como água, energia e alimentos, demandam o uso racional e inteligente para garantir a sustentabilidade das gerações futuras. Assim, a agricultura tem um papel fundamental para garantir a segurança alimentar e fornecer energia limpa, ao tempo que se mantenha sustentável ao longo dos anos [1, 2].

Ao longo do processo histórico de evolução da humanidade, a raça humana desenvolveu sua capacidade criativa, transformando objetos do seu espaço natural em ferramentas para atender suas necessidades de sobrevivência. Isso permitiu que, mesmo em tempos remotos, o homem desenvolvesse técnicas para tornar sua sobrevivência menos dispendiosa, ainda que de forma lenta e gradativa. Foram essas habilidades que permitiram-lhe alcançar uma das mais importantes transformações, a revolução agrícola, que modificou sua forma de organização espacial na natureza, edificando uma nova civilização capaz de se apropriar intencionalmente do solo e da água, para garantir provisões e sustento por meio da domesticação de plantas e animais [3].

A agricultura é reconhecida como uma das atividades econômicas mais antigas do mundo e é considerada imprescindível para garantir as demandas humanas por alimento, energia, entre outros recursos, porém, seu desenvolvimento foi bastante lento no início, uma vez que o desempenho da produção agrícola dependia exclusivamente de fatores naturais como a qualidade do solo cultivado, condições climáticas do local, disponibilidade de água, etc. Ao longo do tempo, a prática agrícola evoluiu gradativamente até o desenvolvimento de ferramentas e técnicas que possibilitaram ao homem um maior controle sobre a produção por meio do uso de rotação das culturas, correção de deficiências do solo e irrigação [1, 3].

Durante a revolução industrial, o processo agrícola adere à mecanização de forma progressiva, dando origem à agricultura moderna ou industrial. Assim, ao final da Segunda Guerra Mundial (1939–1945), motivado pela necessidade de aumentar consistentemente a capacidade produtiva para atender as demandas de crescimento populacional e o combate a fome no mundo, surge o advento da Revolução Verde a qual proporcionou grandes transformações na agricultura, mediante a inserção de novas técnicas como: o uso intensivo de produtos químicos (fertilizantes e pesticidas); novas tecnologias de plantio, irrigação e colheita; e outras tecnologias [4, 5].

A Revolução Verde iniciou-se na década de 50, tendo como precursor engenheiro agrônomo Norman Borlaug e definiu não apenas um conjunto de técnicas e melhores práticas de manuseio do solo e da plantação, como também uma nova forma de otimizar a organização do trabalho agrícola, sendo acompanhada do surgimento dos transgênicos, plantas geneticamente modificadas, que prometiam maior produtividade, utilizando menos defensivos. Contudo, o aumento da população foi superior à produção de alimentos e, conseqüentemente, o número de pessoas passando fome atualmente se tornou superior ao período anterior à Revolução Verde, principalmente nos países subdesenvolvidos [5, 6].

Diante dos desafios apresentados, a capacidade de inovar é uma característica decisiva para a sustentabilidade agrícola, uma vez que a agricultura do futuro precisará garantir a segurança alimentar para as próximas gerações, aumentando significativamente a produtividade ao extrair a máxima eficiência em todas as etapas da cadeia produtiva. Desse modo, o setor agrícola vem adotando tecnologias inovadoras para gestão de dados, informações e conhecimento, criando uma nova infraestrutura que une o mundo físico e digital [1, 4].

A revolução digital proporcionou grandes mudanças na sociedade e tem sido a base da Quarta Revolução Industrial, promovendo o desenvolvimento de sistemas de suporte à tomada de decisões de manejo baseados no processamento de grandes volumes de dados (Big Data). Assim, surge o conceito da Agricultura 4.0, empregando métodos computacionais de alto desempenho com o objetivo de tornar as etapas do processo agrícola mais produtivas, sustentáveis e resilientes ao clima [1].

Também denominada Agricultura Digital, a Agricultura 4.0 inclui as novas tecnologias como Big Data (acesso e armazenamento de grandes volumes de dados para análise), Cloud Computing (acesso à infraestrutura, softwares e informações por meio de qualquer dispositivo conectado à internet), Internet of Things (máquinas e equipamentos habilitados a estarem permanentemente ligados à Internet), Artificial Intelligence (simulação da inteligência humana em máquinas programadas para "pensar" e "agir" como humanos), entre outras inovações. Essa combinação de tecnologias, proporciona maior assertividade nas tomadas de decisões, garantindo produtividade, reduzindo custos e aumentando a qualidade [7].

### **Modelo da Agricultura de Precisão**

Como discutido na seção anterior, a necessidade de melhorar a eficiência dentro da cadeia de produção agrícola e aumentar o seu rendimento, estimulou a inserção de tecnologias inovadoras na agricultura, promovendo mudanças na gestão da produção agrícola, nos âmbitos filosófico e tecnológico. Esse desenvolvimento da agricultura se deu principalmente a partir do processo de mecanização da atividade agrícola, o qual permitiu o aumento da produção da lavoura para uma escala de operação maior. No entanto, o aumento da extensão das áreas cultivadas dificultou o gerenciamento eficiente dos fatores de produção, em

virtude da variabilidade espacial e temporal, realizado, a princípio, por meio da observação visual e experiência dos produtores, uma vez que a variabilidade dentro dos campos agrícolas aumentou consideravelmente [3, 8].

Antes mesmo antes da mecanização do trabalho no campo e da produção em larga escala, os produtores que trabalhavam em pequenas áreas, com uso da força animal ou de pequenas máquinas, reconheciam a existência de características físicas e químicas diferentes entre os terrenos cultivados e, até mesmo, entre parcelas do mesmo terreno. Do mesmo modo, era possível verificar rendimentos de produção diferentes de acordo com a aplicação variável dos insumos agrícolas. Essa capacidade permitiu a divisão do campo em tabuleiros menores para identificar e tratar as áreas com maior deficiência de nutrientes ou com maior incidência de pragas, mediante a aplicação sob medida de adubos, defensivos, sementes, irrigação, entre outros insumos, agregando certa precisão à atividade agrícola da época [9, 10].

Como resultado do aumento da potência e da capacidade do maquinário utilizado, as áreas de cultivo se tornaram cada vez maiores e, conseqüentemente, os agricultores foram diminuindo sua capacidade de investigar manualmente a variabilidade espacial do solo e da cultura, passando a considerá-la uniforme. As decisões eram tomadas com base nas condições médias dentro do campo a partir de dados que eram frequentemente imprecisos. Por exemplo, para determinar a fertilidade do solo, era considerado um valor médio entre as medições encontradas para descrever as condições em todo o campo. Em outros casos, como no controle de pragas, a aplicação dos defensivos era gerenciada de forma intensiva para superar a variabilidade de toda a área de cultivo [2, 8].

Atendendo a necessidade crescente do uso racional dos recursos na agricultura, o avanço e a difusão da eletrônica por meio do desenvolvimento de sensores, atuadores e microcontroladores, permitiram a automatização do processo de produção agrícola ao incorporar novas tecnologias que passaram a ser embarcadas nas máquinas e equipamentos, tornando-os programáveis, flexíveis e eficientes. Posteriormente, com o advento das tecnologias da informação e comunicação, os produtores agrícolas passam a tomar decisões de gerenciamento de insumos com base na análise de uma grande quantidade de informações, coletadas por diferentes meios e disponibilizadas em tempo real [8, 9].

Contudo, foi a partir do surgimento do processo de georreferenciamento por receptores (Global Navigation Satellite System – GNSS), dos Sistemas de Informação Geográfica (Geographic Information System – GIS) e das tecnologias de aplicação diferenciada de insumos (Variable Rate Technology – VRT), que se tornou possível considerar cada pequena área ou parcela de terreno como uma unidade independente, mantendo a eficiência de produção agrícola obtida com o advento da mecanização e alcançando a precisão em larga escala [4, 9].

