

APOIO À DECISÃO NA ADOÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO

A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônômico

Ronaldo Pereira de Oliveira¹

Resumo: Esta revisão ilustra e divulga soluções que buscam ratificar a presente carência de ferramentas simples para apoio à decisão nos processos de adoção da agricultura de precisão para. O texto introduz o contexto das limitações inerentes ao desenvolvimento de sistemas compartilhados, acessíveis, interativos e interoperáveis, visando a integração de conhecimentos científicos e tácitos. O estado da arte e a discretização das tecnologias habilitadoras referem-se aos métodos desenvolvidos com um acervo de dados históricos, abrangentes, distribuídos e diversificados (i.e.: 10 safras, 128 talhões, 12 culturas de grãos, três regiões agroclimáticas e 4 tecnologias de monitoramento intensivo). Os métodos desenvolvidos na realidade Australiana encontram-se agora em fase de validação e calibração nas diferentes realidades da produção brasileira. Resultados preliminares validam a robustez matemática dos métodos, indicam as adaptações necessárias aos diferentes sistemas de produção, e por fim refletem recentes esforços da Rede de Agricultura de Precisão, da Embrapa, que agora dispõem de um repositório de dados das duas últimas safras, em 17 talhões, 9 culturas e 3 tecnologias de monitoramento intensivo. A contribuição das ações de pesquisa sumarizadas abrangem a visão integrada de conhecimentos computacionais e agrônômicos, permitindo considerações sobre diversos aspectos do desenvolvimento sistemático e evolutivos das tecnologias.

Palavras-chave: Variação Espacial. Zona de Manejo. Geoestatística. Apoio à Decisão.

¹ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. Doutor em Agricultura de Precisão. ronaldo.oliveira@embrapa.br

DECISION SUPPORT ON THE ADOPTION OF PRECISION AGRICULTURE

Information Technology towards Agronomic Knowledge

Abstract: This review introduces solutions to overcome present gaps on the development of simple models to support decision on the adoption of precision agriculture. It introduces the context of limitations to develop interactive, accessible, and shared systems aiming the integration of scientific and tacit knowledge. The state of art and the detailed description of enabling technologies refer to methods that were developed with a wide spread, distributed and diversified historical-dataset (i.e.: 10 seasons, 128 paddocks, 12 grain crops, 3 agroclimatic regions, and 4 intensive monitoring technologies). Methods develop in Australia have now been applied for validation and calibration to different crop production systems in Brazil. Preliminary results have proved robust and stable mathematical computations on different crop and perennial Brazilian production systems, besides to indicate required adjustments for some specific production management systems. In closing, the outcomes have also shown profitable returns from recent initiatives in the Embrapa Precision Agriculture Research Network. Already providing a shared data repository with registers from two seasons, on 17 paddocks, 9 agricultural production systems, and 3 intensive monitoring technologies.

Keywords: Spatial Variability. Management Zones. Geostatistics. Decision Support.

1 INTRODUÇÃO

Vários setores da produção agrícola brasileira têm se destacado no cenário nacional e internacional pelo rápido crescimento econômico impulsionado pelo manejo localizado em áreas de cultivo antes tratadas uniformemente. A busca por uma abordagem de manejo mais eficiente na produção nacional acompanha uma tendência mundial da adoção de tecnologias incorporadas aos processos de apoio à decisão na adoção do manejo por sítio-específico, visando o aumento da produtividade, a melhor da qualificação do produto e a redução de impactos ambientais negativos (MCBRATNEY et al., 2005). Entretanto, limitações ao amplo acesso da tecnologia recaem em parte no descompasso entre o avanço da mecatrônica de campo e a carência de ferramentas compartilhadas de apoio à decisão.

Com o objetivo de ilustrar e divulgar as reais condições e as iniciativas voltadas a equilibrar as atuais limitações da tecnologia, esta revisão busca introduzir, atualizar e discretizar os componentes metodológicos para apoio aos processos de tomada de decisão na adoção da Agricultura de Precisão (AP). O estado da arte, as tecnologias habilitadoras e os métodos de referência introduzidos referem-se a pesquisa de soluções de apoio à adoção da AP desenvolvida com um acervo histórico (i.e.: 10 safras, 128 talhões, 12 culturas de grãos e 4 tecnologias de monitoramento intensivo). Considerando três regiões agroclimatológicas da Austrália, os métodos desenvolvidos encontram-se em fase de calibração as diferentes realidades da produção agrícola brasileira. A difusão e a adoção destes métodos têm sido lenta devido a indisponibilidade de um acervo sistematizado de dados espaçotemporais no Brasil. Na realidade australiana é consenso que o processo de adoção da AP é gradual e customizado, requerendo no mínimo de três safras para o pleno entendimento da variabilidade do talhão Os resultados das primeiras adaptações dos métodos no Brasil refletem os esforços da Rede de Agricultura de Precisão, da Embrapa, que agora dispõem de um repositório com dados gerados nas duas últimas safras, em 17 talhões, 9 culturas e três tecnologias de monitoramento intensivo.