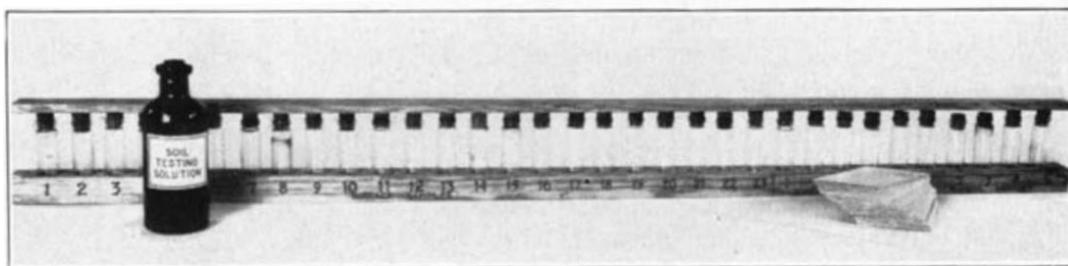
É nesse contexto de inovações tecnológicas no agronegócio que se consolida a Agricultura de Precisão (AP), uma forma inovadora de analisar o campo e corrigir problemas na lavoura, considerando as necessidades de cada ponto específico da área de cultivo e, conseqüentemente, promovendo o uso racional dos insumos agrícolas. A Agricultura de Precisão se diferencia do manejo convencional, uma vez que permite aos agricultores gerenciar a variabilidade espacial e temporal das áreas de cultivo, respondendo distintivamente às propriedades físicas e químicas das subunidades da lavoura, ou seja, a AP compreende um sistema completo de gerenciamento da produção agrícola, visando otimizar o uso de sementes, água, fertilizantes, corretivos, defensivos, entre outros, tornando-a uma atividade cada vez mais produtiva e sustentável [5, 8, 9].

### **Aspectos históricos**

Há séculos os agricultores são observadores atentos ao desempenho das culturas e já se reconhecia que o campo não possui características uniformes em toda sua extensão. Na década de 1620, eram observadas práticas de aplicação localizada de fertilizantes, na qual se colocavam peixes diretamente nas raízes de cada planta. Também eram reconhecidos os benefícios da disseminação de diferentes quantidades de esterco e materiais de calagem em diferentes tipos de solos, ou seja, ainda que em pequenas propriedades, o solo destinado ao plantio apresenta diferentes aptidões agrônômicas que deve ser considerada para a implantação das lavouras [2, 8].

Em 1929, os pesquisadores Clyde Linsley e Frederick Bauer, da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois, identificaram a existência de uma grande variabilidade da necessidade de calcário entre unidades analisadas de uma área agrícola. Os pesquisadores emitiram uma circular sobre o processo de mapeamento em grade dos pontos do solo que serviram de amostra para os testes de acidez (Figura 1) e o detalhamento da geração de mapas de prescrição para subsidiar o processo de calagem do solo de acordo com a variabilidade identificada [8, 11].

**Figura 1: Equipamento utilizado para realização dos testes de acidez do solo.**



Fonte: Linsley e Bauer (1929) [11].

Contudo, a filosofia da Agricultura de Precisão, como é conhecida atualmente, remonta à década de 1980, quando foram produzidos os primeiros mapas de produtividade na Europa e foram realizadas as primeiras aplicações de adubos com doses variadas de forma automatizada nos Estados Unidos. As práticas foram motivadas, entre outros fatores, a partir de grupos de pesquisas da Universidade de Minnesota que destacavam a variabilidade presente nas lavouras, proveniente da própria constituição do solo ou de interferências causadas pelo homem. Esses grupos deram origem a International Society of Precision Agriculture (ISPA) [2, 9].

A partir dos anos 1990, houve um avanço significativo das pesquisas sobre Agricultura de Precisão em virtude do monitoramento da produção para criação de mapas de produtividade e da aplicação diferenciada de insumos, com base na tecnologia de sensores eletrônicos em máquinas computadorizadas, nos sistemas de informação geográfica (SIG) e no sistema de posicionamento global (GPS), conforme citados na seção anterior. Vale ressaltar que, o sistema GPS, operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, iniciou suas operações na década de 1970, tornando-se totalmente operacional apenas em 1995. Porém, até o ano 2000, o sinal para uso civil apresentava degradação intencional, demandando altos custos para sua correção [2, 12].

Dessa forma, esse aparato de tecnologias incorporadas ao modelo de Agricultura de Precisão tornou possível não apenas o mapeamento da variabilidade da lavoura para aplicação de insumos condizentes com os dados coletados e analisados, como também permitiu mapear instantaneamente a produtividade agrícola em associação às coordenadas geográficas.

### **Definições e objetivos da Agricultura de Precisão**

A Agricultura de Precisão (AP) integra a Agricultura Inteligente (Smart Farming) ou Agricultura 4.0, uma vez que se refere à utilização de equipamentos de alta tecnologia, envolvendo desde hardware (componentes físicos) próprios aos mais variados softwares (programas de computador) especializados e redes de telecomunicação (transmissão de dados), criando um sistema complexo que permite coletar dados para monitoramento e avaliação de determinadas áreas destinadas à agricultura como suporte à tomada de decisões no processo de produção agrícola. No inglês, a AP pode ser denominada por diversos termos, entre eles: Precision Agriculture, Precision Farming, Site Specific Crop Management, entre outras variações [3, 4, 9].

Devido sua grande abrangência, as definições são relativamente abundantes na literatura, porém trazem consigo o mesmo fundamento, uma vez que a Agricultura de Precisão combina técnicas e conceitos antigos relacionados à administração personalizada e localizada das lavouras, com ferramentas e procedimentos modernos de posicionamento georreferenciado nos campos agrícolas. Desse modo, observa-se que as definições têm mudado ao longo do tempo com a finalidade de acompanhar e incorporar a evolução das novas ferramentas e técnicas que surgem no decorrer do desenvolvimento tecnológico, ou seja, trata-se de um conceito modular em constante adaptação para se reconfigurar na medida em que as inovações tecnológicas transformam o setor agrícola [8, 10].

Outras definições destacam o uso de tecnologias modernas de informação para coletar, processar e analisar dados de várias fontes de alta resolução espacial e temporal para a tomada de decisões e operações de manejo das culturas. A Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA, acrônimo de International Society of Precision Agriculture) esclarece que sempre houve uma necessidade de esclarecer o que realmente é a Agricultura de Precisão.

O fato é que os exemplos mais comuns do uso da Agricultura de Precisão estão relacionados à aplicação personalizada de insumos, uma vez que esses fatores representam um elevado impacto econômico sobre o custo total da cultura, ao tempo que geram, maiores ou menores, impactos ambientais, e que não há consenso entre as comunidades da AP sobre a terminologia precisa no que diz respeito ao emprego das tecnologias, visto que há uma enorme quantidade de inovações tecnológicas que podem compor a infraestrutura desse sistema complexo e, ao mesmo tempo, flexível [2, 3].

Destaca-se que adoção da Agricultura de Precisão não se resume a obtenção de veículos, equipamentos e tecnologias de ponta, mas sim em na abordagem de uma cadeia de conhecimentos, na qual sensores,

dispositivos, máquinas e softwares constituem ferramentas para a coleta de dados, os quais devem ser estruturados e interpretados, gerando informações para apoiar o gerenciamento das lavouras.

Independentemente das divergências nos tipos de tecnologias empregadas e das etapas do ciclo produtivo em que a abordagem da Agricultura de Precisão é utilizada, a AP tem por objetivos [13]:

- otimizar o uso dos recursos disponíveis para aumentar a produtividade e a sustentabilidade das operações agrícolas;
- reduzir o impacto ambiental negativo resultante da atividade no campo;
- melhorar a qualidade do ambiente de trabalho e os aspectos sociais da agricultura.

### Sistema de Agricultura de Precisão

Compreender o Sistema de Agricultura de Precisão constitui uma habilidade essencial ao produtor agrícola que permitirá conhecer as ferramentas básicas necessárias para coletar o máximo de dados relevantes à produção agrícola. Depois de processadas as informações, será possível identificar e avaliar a variabilidade da lavoura e, a depender da necessidade encontrada em cada subdivisão da unidade analisada e dos recursos financeiros disponíveis, definir quais as ferramentas e tecnologias a serem adotadas para o manejo da variabilidade [9, 14].