O amplo e multidisciplinar embasamento da Agricultura de Precisão (AP) já foi bastante discutido e está documentada em diversas fontes, com revisões ricas em referências e discussões globais (ZHANG; WANG; WANG, 2002; MCBRATNEY et al., 2005) e nacionais, como: Austrália (COOK; BRAMLEY, 1998), Índia (MONDAL et al., 2011), Brasil (LOWENBERG-DEBOER; GRIFFIN, 2006; INAMASU; BERNARDI, 2014) e Europa (MONAGHAN, 2013). Conceitualmente a AP não é nem inovadora, nem complexa; preservando modelos agronômicos clássicos da agricultura familiar e, simultaneamente, dispondo de tecnologias inovadoras que viabiliza o manejo específico em extensas áreas de produção (RAWLINS, 1997). O fundamento comum está na constatação de que a produtividade potencial é inerentemente variável no espaço, ao ponto de que fatores preponderantes da produção podem, com frequência, variar em distâncias de apenas poucos metros (COOK; BRAMLEY, 2000; MCBRATNEY; PRINGLE, 1999). A AP é definida pelo NRC (1997) como uma estratégia de gestão que utiliza a Tecnologia da Informação (TI) para integrar dados de múltiplas fontes e apoiar as decisões relacionadas com a produção vegetal.

O que difere o gerenciamento convencional da AP é a integração de modernas tecnologias na coleta, processamento e análise de múltiplas fontes de dados em alta resolução espacial e temporal. Estas estão embasadas em soluções inovadoras de instrumentação agrícola, gestão da informação e indicadores de produção para suporte à decisão sobre o manejo mais apropriado e eficiente em cada talhão. Numa combinação sistêmica e multidisciplinar, AP envolve a tecnologia avançada e aplicada aos conceitos agronômicos e processos de gerenciamento estabelecidos (LUCHIARI et al., 2000). O processo de adoção da AP costuma ser definido em quatro etapas, sendo: a) o monitoramento intensivo; b) a geração e integração de mapas; c) a sistematização da modelagem agronômica; e d) a aplicação diferenciada de insumos; no local, momento e quantidades necessárias. A integração destas etapas viabiliza o cálculo de índices de produção que orientam quanto ao tipo de manejo mais oportuno (DE OLIVEIRA, 2009).

Espera-se que o impacto mais significativo da AP esteja na forma como o processo de adoção das tecnologias é conduzido, na maneira que as decisões de gestão incorporam a variabilidade espacial e temporal observada. O avanço destas tecnologias de campo vem ocorrendo de forma evolutiva e adaptada aos modelos agronômicos, dispondo de: sistemas de auto navegação; equipamentos para coleta contínua de dados (e.g.: sensores remotos e proximais); sistemas de geoinformação; infraestruturas de TI (e.g.: redes sem fio, serviços Web e aplicativos móveis); modelos quantitativos; e sistemas de apoio à decisão. Estas viabilizam o manejo do solo e das culturas com aplicações por taxas variadas; segundo as variações dos fatores preponderantes na produtividade (WHELAN, 1998).

Em meio a grande variedade de tecnologias e serviços disponíveis no mercado da AP, pode-se considerar que o processo de adoção adequado envolve a identificação de ferramentas eficientes e ajustadas a cada sistema de produção. Não havendo soluções padronizadas nem protocolos universais que definam validações agronômicas e/ou econométricas de cunho genérico. Pois o objetivo elementar na adoção da AP é justamente o de facilitar a capacidade de identificar e entender as causas da variabilidade, avaliando as potencialidades do manejo oportuno para cada talhão específico. Neste contexto, a escolha das ferramentas tecnológicas adequadas é uma etapa gradual e customizada, que busca a médio prazo aprimorar o manejo da variabilidade espacial da lavoura com precisão agronômica (BERNARDI et al., 2014).

Entretanto, as tecnologias habilitadoras da AP encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento e viabilidade de implantação, caracterizando um maior avanço na mecatrônica de campo em contraste com a carência de desenvolvimento de aplicativos compartilhados de análise e interpretação. A falta de soluções que possam orientar as decisões do manejo mais eficiente tem sido sugerida como potencial inibidor de uma ampla adoção das tecnologias de AP (MCBRATNEY et al., 2005).

Não existe uma definição exata sobre a disseminação da AP na agricultura brasileira. Observa-se que a forma de entendimento tem sido distinta, com grande maioria entendendo a

AP como sendo realizada por sistemas automatizados, complexos e de alto investimento. Enquanto a caracterização, interpretação e gestão personalizada das variações espaciais dos atributos da lavoura não tem sido priorizada adequadamente (INAMASU; BERNARDI, 2014). Outras dificuldades a citar referem-se: a) aos equipamentos e sensores importados que dificultam uma maior difusão e popularização em nível de propriedade rural; b) à identificação das causas e efeitos da variabilidade espacial em diferentes regiões do país, dada uma diversificada da matriz agropecuária nacional; c) a falta de modelos simplificados para apoio nas avaliações da oportunidade, da relevância e do custo associado à adoção do manejo por sítio-específico; e d) a carência ferramentas de TI adequadas as nossas condições de mão de obra tecnicada no campo.