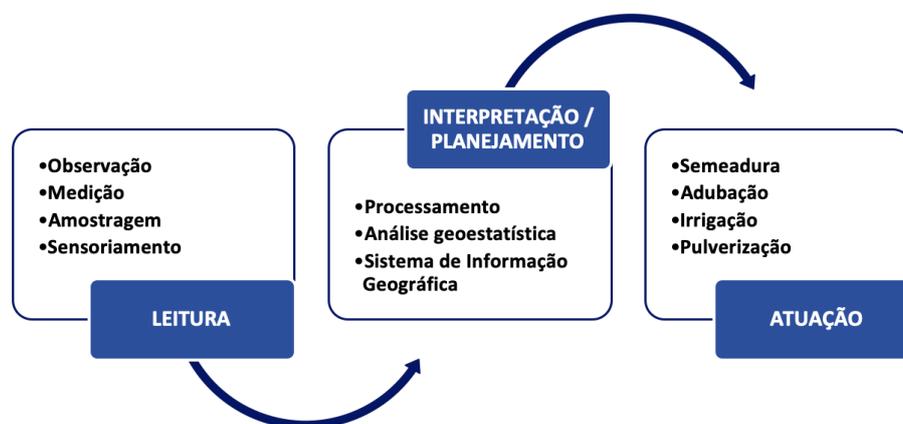
Na literatura sobre o tema, é comum os autores organizarem e descreverem todo o processo da Agricultura de Precisão em uma determinada cultura como um conjunto de etapas nas quais são constituídas por uma ou mais atividades. Há autores que dividem o gerenciamento de precisão da lavoura em duas grandes etapas: fase de investigação, na qual são coletadas informações, por meio de observação ou amostragem, que definirão a necessidade de insumos ou tratamentos especiais; e a fase de tratamento localizado, também conhecida como aplicação em doses variadas, que representa a distribuição dos insumos conforme a demanda de cada porção (a menor possível) da área cultivada [2].

Outra forma comum de descrever o processo da Agricultura de Precisão nas lavouras pode ser definido ao dividi-lo conceitualmente em três etapas: leitura, interpretação / planejamento e atuação (Figura 2).

O processo se inicia com a leitura de dados obtidos por meio de sensores e equipamentos de amostragem, sensoriamento remoto, entre outros. A etapa seguinte compreende a interpretação dos dados coletados mediante processo de análise apoiado por ferramentas de geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). As novas informações geradas nessa etapa fornecem suporte ao planejamento das próximas operações no campo. A terceira e última etapa envolve a operacionalização das decisões tomadas, ajustando a aplicação em taxa variável dos insumos, conforme em mapas de prescrição gerados durante a etapa de interpretação e planejamento. Essa precisão na localização dos dados obtidos e a atuação mediante planejamento sobre mapas é o que difere a AP dos demais processos de produção agrícola convencionais [12].

Em virtude da ocorrência de uma sequência de operações básicas no ciclo da agricultura convencional (preparação do solo, plantio, acompanhamento da lavoura e colheita), a Agricultura de Precisão é compreendida como um ciclo de melhoria contínua, no qual todo o processo deve ser reiniciado a fim de que novos dados sejam coletados, interpretados e analisados para regulagem dos mapas de aplicação. Desse modo, a cada ciclo são realizados ajustes de acordo com a variabilidade espacial detectado neste ciclo, permitindo a criação do histórico da cultura [14, 15].

**Figura 2: Ciclo da Agricultura de Precisão em três etapas.**



Fonte: Adaptada de Inamasu e Bernardi (2014) [12].

Há uma discussão entre os técnicos e pesquisadores do setor sobre por onde o agricultor deve iniciar a implantação da AP em seu ciclo de produção agrícola. Alguns autores defendem que o seu ciclo deve se iniciar na fase de colheita, a partir do uso de máquinas colheitadeiras providas de sensores de colheita conectados a sistemas de posicionamento (Global Positioning System – GPS), para geração de mapas de produtividade dos pontos georreferenciados e, conseqüentemente, detectar o nível de variabilidade de produção de toda área cultivada. A partir desse mapeamento, é possível identificar as limitações de produtividade de cada unidade do terreno e realizar as ações necessárias de correção das mesmas [3, 15].

A fase seguinte consiste na preparação do solo e se divide basicamente em duas etapas: monitorar a variabilidade espacial das características solo e aplicação de taxa variável de corretivos / fertilizantes. O mapeamento das propriedades do solo pode ser realizado por uma variedade de sensores georreferenciados, que reagem aos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, ou pela realização de amostragem sistemática (em grade ou grid), gerando mapas para cada indicador. Após o mapeamento dos nutrientes e propriedade do solo, deve se considerar também a variabilidade da produção anterior a fim de gerar mapas de prescrição para a cultura seguinte, mediante aplicação em dose variável de fertilizantes e corretivos. As máquinas que realizam a aplicação dos insumos (Variable Rate Technology – VRT ou Variable Rate Application – VRA) são conectadas ao GPS com o objetivo de garantir a precisão e, posteriormente, gerar os relatórios de aplicação para avaliação [4, 15, 16].

Na seqüência, a fase de plantio consiste na semeadura ou plantio à taxa variável, considerando o potencial produtivo de cada unidade da área em tempo real, com base no conjunto de informações processadas pelos sistemas de suporte à decisão. A disponibilidade de máquinas habilitadas a variar a densidade de sementes com base em mapas de plantio (uso das tecnologias de GPS e VRT) representam um aumento da produtividade no campo ao tempo que reduz o custo de produção, uma vez que os gastos com aquisição de sementes têm participação significativa na composição do custo total de produção da lavoura [3].

A fase de acompanhamento da lavoura compreende o mapeamento e monitoramento das áreas de infestação de plantas invasoras, pragas e doenças, para aplicação diferenciada de defensivos agrícolas, visando a economia do produto químico aplicado e reduzindo os impactos ambientais. O acompanhamento pode ser realizado por meio do histórico da cultura, técnicas de sensoriamento, armadilhas, entre outros. A aplicação sob medida de defensivos faz uso das tecnologias de taxa variável (VRT) e de controle de tráfego por GPS (barra de luz / piloto automático) a fim de evitar o pisoteio da lavoura pelas máquinas e diminuir a sobreposição na aplicação do produto durante o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças [4, 15].

Como foi descrito anteriormente, a Agricultura de Precisão é uma abordagem que compreende um ciclo de melhoria contínua estabelecido por uma série de operações em uma determinada seqüência. Embora a literatura sobre a abordagem da AP não defina um modelo rigoroso a ser seguido, entende-se que as fases da produção agrícola em uma cultura podem ser divididas em etapas menores que se repetem ao longo de todo o ciclo produtivo, ou seja, cada fase de produção da lavoura envolve a coleta de dados, que por sua vez serão analisados e interpretados, para subsidiar a execução de uma intervenção ou aplicação de insumos, ambas de forma diferenciada.

A adoção do sistema de Agricultura de Precisão fornece ao produtor um suporte à tomada de decisões mais confiável e rápido, ao mesmo tempo que confere maior flexibilidade na aplicação dos insumos, nos locais necessários e no tempo adequado, reduzindo os custos da produção agrícola. Além de obter um maior controle da produção e melhorar o rendimento da lavoura, a AP favorece a redução dos impactos negativos resultantes da atividade agrícola sobre o meio ambiente ao diminuir a contaminação das águas e do solo pelo uso controlado de fertilizantes e defensivos [17].

Por fim, o mais importante não é definir qual dessas fases o agricultor deve iniciar na Agricultura de Precisão, mas sim reconhecer que, seja qual for a variabilidade, a AP pode ser adotada para medi-la e determinar como ela afeta a produtividade e, existindo tecnologias aptas, executar a aplicação diferenciada dos insumos necessários, uma vez que a utilização das técnicas da AP agregam inúmeras vantagens ao processo de produção, frente ao modelo convencional de agricultura.

### **Tecnologias e sistemas de suporte**

A Agricultura de Precisão surgiu como um sistema para gerenciar informações sobre a produção agrícola por meio da confecção de mapas de produtividade, adotando equipamentos eletrônicos e de tecnologia da informação para facilitar os estudos da lavoura, considerando sua variabilidade espacial. Assim, foram reunidas várias ferramentas para auxiliar na identificação e controle das possíveis variabilidades das áreas de manejo, como os sistemas de navegação global por satélites, sensores e técnicas de sensoriamento remoto, aplicativos e sistemas de informação, monitoramento de colheita, tecnologias de medição das propriedades do solo, tecnologias de aplicação de insumos agrícolas a taxa variável, entre outras [9, 14].