O desenvolvimento metodológico de um sistema de apoio à adoção da AP é centrado em duas questões básicas: i) Adotar ou não a tecnologia? – resposta indicada por índices de variabilidade espacial e árvores de decisão que indicam ou não a oportunidade de adoção; e ii) Onde aplicar a tecnologia? – resposta indicada na segmentação de imagens para delineamento das zonas de manejo). Nas considerações finais do trabalho sintetiza o estado da arte, as questões de pesquisa e os aspectos positivos e negativos dos métodos abordados.

2 O ESTADO DA ARTE

Inicialmente, a AP concentrou-se no manejo por sítio-específico das culturas como uma combinação de aplicação de insumos e práticas agronômicas considerando as necessidades dos solos e plantas de acordo com as suas variações espaciais e temporais no campo (WHELAN; MCBRATNEY, 2000). Uma visão mais abrangente passou a considerar que a AP deveria permear todas as atividades agrícolas que implementam soluções de TI. Desta forma, passando a representar uma postura gerencial sustentável, que minimiza os riscos e as incertezas na tomada de decisão. Não mais apenas uma busca específica pelo aumento da produtividade e da eficiência no uso de insumos e recursos naturais (ZHANG et al., 2002). Com a rápida difusão e o barateamento das tecnologias, a AP passou a ser

entendida como uma extensão da tecnologia de interoperabilidade de dados e informações em todos os processos da cadeia produtiva.

Apesar da relativa frustração em fases iniciais de adoção, a AP ainda desperta fascínio pela tecnologia constantemente renovada e pela perspectiva de futuro sustentável que ela representa (INAMASU; BERNARDI, 2014). Parte das frustrações devem-se a uma adoção focada na automação de sistemas de navegação e da geração de mapas de atributos. A experiência adquirida na incorporação continuada da tecnologia levou ao conceito de que a AP é mais eficiente quando a coleta e o processamento de dados são integrados com as ações de manejo. Aspectos considerados na solução desta integração foram apontados por KITCHEN (2008) como sendo: a) sensores para medidas *in-situ*; b) processamento de dados e tomada de decisão em tempo real; c) integração de dados e processamentos em uma plataforma única para planejar as ações de manejo; d) sistemas de tomada de decisão interativos e transparentes para os operadores e gerentes.

O aspecto de interatividade facilitada e transparência na interação com os modelos matemáticos é frequentemente apontado entre os principais desafios da AP para oferecer ferramentas e métodos de análise mais acessíveis aos agricultores. Uma vez que os produtores precisam manter algum grau de controle nas decisões de manejo, inferindo a sua experiência tácita. É sugerido que o produtor utiliza os sistemas de apoio a decisão apenas para calibrar ou validar suas próprias teorias e modelos. Para auxiliar no desenvolvimento destas interfaces, novos padrões de TI em infraestrutura de dados e serviços móveis representam uma solução potencial, a citar: armazenamento de dados em nuvens, funcionalidades de serviços Web, redes de comunicação sem fio e aplicativos funcionais para *Smartphones*. Entretanto, Nash et al. (2009) observa um número limitado de iniciativas no desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão que sistematizem e interopere dados de fontes distintas, redes de comunicação, simulações matemáticas e soluções interativas da TI..

A falta de soluções que possam orientar a adoção do manejo mais eficiente é sugerida

como forte inibidor da ampla adoção da AP (MCBRATNEY et al., 2005). Até o presente, preponderando o controle contábil da infraestrutura das operações de campo. Estas estimativas são raramente substanciadas em termos dos benefícios da adoção tecnológica devido à dificuldade encontrada em converter as informações quantitativas das variações em métricas econômicas. Entretanto, o cálculo do real do benefício da AP ainda dependerá da formulação de critérios que permitam quantificar os impactos ambientais e sociais.

Na visão mercadológica as tecnologias da AP apresentam-se encapsuladas em soluções inovadoras de instrumentação agrícola proprietária, usualmente fechada em seus padrões. O desenvolvimento da AP nas últimas décadas abriu novas possibilidades de otimização da produção com menor impacto ambiental através da automação de campo e de modernas tecnologias de informação e comunicação. Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS) e monitores de produtividade acoplados às colhedadeiras (*Yield Sensors*) tornaram-se usuais e foram rapidamente incorporados ao setor de serviços (COX, 2002). Estas soluções potencializam a abordagem segmentada onde a alta tecnologia parece acessível para todos por intermédio pacotes tecnológicos fechados.

No Brasil a adoção da AP preserva o quadro de crescimento relativamente lento e heterogêneo registrado no início da última década (LOWENBERG-DEBOER; GRIFFIN, 2006). Fatores apontados como limitantes na época ainda perduram, como: mão de obra barata, número limitado de computadores em fazendas; altas taxas na importação de equipamentos; suporte técnico insuficiente e a baixa escala de produção na maioria das fazendas. Hoje, a maioria dos produtores ainda não teve a oportunidade de acompanhar a evolução da tecnologia (INAMASU; BERNARDI, 2014). Numa realidade de desinformação sobre as soluções em AP, torna-se prioritário a sistematização de fluxos decisórios junto ao produtor. Esta demanda agrega a necessidade de integrar a visão científica ao conhecimento tácito, buscando o ajuste fino de dados em informações como forma efetiva de suporte nos diferentes arranjos produtivos locais (DE OLIVEIRA, 2009).