A adoção de novas tecnologias na agricultura constitui um processo de constante inovação do setor, promovendo sua competitividade e sustentabilidade, ou seja, a tomada de decisões no campo, suportada por

sistemas inteligentes, e a execução das operações da forma mais eficiente, está se tornando indispensável para alcançar rendimentos cada vez melhores. Desse modo, a técnicas da Agricultura de Precisão provê a aplicação dos fatores de produção (corretivos, adubos, defensivos, sementes, etc.) na quantidade correta, no local adequado e no momento ideal, de modo a obter a maior eficiência possível, desde que os custos implicados e as tecnologias envolvidas no processo viabilizem a sua adoção [5, 10]. A seguir, são apresentadas algumas das principais tecnologias e sistemas de suporte utilizados pelo sistema de Agricultura de Precisão.

- **Sistemas de navegação por satélites**

Um fato inovador que favoreceu a implementação efetiva das técnicas da Agricultura de Precisão (AP) foi o surgimento dos sistemas de navegação global por satélites, ou em inglês, Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Há dois sistemas ativos completamente operacionais: o sistema russo Glonass e o sistema NAVSTAR-GPS, dos Estados Unidos, sendo este o mais utilizado em todo o mundo e, portanto, a base de praticamente todos os sistemas de Agricultura de Precisão. Existem também o sistema chinês Compass e o sistema europeu Galileo, ambos em fase final de desenvolvimento. Com exceção do GNSS europeu, os demais sistemas são derivados de projetos militares dos seus respectivos países [2, 3].

O Global Positioning System (GPS) foi lançado pelos EUA na década de 70, tornando-se completamente operacional em 1994. O sistema está estruturado em três segmentos: espacial, de controle e utilizador. A parte espacial é composta por 24 satélites distribuídos em torno do globo terrestre, percorrendo uma órbita em aproximadamente 12 horas. Essa disposição garante que qualquer ponto no ar ou na superfície terrestre seja alcançado por no mínimo quatro satélites de forma ininterrupta. A unidade de controle monitora e mantém os satélites. E o utilizador compõe os receptores que obtêm o sinal dos satélites para calcular sua posição [3; 18].

A agricultura evoluiu bastante com o processo de mecanização de suas atividades advindo da Revolução Industrial. Maquinários agrícolas, como semeadoras, pulverizadores e colheitadeiras, aumentaram exponencialmente a extensão dos campos agrícolas. Com a disponibilização dos sinais de satélites de posicionamento (GPS), as máquinas agrícolas passaram a utilizar receptores GNSS conectados a computadores de bordo que possibilitaram o mapeamento localizado da colheita e a realização de análises georreferenciadas do solo. Assim, o GPS se tornou a base de todo o sistema de Agricultura de Precisão, uma vez que, para definir a variabilidade espacial das propriedades da lavoura de forma precisa, é indispensável determinar a localização geográfica de cada ponto de amostragem [3, 12].

O impacto dessa inovação revolucionou vários setores e o grande desafio nessa fase inicial era ter o domínio completo sobre a tecnologia oferecida pelo sistema de posicionamento global para automação do maquinário agrícola e de outros equipamentos de monitoramento. Dessa forma, seria possível realizar o gerenciamento do processo de produção na agricultura, considerando a variabilidade espacial das áreas de manejo georreferenciadas.

Ressalta-se que, inicialmente, o uso do GPS no campo exigia altos investimentos em sistemas de correção diferencial para melhorar a precisão na localização, uma vez que, até o ano 2000, o Departamento de Defesa dos EUA causava intencionalmente um erro exagerado no posicionamento dos receptores de uso civil, impossibilitando que os equipamentos operassem com precisão inferior a 80 metros. Essa peculiaridade elevava o custo operacional das práticas da Agricultura de Precisão, limitando sua adoção. A partir de maio do ano 2000, a interferência no sinal foi desligada, possibilitando o uso de receptores de custo inferior que se popularizaram e, conseqüentemente, o desenvolvimento da AP [2, 18].

Com a diminuição dos custos de implantação, os receptores GPS passaram a equipar, desde veículos aéreos para uso na agricultura, a máquinas agrícolas que passaram a utilizá-los para sua condução pelo campo. Os sistemas de condução assistida por GPS possibilitam aos operadores realizar passagens paralelas e precisas durante a aplicação de sementes, fertilizantes e defensivos, o que garante maior uniformidade e reduz sobreposições ou falhas. Esse sistema é constituído por uma antena, um receptor e um mecanismo de condução que guiará o operador, podendo esse mecanismo assumir a forma de uma barra de luz (conhecida como lightbar), um monitor, um sistema sonoro ou uma combinação desses. Na seqüência, surgiram os sistemas de condução automática nos quais um mecanismo de piloto automático foi adicionado [2, 19].

Dessa forma, as tecnologias de navegação por satélite consolidaram a prática a Agricultura de Precisão em duas frentes: a aplicação de corretivos, fertilizantes, sementes e defensivos, sob taxas variáveis, mediante a amostragem georreferenciada das áreas de cultivo e o uso de sistemas de condução guiada e automática para o maquinário agrícola. Os receptores GNSS modernos garantem maior exatidão no posicionamento, podendo sintonizar o recebimento dos ondas de satélites GPS (americano) e Glonass (russo), reduzindo o risco de perda de sinal [2, 3].

• **Sistemas de Informação Geográfica**

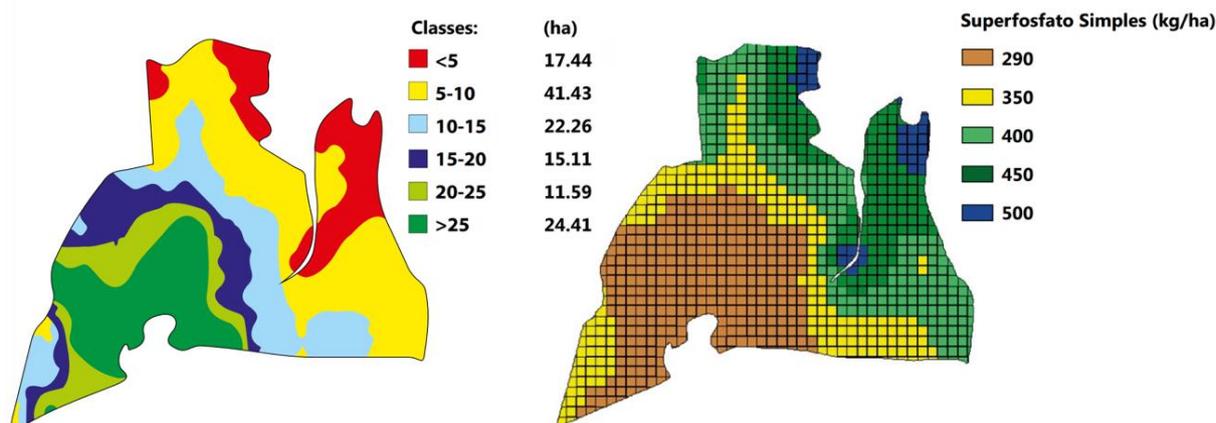
Dados geográficos digitais obtidos por meio de receptores conectados a sistemas de navegação por satélites (GNSS) podem ser armazenados, analisados, integrados e exibidos em diferentes representações. Para lidar com esses dados, a Agricultura de Precisão (AP) faz uso de um pacote de softwares específicos conhecidos como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), em inglês, Geographic Information Systems (GIS). Essas ferramentas computacionais dispõem de uma ampla variedade de recursos capazes de exibir graficamente dados georreferenciados, ou seja, pontos localizados geograficamente e, portanto, estão diretamente relacionados às tecnologias de posicionamento global [8, 20].

Os Sistemas de Informação Geográfica apoiam as etapas de planejamento do ciclo da Agricultura de Precisão por meio do processamento dos dados e informações coletados, funcionando como um sistema de suporte à decisão aliado a outras ferramentas, como a geoestatística. Embora os sistemas de informação mais simples possam mapear dados em uma única camada, como por exemplo dados sobre o rendimento da colheita, o uso de SIGs possibilita a construção de relacionamentos mais complexos, ou seja, combinação dados de padrões temporais ou integração de variáveis de diferentes naturezas, para geração de mapas em diversas camadas de dados [8, 21].

Desse modo, é possível gerar informações sobre a variabilidade espacial e temporal entre diferentes fatores na produção agrícola para o melhor manejo, delimitando as áreas onde deve haver algum tipo de intervenção. Também é possível criar novas modelagens e simulações a partir da modificação do nível de informações ou da integração de novos dados, para então extrair ideias e soluções adequadas a cada lavoura.

A análise dos dados com uso de procedimentos geoestatísticos e os resultados cartografados possibilitam identificar quais os insumos a serem utilizados, suas dosagens adequadas de aplicação e o local (e até mesmo o período de tempo) exato em que devem ser administrados (Figura 3). Essa intervenção no processo de cultivo promove o crescimento da produtividade da lavoura e a redução dos custos de produção devido ao uso diferenciado dos fatores agrícolas. Consequentemente, o uso racional de insumos, em especial de produtos químicos contaminantes, proporciona uma produção sustentável, uma vez que minimiza os danos ambientais [20; 21].

**Figura 3: Exemplo de mapa temático de distribuição espacial de Fósforo (à esquerda) e mapa de prescrição de fertilizante à taxa variada (à direita).**



Fonte: Adaptada de Amado et al. (2016) [22].

Outra funcionalidade importante dos SIGs é a manutenção dos registros das lavouras em bases de dados com intuito de analisar decisões de gerenciamento, rendimentos da produção, controle de pragas e doenças, propriedades do solo, entre outros fatores relacionados às práticas anteriores e atuais. Também é possível realizar integração com outros softwares de suporte à tomada de decisão e enviar os resultados (mapas de prescrição / aplicação) para uso das ferramentas de aplicação de insumos em taxa variável (Variable Rate Application – VRA) [8].

Em associação aos Sistemas de Informação Geográfica, as ferramentas de análise geoestatística são consideradas a forma mais adequada para analisar a variabilidade espacial das características dos campos agrícolas, sendo possível avaliar a localização geográfica e a dependência espacial das peculiaridades da área com o propósito de interpolar valores aos locais não amostrados e assim produzir mapas contínuos com informações precisas e, além do mais, estruturar amostragens futuras em razão da variabilidade encontrada. Essa integração dos SIGs com outras ferramentas e tecnologias permite criar uma estrutura complexa de dados os quais sustentam o Sistema de Agricultura de Precisão [3, 21].

A capacidade de análise dos Sistemas de Informação Geográfica e a possibilidade de uso em diferentes áreas foram responsáveis pelo aumento de sua utilização, principalmente na agricultura, tornando-se indispensável em todas as fases do ciclo de produção agrícola. Além de trabalhar com um foco quantitativo, considerando o aumento da produtividade e a diminuição dos desperdícios de insumos, a ferramenta SIG também apresenta um enfoque qualitativo ao agregar valor à produção no campo, o que determina seu potencial relevante na Agricultura de Precisão [20].

É importante ressaltar que os benefícios da análise de dados por meio dos SIGs e da execução das ações planejadas serão melhor percebidos se houver variabilidade nas características da lavoura que causam impactos na produção da cultura, ou seja, quanto maior a variabilidade encontrada, maior será o retorno da produtividade e da redução dos custos, em relação ao manejo tradicional. Também vale destacar que o uso da ferramenta SIG não se limita apenas aos produtores com grande disponibilidade financeira, uma vez que os avanços da tecnologia tendem a tornar as ferramentas mais acessíveis, tornando seu uso viável em pequenas propriedades [12].

Existem diversas ferramentas SIG que podem ser utilizadas na Agricultura de Precisão, desde sistemas de uso geral, a sistemas de uso específico. Algumas ferramentas estão disponíveis para instalação em computador sem necessidade conexão à internet, outras são acessíveis por meio de navegador web e, nesse caso, dependem de conexão constante com a internet e algumas ferramentas demandam ambas modalidades de uso e instalação. Também existem soluções mobile que permitem a execução de tarefas mais simples e a exportação dos dados para o computador. A maioria dos SIGs são comerciais, sendo necessária a compra de licença para uso, como o ArcGIS (<http://www.esri.com/software/arcgis/>), mas também existem soluções gratuitas e de software livre, como o caso do QGIS (<https://qgis.org/>), mantido por uma comunidade de voluntários [23].

#### • **Amostragens georreferenciadas do solo**

A gestão precisa das lavouras é sustentada por um conjunto de tecnologias empregadas ao longo da cadeia produtiva que processam os dados coletados sobre o processo de produção agrícola. A coleta de dados corresponde à etapa de investigação da lavoura, sendo esta responsável pelo levantamento dos dados que dão suporte às intervenções na cultura, seja para administrar a aplicação diferenciada de insumos, como também para realizar os tratamentos adequados e sob medida ao solo.

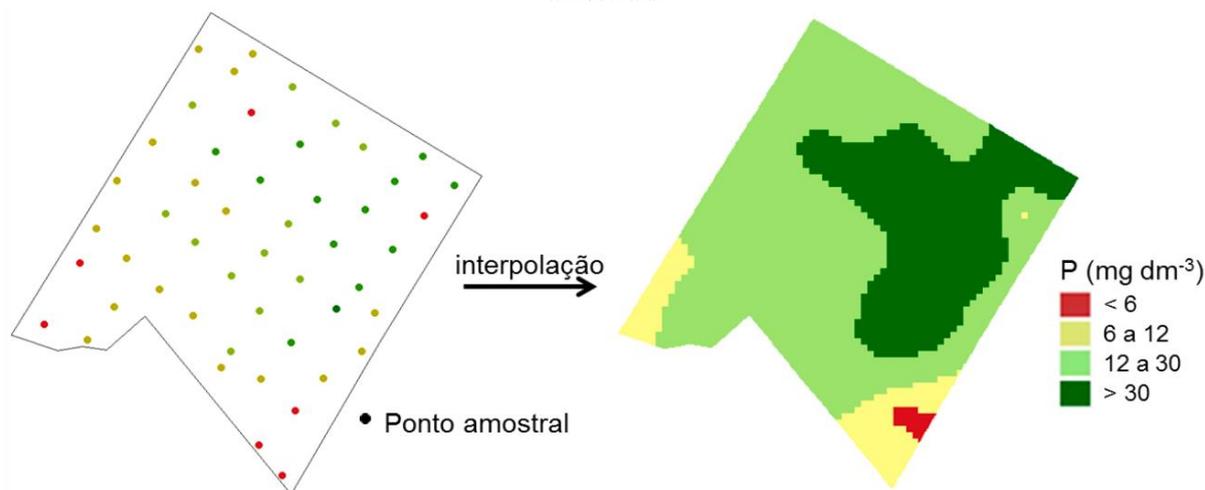
O levantamento dessas informações pode ser realizado por meio de percepção do próprio agricultor, como por exemplo ao observar a incidência de pragas, doenças ou plantas invasoras na cultura, e assim, tomar as medidas necessárias e adequadas. Porém, dada a extensão das áreas agrícolas, a investigação por observação do agricultor se torna dificultosa, sendo necessário o emprego de técnicas mais adequadas como a amostragem georreferenciada do solo ou amostragem em grade [2].

A amostragem consiste na representação de um todo (universo) a partir da avaliação de partes menores (amostras), ou seja, a amostragem georreferenciada na agricultura representará um talhão por meio da análise de alguns pontos específicos do terreno, obedecendo a uma metodologia apropriada a cada parâmetro ou característica que se pretende investigar. A amostragem do solo é uma atividade comum na maioria dos sistemas de produção agrícola, sendo considerada indispensável em regiões que apresentam grande variabilidade espacial do solo ao longo das áreas de cultivo ou até mesmo em pequenas porções do terreno. Para isso, a área a ser investigada é dividida em uma grade com pontos georreferenciados, regulares ou não, e em cada ponto são retiradas amostras que serão analisadas em laboratório [2, 3].

O principal objetivo da amostragem georreferenciada é avaliar as necessidades do solo de forma mais detalhada e precisa, quando comparada às práticas convencionais de análise, podendo ser aplicada na investigação das mais diversas propriedades do solo que variam dentro de um mesmo talhão, sejam elas resultantes da formação do solo na região, ou devido a fatores ligados à própria prática agrícola que alteram as características do solo, como uso de fertilizantes, rotação de culturas, entre outros. Esse sistema de gerenciamento permite monitorar e quantificar as variações das propriedades do solo, não apenas para prescrever intervenções, como também para entender os efeitos do uso da terra [4, 16].