A carência de suporte decisório na AP é um fator comum aos sistemas de produção de culturas anuais e perenes. As requisições de apoio estratégico são geralmente comuns aos diferentes cultivos, mas a implantação das tecnologias de AP já disponíveis impõe processos de adoção que são dependentes do nível tecnológico do manejo existente. Diferente da oportunidade de adoção na produção de grãos, as peculiaridades inerentes ao cultivo tradicional da uva sugerem que a viticultura de precisão deva ser concebida mediante um pacote tecnológico diferente e dimensionado segundo a disponibilidade de investimento.

A busca por ferramentas mais efetivas para o processo de adoção da AP justifica-se na complexidade operacional e o alto custo das intervenções de manejo diferenciado, requisitando modelos mais simples e acessíveis (MCBRATNEY et al., 2005). Por fim, é preciso integrar os conceitos agronômicos, os métodos quantitativos e a tecnologia avançada de forma mais gradativa aos processos já estabelecidos para gerenciamento operacional do campo.

3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS

A adoção de novas tecnologias desenvolvidas para o monitoramento intensivo do campo busca, entre outras aplicações, gerar a quantidade de informação suficiente para correlacionar dados mais facilmente observados com outras propriedades de difícil obtenção. Isto envolve a adoção de plataformas multissensor que permitam quantificar com precisão espacial os fatores preponderantes da produção (WHELAN, 1998). Esta quantidade e diversidade de dados viabiliza a prática adequada da AP diante do desafio de manejar a variação espacial da produtividade, a qual potencialmente reflete uma agregação da variabilidade espaço-temporal de vários fatores (MOLIN, 2012). Tecnologias complementares aos processos de monitoramento habilitam as etapas de interpolação, mapeamento e análise espacial, utilizando técnicas e métodos de geoestatística, geoinformação e modelagem quantitativa multivariada. Já a disponibilidade de diversas bibliotecas, protocolos e ferramentas livres de TI possibilitam atender a atual carência de soluções para: a modelagem e

a automação dos fluxos dos processos de adoção da AP; a interoperabilidade entre aplicativos de análise e sistemas operacionais; e o acesso facilitado, compartilhado e dinâmico das informações. Um breve resumo das principais tecnologias que permeiam as pesquisa em modelos de apoio à decisão são listados a seguir, como revisadas no escopo do artigo.

3.1 Monitoramento Intensivo

Recursos avançados da eletrônica, robótica embarcada e TI estão cada vez mais presentes no campo através da AP (NASH et al., 2009; SANTESTEBAN ET AL., 2011; MULLA, 2013). O uso de tecnologias embarcadas se caracteriza em funções específicas nas intervenções de monitoramento intensivo, feito em geral em modo contínuo e não invasivo e em tempo real. Esta instrumentação envolve: sistemas de auto navegação, sensores de produtividade, sensores óticos (i.e.: visível e infravermelho próximo) e sensores de atributos de solo. Os componentes desta plataforma de ferramentas facilitadoras e geradoras de densos acervos de dados são muitas vezes referidos na literatura internacional como sensores “*on the go*”, e possibilitam gerar observações de forma complementar as tecnologias de campo que visam a aplicação de insumos por taxas variadas.

Tradicional e amplamente difundido em suas diversas aplicações (MULLA, 2013; GOSWAMI; SAXENA; BAIRAGI, 2012, SHIRATSUCHI et al., 2014), o sensoriamento remoto vem sendo complementado por novas tecnologias de sensores proximais, também capazes de gerar dados em alta resolução espacial. Estes realizam medições por contato direto no solo (RABELLO et al., 2014), por sensores ativos de reflectância de docel (SHIRATSUCHI et al., 2014) e câmeras multispectrais embarcados em *drones* (JORGE; INAMASU, 2014). A frequência de leitura dos diferentes sensores é geralmente sincronizada com a atualização de coordenadas dos sensores de posicionamento (i.e.: um ponto por segundo), variando o número total de observações por área em função da velocidade de operação. Tipificação das diferentes tecnologias disponíveis no mercado inclui:

- Sensores de Posicionamento de Campo - permitem determinar a localização precisa

dentro do talhão e a altimetria, possibilitando a modelagem topográfica (e.g.: declividade, aspecto, área de contribuição e índice de encharcamento). São sensores de navegação global por satélites (BERALDO; SOARES, 1995), denominados de *Global Navigation Satellite System* (i.e.: GNSS) e disponíveis em diferentes escalas de precisão (e.g.: GPS, DGPS e RTK);

- Sensores de Produtividade - permitem quantificar parâmetros da produção em função da área colhida (e.g. massa, umidade, conteúdo de açúcar, óleo e proteínas). Existem vários aspectos de operação, arquitetura e precisão no desenvolvimento desses sensores (MOLIN, 2000). Atualmente os sensores de produtividade, dependendo da cultura à qual se destina, são desenvolvidos usando sistemas com transdutores piezoelétricos para pressão, sistemas ópticos, mecânicos ou que usam sensores de fluxo por infravermelho localizados no tubo pneumático ou placa de impacto instalada no elevador da colheitadeira (REYNS et al., 2002); e
- Sensores Proximais de Solo - permitem quantificar atributos do solo por medição direta (e.g.: condutividade elétrica do solo) ou indireta (e.g.: atributos correlacionados por funções de pedotransferência). Outras medidas diretas valoram atributos como: conteúdo de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, textura, umidade, nutrientes e contaminações por metais pesados. Incluem diferentes tipos de tecnologias em sensores proximais para observação de diferentes atributos de solo, sendo: espectrômetros de campo (i.e.: visível e infravermelho), condutivímetros por indução elétrica e eletromagnética (RABELLO et al., 2014), espectrômetros de Raios X, penetrógrafos digitais, gamarradiômetros e radares de penetração por permissividade elétrica.

3.2 Geoestatística

A necessidade de caracterizar a autocorrelação espacial de muitas variáveis e de mapear a estrutura espacial de suas variações relaciona a geoestatística diretamente aos

processos de adoção da AP. Um fator inerente aos dados da AP que é requisição básica da geoestatística está no registro das coordenadas individuais de cada observação. Dados georreferenciados podem ser obtidos por sistemas de navegação global por satélites (e.g.: GPS), mapas temáticos, imagens de satélite ou fotos aéreas cartograficamente registradas. Segundo Tisseyre e McBratney (2007) a possibilidade de gerar mapas relacionados à produtividade agrícola utilizando a geoestatística constitui um avanço no manejo localizado dos sistemas de produção e uma maior precisão e eficiência na tomada de decisão.

Na continuidade do processo de adoção da AP é primordial integrar, sintetizar e traduzir a massiva quantidade de dados monitorados em informações concisas e relevantes que promovam avanços no conhecimento agrônomo, operacional e gerencial no manejo diferenciado do sistema de produção. Os parâmetros descritos na geoestatística fornecem meios para o manejo por sítio-específico. Apesar dos procedimentos da análise geoestatística não diferirem conceitualmente para aplicações de diversos fins, na AP a disponibilidade de dados em alta resolução espacial viabiliza não só uma maior precisão e robustez nos resultados, como também facilita o entendimento integrado das correlações espaçotemporais entre os diferentes fatores de produção. Assim, a análise quantitativa da dependência espacial de dados gerados no monitoramento intensivo dos solos, dos parâmetros de plantas e da produtividade, pode ser facilitada pela geoestatística. Mesmo numa parcela experimental de 30 x 30 m existe grande variabilidade de propriedades físicas do solo e se for considerada como homogênea pode mascarar os resultados dos tratamentos aplicados no manejo por sítio-específico (GREGO; VIEIRA, 2005).

3.3 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

No ambiente SIG, bases georreferenciadas de dados oriundos de diversas fontes e registrados em diferentes formatos podem ser visualizadas, modeladas, analisadas e integradas a modelos de simulação matemática externos a plataforma de geoinformação. Os mapas digitais são organizados em camadas de informação nos formatos pontuais, vetoriais e

matriciais, que podem ser ordenadas, agrupadas e superpostas mediante funções da álgebra de mapas. Estas camadas de informação permitem uma análise espacial multivariada capaz de integrar covariáveis ambientais e estruturais (e.g.: imagens de satélite, mapas de relevo, hidrografia e bases de infraestrutura cartográficas) com vários fatores da produção, desde que tenham sido gerados sobre uma grade de resolução comum (i.e.: atributos de fertilidade do solo e produtividade da planta na mesma resolução espacial). Entretanto, para o uso adequado do ambiente SIG o usuário precisa ter algum conhecimento prévio sobre preceitos cartográficos e da topologia e projeção de mapas, muitas vezes requerendo a consulta a publicações de referência (STAR; ESTES, 1990).

Por suas funcionalidades de análise espacial e gerenciamento de informações georreferenciadas, os ambientes SIG estão relacionados por vários autores como uma das fases principais do processo de AP (ZHANG; WANG; WANG, 2002; GOSWAMI; SAXENA; BAIRAGI, 2012; BERRY, 2013; BRAMLEY; QUABBA, 2013). Uma descrição detalhada da relevância e da aplicação destas funcionalidades nos processos da AP é dada em FILIPPINI-ALBA (2014). No caso específico dos procedimentos de apoio à adoção da AP aqui abordados, a importação de mapas gerados em ambientes de análise geoestatística no SIG permite ao usuário uma interação visual com os resultados. Isto permite por exemplo a identificação e interpretação das regiões no talhão onde o fenômeno estudado é mais uniforme ou observar os padrões estruturais da variação da produção. Dessa forma, a utilização do SIG como instrumento complementar das técnicas de geoestatística permite a simulação de cenários que podem orientar as decisões estratégicas e operacionais em relação ao manejo diferenciado a ser adotado.