A definição das propriedades do solo a serem analisadas leva em consideração suas influências no crescimento e desenvolvimento da lavoura, como por exemplo a fertilidade do solo baseada no nível de acidez (pH) e no teor dos principais nutrientes: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg). Também podem ser analisados fatores como o teor em matéria orgânica, textura, drenagem, profundidade, compactação, condutividade elétrica, relevo, entre outros. Os resultados das análises das amostras georreferenciadas são interpolados por meio da ferramenta SIG (estimação de valores nas regiões não amostradas) para geração de mapas de fertilidade (Figura 4) que podem ser integrados com outras informações (por exemplo, mapas de fertilidade passados ou mapas produtividade), para então subsidiar a aplicação localizada dos insumos necessários [3, 4].

**Figura 4: Geração do mapa de fertilidade a partir da interpolação dos dados obtidos nos pontos amostrais.**



Fonte: Molin, Amaral, Colaço (2015) [2].

É importante destacar que a análise de solos faz parte da Pedologia, um ramo da Ciência do Solo que estuda a identificação, formação, classificação e mapeamento dos solos, e portanto, sua prática é utilizada no sistema convencional de agricultura há várias décadas para prescrição de nutrientes ou corretivos. No entanto, é comum utilizar poucas amostras, que são colhidas aleatoriamente, ou apenas uma amostra por talhão investigado, não sendo considerada a variabilidade, ou seja, após análise dos resultados em laboratório, é recomendada a aplicação dos insumos de forma homogênea para toda área [24].

Por outro lado, os sistemas de Agricultura de Precisão têm por objetivo conhecer a variabilidade espacial das propriedades do solo por meio da análise de diversas amostras coletadas mediante pontos geograficamente referenciados (coordenadas GPS) e, por fim, variar a taxa de aplicação dos corretivos e nutrientes do solo conforme as necessidades específicas de cada parcela definida por procedimentos geostatísticos (ferramenta SIG) da área total investigada [3, 21].

Apesar das várias características do solo que podem ser mapeadas, nem sempre é possível analisar todas elas, uma vez que existem propriedades do solo que demandam um alto custo financeiro para realização da análise e outras em que o custo da intervenção no solo (correção ou fertilização) é superior aos benefícios que a mesma pode gerar, tornando-a inviável economicamente. Portanto, deve ser considerada como prioridade a análise das características do solo que sejam possíveis de intervir, levando em conta a viabilidade operacional e econômica [3].

Ressalta-se também que a definição da quantidade de amostras necessárias para análise não é um aspecto simples, uma vez que o solo é um ambiente com características bastante divergentes, mesmo entre pontos de amostra próximos, e que essa diversidade se comporta de forma diferente para cada variável que se deseja analisar. Sabe-se que para a abordagem da Agricultura de Precisão, quanto maior o número de amostras, maior a precisão dos resultados. Felizmente, o desenvolvimento dos sistemas de mecanização e automação permitiu a criação de soluções técnicas capazes de aumentar o rendimento do processo de amostragem, tornando-o viável operacionalmente, mais rápidos e mais eficientes, mesmo para altas densidades amostrais [2, 16].

#### • Sensoriamento e sensores

Para alcançar os objetivos da Agricultura de Precisão (AP) é necessário o levantamento de uma enorme quantidade de dados que podem ser coletados por Sensoriamento Remoto (SR), sensores conectados diretamente ao solo (sensores de contato) ou adjacentes (sensores proximais), uma vez que os mesmos podem ser utilizados para mapear os mais variados parâmetros da lavoura. Tem como principal vantagem a capacidade de coletar uma quantidade de dados bem maior, se comparados aos métodos de amostragem georreferenciada e, ao mesmo tempo, permite um maior detalhamento das características da lavoura, visto que diminui os possíveis erros causados pela interpolação de amostragens menos densas. Dessa forma, a área de sensoriamento e sensores apresenta um grande potencial de desenvolvimento para os equipamentos e aplicações na AP [2, 21].

Amplamente difundido, o sensoriamento remoto ou detecção remota tem sido utilizado na agricultura há bastante tempo para avaliar as condições das culturas por meio da obtenção de imagens multiespectrais para a análise e produção de diagnósticos. Essas informações provêm da medição da radiação eletromagnética refletida da superfície terrestre ou emitida das áreas agrícolas. O processo de captura da interação eletromagnética é

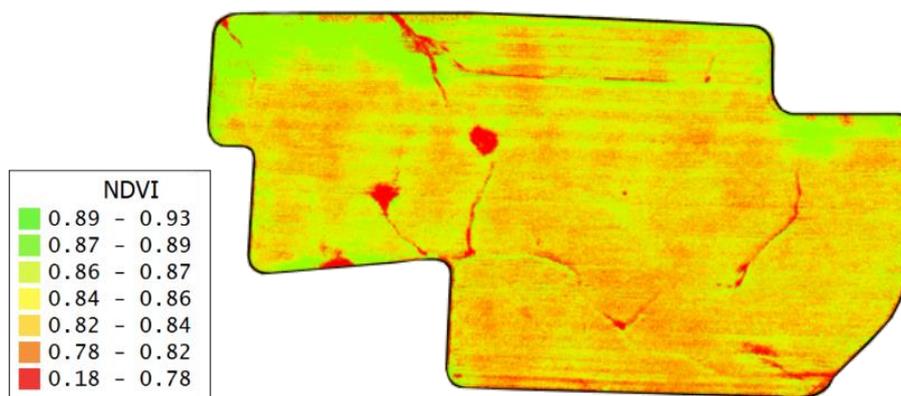
realizado por meio de sensores acoplados em satélites, aeronaves, drones ou por sensores portáteis fixados no maquinário agrícola ou carregados pelo ser humano [4].

No entanto, a qualidade dos dados coletados por sensoriamento remoto pode ser comprometida devido à influência das condições atmosféricas como a presença de nuvens ou a falta de iluminação natural. Os sensores que operam apenas quando há disponibilidade de luz solar são denominados passivos e constituem o sensoriamento óptico. Por outro lado, existem sensores que não dependem da iluminação natural, sensores ativos, podendo ser utilizados durante a noite, ou seja, produzem imagens obtidas por meio de micro-ondas [2].

Os dados obtidos por sensoriamento remoto auxiliam o processo de Agricultura de Precisão, provendo informações sobre a estimativa da área plantada e da produção agrícola, o vigor vegetativo das culturas, a análise da cobertura vegetal, etc. Dados das propriedades da refletância da cobertura vegetal em diferentes níveis de radiação NIR (região de infravermelho próximo do espectro eletromagnético) podem ser processados matematicamente para geração de diferentes índices de vegetação, como o Índice de Área Foliar (IAF), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), entre outros [3, 4, 25].

O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é uma das técnicas de sensoriamento remoto mais utilizadas na agricultura, uma vez que permite avaliar a saúde das plantações para identificar problemas na lavoura ou falhas no manejo (Figura 5). Para cada faixa de valor do NDVI é atribuída uma cor que varia do verde (bom) ao vermelho (ruim). As áreas verdes indicam plantas saudáveis, enquanto que as áreas vermelhas indicam algum tipo de problema na lavoura.

**Figura 5: Exemplo de mapeamento do índice de vegetação NDVI.**



Fonte: Adaptada de Taipale (2023) [26].

No entanto, assim como a amostragem georreferenciada descrita na seção anterior demanda maiores custos e tempo para análise, o sensoriamento remoto apresenta alguns empecilhos relativos ao custo de aquisição e processamento das imagens, entre outras dificuldades tecnológicas. Desse modo, novos sensores (de contato e proximais) são utilizados na Agricultura de Precisão, visando o levantamento de dados sobre produtividade da lavoura, propriedades do solo e cultivo.

Os sensores de contato podem coletar informações seja por meio da penetração do equipamento no solo (medidores de acidez, compactação e condutividade elétrica), como também por meio de fluxo ou impacto (medição da produtividade da área colhida). Por outro lado, os sensores proximais são de natureza óptica, pois utilizam o processamento da luz visível ou infravermelha, emitida ou refletida, pelo objeto analisado, interagindo com o alvo sem contato direto. Os sensores ópticos são utilizados para medir o grau de desenvolvimento da cultura, fornecendo informações sobre índice de vegetação, índice de clorofila, teor de nitrogênio, etc. [21].