3.4 Modelos Quantitativos e Índices de Oportunidade

Soluções de apoio à decisão nas etapas iniciais de adoção da AP requisitam modelos mais simples e acessíveis (MCBRATNEY et al., 2005). Em sua maioria os modelos são frutos de investigações científicas que refletem conceitos específicos e formulações matemáticas

elaboradas, e ainda requisitam o desenvolvimento de interfaces de integração com tecnologias e fluxos de processos na adoção da AP. Alguns modelos simplificam o acesso aos parâmetros de ajuste do variograma sugerindo um índice de aleatoriedade da dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; ZIMBACK, 2001). Estes são facilmente calculados e geram indicadores semiquantitativos sobre a estrutura espacial da variação (i.e.: fraca, média e forte). Outra referência da variação típica de atributos de solo propõe variogramas médios e proporcionais que podem orientar na definição de fluxos decisórios (MCBRATNEY; PRINGLE, 1999). Modelos orientados a processar acervos de dados coletados em alta densidade sugerem um índice de oportunidade para adoção da AP para o cultivo de grãos (PRINGLE et al., 2003; OLIVEIRA, 2009). Estes índices de oportunidade sugerem fatores da magnitude de variação, da estrutura espacial da variação e da redução do impacto ambiental mediante um manejo ajustado as variações dentro do talhão. Outro índice análogo ajusta a oportunidade da operação de AP ponderando a existência de obstáculos morfológicos nas intervenções de vitivinicultura (TISSEYRE; MCBRATNEY, 2007).

3.5 Padrões e Protocolos de TI Aplicados a AP

A integração de agrotecnologias com recentes ferramentas de TI potencializa a AP como uma das formas mais eficientes e eficazes de se garantir a crescente demanda pela produção de alimentos. Entre novos padrões de desenvolvimento e protocolos de comunicação que atendem diretamente as demandas de sistematização dos processos de adoção pode-se destacar: padrões ISO para integração de equipamentos embarcados, celulares; computação ubíqua; serviços Web e aplicativos móveis (QUEIRÓS et al. 2014). A geração de massivos volumes de dados na AP tem demandado uma crescente capacidade de armazenamento e processamento que extrapola a capacidade de computadores pessoais alocados na fazenda, e traz novos desafios em pesquisas de 'Big Data', interoperabilidade, redes semânticas e automatas celulares (DE OLIVEIRA, 2009).

Outra questão da TI aplicada tange a complexidade do desenvolvimento das

ferramentas demandadas e o conseqüente custo em tempo e dinheiro, o que também consta entre as maiores barreiras na adoção da AP (MCBRATNEY et al., 2005). Com capacitação limitada na área, é previsível o desinteresse dos produtores com questões de desenvolvimento (KITCHEN et al., 2005). O fator preponderante na complexidade de desenvolvimento destas ferramentas é a falta de interoperabilidade entre ambientes de software (KITCHEN et al., 2005; NASH et al., 2009), sendo este o aspecto mais requisitado nos fluxos de dados da AP. Por também ser uma questão genérica a outros sistemas, a comunidade de geoinformação vem trabalhando questões de interoperabilidade entre diferentes softwares aplicativos e plataformas operacionais há 15 anos. Neste período, iniciativas de padronização de formatos e protocolos foram conduzidas pelo consórcio internacional *Open Geospatial Consortium, Inc. (OGC)* e no estabelecimento do padrão ISO/TC211 (NASH et al., 2009). Estes visam estabelecer bases comuns de desenvolvimentos livres via um repositório comum denominado *OpenGIS*, em particular para a transferência de dados georreferenciados via serviços por demanda (i.e.: *Web Services*) entre pontos de um sistema heterogêneo e distribuído (NASH et al., 2009). Entretanto, a iniciativa para repositório de objetos pré-configurados para AP, denominado *Open-Agri*, está pendente (NASH et al., 2009). Por fim, questões futuras ainda a serem abordadas dentro destes padrões permearão a segurança e propriedade da informação.

A Embrapa desenvolveu diversos sistemas especialistas utilizando alguns destes padrões para atender nichos específicos do agronegócio, como: o sistema de monitoramento agrometeorológico, o sistema de diagnose virtual de doenças de plantas, o sistema de previsão de safra de soja, o sistema de recomendação para adubação e o *WebAgritec* que agrega informações de pesquisa, permitindo ao usuário gerenciar uma cultura plantada segundo as melhores práticas de manejo e material genético disponível (QUEIRÓS et al., 2014).

4 MODELAGEM DO ÍNDICE DE OPORTUNIDADE DE ADOÇÃO

Condições elementares para a adoção da AP foram definidas em árvores de decisão que requisitam o desenvolvimento de indicadores quantitativos para facilitar a interpretação

da variação espacial seguindo os fluxos decisórios. Métodos preliminares para determinar o Índice de Oportunidade de adoção da AP (Oi) foram introduzidos em PRINGLE et al. (2003). Esta modelagem é parametrizada na análise variográfica e características operacionais dos equipamentos, e sua formulação revisada é sumarizada a seguir. Valores típicos foram determinados por investigações em diversas culturas, principalmente nas indústrias de grãos e vitivinicultura, utilizando sensores de produção, de CE por indução eletromagnética (EMI) e imagens aéreas multiespectrais.