Essas informações facilitam o diagnóstico preciso para uma melhor tomada de decisão no manejo agrícola, ou seja, quanto maior a quantidade e qualidade dos sensores utilizados e o volume de informações coletadas para análise da ferramenta SIG, maior será a precisão no manejo e, conseqüentemente, maior o rendimento da produção. Destaca-se também o desenvolvimento de tecnologias que utilizam sensores ópticos em pulverizadores autônomos que fazem a leitura, interpretação, recomendação e aplicação de fertilizantes à taxa variável com base na refletância das plantas em tempo real [16, 25].

• **Tecnologias de aplicação diferenciada**

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de manejo e gestão que considera a variabilidade espacial e temporal das lavouras em todos os seus aspectos: produtividade da cultura, características do solo (propriedades físicas, biológicas, químicas, etc.), plantio / semeadura, infestação de pragas, doenças e plantas invasoras. Essa abordagem provê a realização de intervenções sítio-específicas, ou seja, a aplicação diferenciada (ou à taxa variável) de insumos agrícolas (corretivos, fertilizantes, sementes, defensivos, água e outros), com o objetivo potencial de possibilitar maior produtividade e menos impactos ambientais, por meio da utilização mais racional dos fatores agrícolas ao aplicá-los no momento, local e quantidade adequados [4, 16].

Desse modo, o sucesso do sistema de manejo da Agricultura de Precisão depende essencialmente dos dados e informações coletados ao longo de toda a cadeia de produção, por meio das tecnologias e sistemas de suporte discutidos nas seções anteriores. No entanto, para completar o ciclo da AP, são necessárias ferramentas e tecnologias que viabilizem a aplicação dos fatores agrícolas, conforme os tipos de variabilidade identificada. Assim, os sistemas de Variable Rate Technology (VRT) ou Variable Rate Application (VRA) definem um conjunto controladores especializados capazes de variar as taxas de fluxo de um produto específico ou até mesmo diferentes taxas para vários produtos simultaneamente, de acordo com a aplicação desejada no local [3, 9].

Os sistemas VRT podem ser projetados de diferentes formas, dependendo dos insumos a serem utilizados e da fonte de informações adotada para especificar as taxas de aplicação, ou seja, para cada tipo de produto deve ser elaborada uma estratégia própria de modo a garantir a precisão na aplicação. Isso significa que o tratamento diferenciado da lavoura pode ser efetuado por meio de uma abordagem preditiva (baseada nas informações disponíveis em mapas de prescrição de insumos gerados por uma ferramenta SIG) ou reativa (baseada nas informações disponibilizadas em tempo real por sensores proximais ou ópticos).

No método preditivo, a aplicação dos insumos em taxa variável considera as informações sobre o histórico de produtividade da lavoura, as análises de solo e outras informações que preveem a variabilidade e a necessidade do campo. Nesse caso, o uso de tecnologias espaciais (sistemas de posicionamento, ferramentas SIG, amostragem georreferenciada do solo e sensoriamento remoto) são fundamentais para um tratamento preciso. Assim, se uma determinada intervenção puder eliminar deficiências encontradas em áreas específicas do campo, um sistema VRT pode ser utilizado para resolver ou amenizar o problema, desde que seja viável do ponto de vista operacional e econômico [3, 13].

Por outro lado, a abordagem reativa considera o status da lavoura em determinado local e horário para realizar a aplicação de insumos em taxa variável, ou seja, as informações são fornecidas ao sistema VRT em tempo real a partir de sensores ópticos que avaliam as condições do solo ou da cultura. Os dados coletados pelos sensores são processados e enviados para o controlador VRT que realiza a aplicação automática à taxa variável do produto em tempo real.

Geralmente esse método é utilizado para aplicação de fertilizantes nitrogenados, defensivos agrícolas e gerenciamento de água. Essa abordagem não necessita de sistemas de posicionamento e podem ser utilizados os mesmos sensores empregados na coleta de dados para geração de mapas da abordagem preditiva, porém, a aplicação é feita em tempo real [13, 16].

Assim como o processo de mecanização expandiu a escala de produção no campo, a automação das máquinas agrícolas permitiu o tratamento diferenciado das áreas de cultivo por meio das tecnologias de aplicação diferenciada. Independente do método em que as informações chegam ao sistema VRT (mapas de prescrição gerados por SIG ou dados diretamente dos sensores) as informações são processadas por microcontroladores que calculam a quantidade de insumo necessário a ser aplicada em determinado local. O resultado do processamento é transmitido aos atuadores (dosadores, válvulas, bombas, etc.) que acionam ou regulam a distribuição do produto [3].

Os sistemas VRT podem ser classificados de acordo com os principais insumos utilizados na aplicação, entre os quais se destacam [2]:

- Tratamento localizado na aplicação de fertilizantes e corretivos;
- Tratamentos localizados em pulverizações;
- Tratamento localizado na semeadura;
- Tratamento localizado na irrigação.

O tratamento do solo por meio da aplicação à taxa variável de fertilizantes e corretivos é a prática mais adotada nos sistemas de Agricultura de Precisão no Brasil e no mundo, sendo mais comum a fertilização com nitrogênio (N), fósforo (P) ou potássio (K), e o calcário como corretivo de acidez do solo. Nesse caso, geralmente as aplicações recorrem à análise do solo por meio de amostragem georreferenciada e em alguns casos como aplicações de fertilizantes nitrogenados o uso de sensores ópticos em tempo real [22].

A pulverização em taxa variável é uma operação semelhante à aplicação de fertilizantes que varia o uso de defensivos agrícolas para controlar a infestação de pragas, doenças e plantas invasoras. Podem existir

diferentes formas para definir a pulverização localizada na lavoura, desde a utilização de mapas gerados por sensoriamento remoto ao uso de sensores e controladores que atuam em tempo real. Além de aumentar a produtividade da cultura, a pulverização localizada evita o desperdício de produtos químicos contaminantes, reduzindo o impacto ambiental [3].

A variação nas taxas de aplicação de sementes ou plantio segue o mesmo princípio de funcionamento das operações anteriores. A densidade de aplicação do insumo tende a variar conforme as características do solo que influenciam no desenvolvimento das plantas. Também deve ser considerado o potencial produtivo a partir da análise dos mapas de produtividade gerados por imagens de sensoriamento remoto ou sensores na colheiteiras [16].

Em relação à irrigação, existem diversos mecanismos de atuação que podem ser utilizados na Agricultura de Precisão, fornecendo água de acordo com as necessidades específicas de cada parcela do campo identificadas por meio da variabilidade espacial e temporal da lavoura. Nesse caso, é necessária a integração de informações de diferentes fontes referentes ao solo, às plantas e ao clima da região [12].

Por fim, os sistemas VRT para aplicação de insumos em taxa variável podem ser utilizados em qualquer operação no campo em que a distribuição dos fatores agrícolas em taxas específicas segundo as necessidades de cada local produza um impacto sobre a produtividade da lavoura, reduzindo os custos de produção e minimizando os prejuízos ao meio ambiente. Ressalta-se que o fator determinante para a adoção de sistemas de aplicação à taxa variável é a presença de variabilidade espacial ou temporal nas propriedades do solo, nas características das plantações e na produtividade da cultura. Sendo assim, caso não existam grandes variabilidades espaciais a serem tratadas, os resultados da adoção das práticas de Agricultura de Precisão pode ser nulo ou até mesmo apresentar um retorno econômico negativo.

### **III. Resultados e Discussão**

A Agricultura de Precisão (AP), delineada na revisão de literatura, é uma abordagem transformadora que responde às demandas crescentes da agricultura contemporânea. Ao considerar a variabilidade espacial e temporal das lavouras, a AP visa otimizar o uso de insumos, promovendo eficiência e sustentabilidade. Neste capítulo, aprofundamos as análises apresentadas nos capítulos anteriores, explorando implicações, desafios e perspectivas futuras da Agricultura de Precisão.

A evolução da agricultura ao longo das décadas é evidente, culminando na emergência da Agricultura de Precisão. Essa transformação reflete não apenas avanços tecnológicos, mas uma mudança fundamental na abordagem agrícola. A AP surge como resposta à necessidade de personalização das práticas, reconhecendo a heterogeneidade dos sistemas agrícolas modernos.

Exploramos o Modelo da Agricultura de Precisão, destacando seus aspectos históricos e fundamentos. A definição clara de objetivos evidencia a busca por otimização, integrando sistemas de navegação, sensores e tecnologias de informação geográfica. A personalização torna-se a peça central, permitindo que os agricultores ajustem suas práticas de manejo de acordo com as características específicas de suas lavouras.

Os pilares da Agricultura de Precisão são fundamentados em tecnologias e sistemas de suporte. Sistemas de navegação por satélites, Sistemas de Informação Geográfica, amostragens georreferenciadas do solo e sensoriamento remoto formam uma base essencial. A integração dessas tecnologias capacita a tomada de decisões informadas, impulsionando a eficiência e a sustentabilidade.

A aplicação diferenciada, realizada por meio de sistemas de Variable Rate Technology (VRT), representa o ápice da Agricultura de Precisão. A flexibilidade oferecida por abordagens preditivas e reativas destaca a versatilidade da VRT. A adaptação das taxas de aplicação de insumos conforme a variabilidade espacial e temporal redefine o paradigma do uso de recursos na agricultura.

A adoção da Agricultura de Precisão não é isenta de desafios. Questões econômicas, acessibilidade e considerações éticas emergem como áreas críticas de reflexão. O equilíbrio entre os benefícios e desafios é essencial para garantir a sustentabilidade e aceitação generalizada da AP.

Projetar o futuro da Agricultura de Precisão requer uma análise prospectiva. A evolução de métodos preditivos, aprimoramento tecnológico e formulação de políticas são elementos-chave. Comprometimento contínuo com pesquisa e desenvolvimento é crucial para consolidar a AP como uma ferramenta indispensável na agricultura moderna.

### **IV. Considerações Finais**

Este artigo buscou proporcionar uma visão abrangente da Agricultura de Precisão, destacando sua evolução histórica, fundamentos, tecnologias e aplicações práticas. A transformação da agricultura convencional para a Agricultura de Precisão é um testemunho do compromisso em enfrentar os desafios contemporâneos, impulsionando a eficiência e a sustentabilidade.

Refletindo sobre a discussão apresentada, destacamos a importância da personalização nas práticas agrícolas, com ênfase na variabilidade espacial e temporal. A integração de sistemas tecnológicos avançados,

como VRT, sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica, demonstra o potencial transformador da Agricultura de Precisão.

Reconhecemos os desafios inerentes à adoção generalizada da Agricultura de Precisão, incluindo considerações econômicas, acessibilidade e questões éticas. O equilíbrio cuidadoso entre os benefícios econômicos e ambientais e os desafios apresenta-se como uma tarefa crítica para a aceitação ampla dessa abordagem.

Olhando para o futuro, delineamos perspectivas que incluem avanços contínuos em tecnologias preditivas, pesquisa interdisciplinar e políticas facilitadoras. Recomendamos um compromisso contínuo com a inovação e a pesquisa colaborativa para impulsionar a Agricultura de Precisão em direção a uma adoção mais ampla e eficaz.

Em conclusão, a Agricultura de Precisão emerge como uma resposta inteligente aos desafios enfrentados pela agricultura moderna. Seu potencial para transformar a gestão agrícola, promovendo eficiência e sustentabilidade, destaca-se como um catalisador para o progresso na produção de alimentos. A integração de práticas personalizadas, suportadas por tecnologias avançadas, posiciona a Agricultura de Precisão como um paradigma promissor para o futuro da agricultura.

### Referências

- [1]. Massruhá SMFS, Leite MAA. Agro 4.0: Rumo À Agricultura Digital. In: Lourenço MJ, Et Al. JC Na Escola Ciência, Tecnologia E Sociedade: Mobilizar O Conhecimento Para Alimentar O Brasil. 2. Ed. São Paulo: Centro Paula Souza; 2017. P. 28–35.
- [2]. Molin JP, Amaral LR, Colaço AF. Agricultura De Precisão. 1. Ed. São Paulo: Oficina De Textos; 2015.
- [3]. Coelho JPC, Silva JRM. Agricultura De Precisão. Lisboa: AJAP; 2009.
- [4]. Bassoi LH, Et Al. Agricultura De Precisão E Agricultura Digital. Revista Digital De Tecnologias Cognitivas. 2019; 1(20): 17–36.
- [5]. Prado H. Precisão Na Agricultura. Revista Fonte: Tecnologia Da Informação Na Gestão Pública. 2018; 15(20): 46–48.
- [6]. Altieri MA, Nicholls CI. Agroecology Scaling Up For Food Sovereignty And Resiliency. Sustainable Agriculture Reviews. 2012; 11(1): 1–29.
- [7]. Vasconcelos M. A Era Da Agricultura 4.0. Revista Fonte: Tecnologia Da Informação Na Gestão Pública. 2018; 15(20): 46–48.
- [8]. National Research Council. Precision Agriculture In The 21st Century: Geospatial And Information Technologies In Crop Management. Washington: The National Academies Press; 1997.
- [9]. Pires JLF, Cunha GR, Pasinato A, França S, Rambo L. Discutindo Agricultura De Precisão – Aspectos Gerais. Passo Fundo: Embrapa Trigo; 2004.
- [10]. Santi AL, Giotto E, Sebem E, Amado TJC. Agricultura De Precisão No Rio Grande Do Sul. Santa Maria: CESPOL; 2016.
- [11]. Linsley CM, Bauer FC. Test Your Soil For Acidity. University Of Illinois. Agricultural Experiment Station. Circular N. 346; 1929.
- [12]. Inamasu RY, Bernardi ACC. Agricultura De Precisão. In: Bernardi ACC, Et Al. Agricultura De Precisão: Resultados De Um Novo Olhar. Brasília: Embrapa; 2014. P. 21–33.
- [13]. Gebbers R, Adamchuk VI. Precision Agriculture And Food Security. Science. 2010; 327(5967): 828–831.
- [14]. Nunes JLS. Agricultura De Precisão. Agrolink. <http://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agriculturaprecisao.aspx>. Acessado Em: 09 Julho 2023.
- [15]. Kagami, F, Costa G, Souza H, Thame P. Ciclo Da Agricultura De Precisão. Pompéia: Fatec; 2013.
- [16]. Brasil. Ministério Da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. Agricultura De Precisão: Boletim Técnico. Brasília: MAPA/ACS; 2013.
- [17]. Repeke D, Paulo L, Francisco R, Vinicius M. Ciclo Da Agricultura De Precisão. Pompéia: Fatec; 2013.
- [18]. Monico JFG. Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos E Aplicações. São Paulo: Editora UNESP; 2000.
- [19]. Braga R. Condução De Tratores E Máquinas Agrícolas Por GPS. In: Coelho JPC, Silva JRM. Agricultura De Precisão. Lisboa: AJAP; 2009. P. 34–53.
- [20]. Filippini Alba JM. Modelagem SIG Em Agricultura De Precisão: Conceitos, Revisão E Aplicações. In: Bernardi ACC, Et Al. Agricultura De Precisão: Resultados De Um Novo Olhar. Brasília: Embrapa; 2014. P. 84–96.
- [21]. Grego CR, Oliveira RP, Vieira SR. Geoestatística Aplicada A Agricultura De Precisão. In: Bernardi ACC, Et Al. Agricultura De Precisão: Resultados De Um Novo Olhar. Brasília: Embrapa; 2014. P. 74–83.
- [22]. Amado TJC, Et Al. Projeto Aquarius: 15 Anos De Pioneirismo Em Agricultura De Precisão No Sul Do Brasil. Santa Maria: Universidade Federal De Santa Maria; 2016.
- [23]. Trevisan RG, Molin JP. Sistemas De Informação Geográfica (SIG) Para Agricultura De Precisão. Piracicaba: USP; 2014.
- [24]. Flores CA, Filippini Alba JM. A Pedologia E A Agricultura De Precisão. In: Bernardi ACC, Et Al. Agricultura De Precisão: Resultados De Um Novo Olhar. Brasília: Embrapa; 2014. P. 36–47.
- [25]. Shiratsuchi LS, Et Al. Sensoriamento Remoto: Conceitos Básicos E Aplicações Na Agricultura De Precisão. In: Bernardi ACC, Et Al. Agricultura De Precisão: Resultados De Um Novo Olhar. Brasília: Embrapa; 2014. P. 58–73.
- [26]. Taipale E. NDVI And Your Farm: Understanding NDVI For Plant Health Insights. Agriculture XPRT. Disponível Em: <https://www.agriculture-xprt.com>. Acessado Em: 20 De Julho De 2023.