Para fins da modelagem do índice de oportunidade relacionado as variações dos atributos de solo (Si), os dados originais do sensor foram transformados, formatados, organizados e interpolados segundo protocolos descritos em TAYLOR et al. (2007) para o estabelecimento de zonas de manejo diferenciado. A determinação dos valores de Si parametriza o ajuste dos variogramas modelados no pacote geoestatístico Vesper (WHELAN et al., 2001). O modelo do Oi revisado foi proposto em DE OLIVEIRA (2009), e considera dois componentes principais, sendo: a magnitude da variação e a estrutura espacial da variação. A determinação da magnitude considera a covariância média de todo o talhão subtraída pelo efeito pepita indicado no variograma de melhor ajuste, para um posterior cálculo do coeficiente de variação por unidade de área que é finalmente normatizado pela média dos valores obtidos em todas as observações. O componente relativo a estrutura espacial considera a maior distância de autocorrelação da variável e um comprimento operacional estabelecido segundo as dimensões e a velocidade de reação dos equipamentos para aplicação de taxas variadas. Em resumo, o índice de oportunidade como função da variabilidade espacial do solo (Si) é dado pela equação:

$$S_i = \sqrt{M_v \cdot S_v} = \sqrt{\sqrt{\frac{CV_A}{q_{50}(CV_A)}} \times \frac{C_D}{O_L}} \quad (1)$$

onde,

M_V - Magnitude da variação;

S_V - Estrutura espacial da variação;

CV_A - Coeficiente da variação espacial;

C_D - Maior distância de autocorrelação; e

O_L - Comprimento operacional.

Os resultados desta modelagem e suas aplicações preliminares para sistematização do índice de oportunidade estão documentados para uso com diferentes sensores (DE OLIVEIRA; WHELAN, 2008) e suas aplicações para diferentes sistemas de produção no Brasil (DE OLIVEIRA, 2009; OLIVEIRA et al., 2011; OLIVEIRA; BENITES, 2011; OLIVEIRA; BENITES, 2012; OLIVEIRA et al. 2012). Entretanto, ajustes nos parâmetros originalmente concebidos no método quando desenvolvido para a produção de grãos tecnificada precisam ser implementados e validados para sistemas de culturas perenes e as pequenas propriedades de agricultura familiar.

REFERÊNCIAS

BERALDO, P.; SOARES, S. M. **GPS: introdução e aplicações práticas**. Criciúma: 150 p, 1995.

BRAMLEY, R. G. V.; QUABBA, R. P. Opportunities for improving the management of sugarcane production through the adoption of precision agriculture: an Australian perspective. **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão**, 2012, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: SBEA, 2012. Disponível em: <http://www.cse.csiro.au/client_serv/resources/ISSCT01.pdf>. Acesso em: 7 maio 2016.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

COOK, S. E.; BRAMLEY, R. G. V. Precision agriculture — opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture** 38, 753-763, 1998.

COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability.

DE OLIVEIRA, R. P. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônomo. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 89-109, jan./jun. 2016. ISSN: 2448-0452

Comp. Electron. Agric. 36:93-111, 2002.

DE OLIVEIRA, R. P.; WHELAN, B. M. An index for evaluating crop production variability from remote and proximal sensor data. In: 14th Australian Agronomi Conference Adelaide. **Proceedings...** Gosford: The Regional Institute, 2008.

DE OLIVEIRA, R. P. Contributions towards decision support for site-specific crop management: a study of aspects influencing the development of knowledge-intensive differential management decisions. **PhD Thesis, Australian Centre of Precision Agriculture**, University of Sydney, Sydney, Australia, ID 14851, 318 pp, 2009.

FILIPPINI-ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1ed. Brasília: Embrapa, v. , p. 58-73, 2014.

GOSWAMI, S. B.; SAXENA, M. S. A.; BAIRAGI, G. D. A review: the application of remote sensing , GIS and GPS in agriculture. **International Journal of Advanced Technology and Engineering Research**, v. 2, p. 50-54, 2012.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.29(2), p. 169-177, 2005.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1ed.BrásíliA: Embrapa, v. , p. 21-33, 2014.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1ed.BrásíliA: Embrapa, v. , p. 109-134, 2014.

KITCHEN, N. R. Emerging technologies for real-time and integrated agriculture decisions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, p. 1-3, 2008.

KITCHEN, N. R., SNYDER, C. J., FRANZEN, D. W., & WIEBOLD, W. J. Educational needs of precision agriculture. **Precision Agriculture**, 3(4), 341–351, 2005.

LOWENBERG-DEBOER, J.; GRIFFIN, T. W. Potential for precision agriculture adoption in Brazil. In: **Site Specific Management Center Newsletter**, Purdue University, p. 3, 2006.

LUCHIARI, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A.; PAYTON, S. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: **Proceedings of the 5th International Conference of the ASA**, Madison, WI, 2000.

DE OLIVEIRA, R. P. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônômico. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 89-109, jan./jun. 2016. ISSN: 2448-0452

- MCBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.1, n. 2, p. 219-236, 1999.
- MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 7-23, Feb. 2005.
- MONAGHAN, J. M.; DACCACHE, A.; VICKERS, L. H.; HESS, M.T.; WEATHERHEAD, E. K.; GROVE, I. G.; KNOX, J. More 'crop per drop': constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Vol. 93-5, p. 977-98, 2013.
- MONDALL, P.; BASU, M.; BHADORIA, P. B. S. Critical Review of Precision Agriculture Technologies and Its Scope of Adoption in India. **American Journal of Experimental Agriculture** 1(3): 49-68, 2011.
- NASH, E.KORDUAN, P.; BILL, R. Applications of open geospatial web services in precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, Vol. 10, 546-560, 2009.
- NASH, E.; BOBERT, J.; WENKEL, K. O.; MIRSCHEL, W.; WIELAND, R. Geocomputing made simple: Service-chain based automated geoprocessing for precision agriculture. In U. Demsar (Ed.), **Proceedings of the 9th international conference on geocomputation**, National University of Ireland, Maynooth. 2007. Disponível em: <<http://ncg.nuim.ie/geocomputation/sessions/2A/2A1.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2015.
- NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Information Systems and Research Opportunities Committee on Assessing Crop Yield: Site-Specific Farming. **Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management**, National Academy Press, Washington, D.C.168 p, 1997.
- PRINGLE, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; TAYLOR, J. A. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using a yield monitor. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 1, p. 273-292, 2003.
- QUEIRÓS, R. L.; Ariovaldo Luchiani Junior*2, NETO, J. C.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; INAMASU, R. Y.; SPERANZA, E. A.; EVANGELISTA, S. R. M. Análise das possibilidades e tendências do uso das tecnologias da informação e comunicação em Agricultura de Precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1ed.Brasília: Embrapa, v. , p. 97-108, 2014.
- RABELLO, L. M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1ed.Brasília: Embrapa, v. , p. 48-57, 2014.
- DE OLIVEIRA, R. P. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônomo. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 89-109, jan./jun. 2016. ISSN: 2448-0452

RAWLINS, S. L. Precision agriculture: The state of the art and lessons from overseas for the Australian sugar industry. In: Bramley, R.G.V., Cook, S.E and McMahon, G.G. ed. **Precision Agriculture - What can it offer the Australian sugar industry?** Proceedings of a workshop held in Townsville, 10-12 June. CSIRO Land and Water, Townsville, 25-33, 1997.

OLIVEIRA, R. P.; BERNARDI, A. C. C.; RABELLO, L. M. A oportunidade de manejo por sítio-específico indicada na variação espacial da condutividade elétrica aparente do solo. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 55-59, 2011.

OLIVEIRA, R. P.; BENITES, V. M. Variabilidade do solo como indicador da oportunidade da agricultura de precisão em sistema de plantio direto. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 194-200, 2011.

OLIVEIRA, R. P.; BENITES, V. M. Índices de variabilidade espacial do solo em apoio ao manejo eficiente de fertilizantes em sistema de plantio direto no cerrado. In: **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão**, 2012, Ribeirão Preto. Anais... 2012.

OLIVEIRA, R. P.; BERNARDI, A. C. C.; RABELLO, L. M.; INAMASSU, R. Y. Spatial variability index based on soil properties for no-till and pasture site specific management in Brazil. In: **Proceedings of the International Conference for Precision Agriculture**, Indianápolis. 2012.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; DE OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1 ed. Brasília: Embrapa, v. , p. 58-73, 2014.

TAYLOR, J. A., McBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. (2007). Establishing management classes for broadacre grain production. **Agronomy Journal**, v.99, p.1366-1376

WHELAN, B. M. Reconciling Continuous Soil Variation and Crop Yield - a study of some implications of within field variability for site-specific crop management. **PhD Thesis**, University of Sydney, Australia 356 p, 1998.

WHELAN, B. M. e McBRATNEY A. B. The null hypothesis of precision agriculture management. **Precision Agriculture**, v.2, p. 265-279, 2000.

WHELAN, B. M., McBRATNEY, A. B., MINASNY, B. Vesper - Spatial Prediction Software for Precision Agriculture. In: G. Grenier & S. Blackmore (Eds.) ECPA 2001, **Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture**, Montpellier, p. 139-144, 2001.

DE OLIVEIRA, R. P. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônomo. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 89-109, jan./jun. 2016. ISSN: 2448-0452



ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture: a worldwide overview.
Computers and Electronics in Agriculture, v. 36, p. 113-132, 2002.

ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. **Tese (Livre-Docência)** - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 114 p., 2001.

DE OLIVEIRA, R. P. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agronômico. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 89-109, jan./jun. 2016. ISSN: 2448-0452