

Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações

José Maria Filippini Alba*¹

¹Pesquisador, Laboratório de Planejamento Ambiental, Embrapa Clima Temperado

*E-mail: jose.filippini@embrapa.br

Resumo: Vários autores reconhecem a importância dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a Agricultura de Precisão (AP). No entanto, as referências consultadas demonstram que essa ferramenta ainda não é utilizada no seu máximo potencial. As limitações relacionam-se à forma preferencial de interpretação das informações em agricultura, à ausência de bases de dados consistentes em AP ou à carência de modelos de integração. Há forte direcionamento para a análise da variabilidade espacial via métodos geoestatísticos e interpolação por krigagem, mas prefere-se a integração pontual, considerando métodos multivariados e não por fusão de camadas de informação no SIG (modelagem SIG). Vários autores mencionam o conceito de “SIG específico para AP” (FIS) como ferramenta flexível para manuseio de dados, simples e barata. De maneira a expor o potencial da técnica, apresentam-se exemplos de aplicações de modelagem SIG por meio de fusão de dados considerando-se as lógicas booleana e fuzzy. Os mesmos parecem adequados para ajuste da relação fertilidade e produtividade, porém outras aplicações podem ser desenvolvidas, dependendo da base de dados disponível. Considera-se que aplicações em SIG no contexto da AP poderão aumentar expressivamente, em quantidade e qualidade, num futuro próximo.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, AP, Geotecnologias, Geoprocessamento, SIG, Sistemas de informação geográfica.

GIS Modeling in Precision Agriculture: concepts, review and applications

Several authors recognize the importance of Geographic Information Systems (GIS) for Precision Agriculture (PA). However, the consulted references demonstrate that the tool is not used with full potential. Limitations are related to the preferred way of interpreting the information in agriculture, to the absence of consistent databases or due to the lack of integration models. Spatial variability of data is usually processed by geostatistic and kriging, but integration is performed point to point, considering multivariate methods, and not by fusion of information layers in GIS (GIS modeling). Several authors mentioned the concept of “Specific GIS for PA” (FIS) as a flexible tool for data handling, simple and inexpensive. Thus, examples of applications by modeling with GIS are exposed considering boolean logic and fuzzy logic. The examples seem appropriate to adjust the ratio between productivity and fertility, but other applications can be developed, depending on the available database. GIS applications will increase significantly in the PA context in the near future, since a quantitative and quality perspective.

Precision Agriculture, PA, Geotechnologies, Geoprocessing, GIS, Geographic information system.

1. Conceituação sobre Sistemas de Informação Geográfica e Agricultura de Precisão

O sistema de posicionamento orientado por satélites (SPOS) do USA, o “Global positioning satellite” (GPS), possui uma estreita relação com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e com a Agricultura de Precisão (AP), que foi incrementada na década de 90 (GOSWAMI; SAXENA; BAIRAGI, 2012; BERRY, 2013). Os SPOS usam receptores apoiados por satélites, que monitoram a Terra, de maneira contínua, permitindo a localização espacial de um ponto na superfície terrestre de forma precisa. Bonham-Carter (1994) define os sistemas de informação geográfica (SIG) como “sistemas computacionais que gerenciam dados espaciais”, isto é, dados georreferenciados, dados vinculados a um sistema de coordenadas geográficas.

Para Inamasu et al. (2011) a AP define-se como “a postura gerencial que considera a variabilidade espacial da lavoura para maximizar o retorno econômico e minimizar os prejuízos ambientais”. Procedimentos, aplicativos e equipamentos relacionados a SIG, SPOS, banco de dados e sistemas de sensoriamento remoto são geotecnologias. Paralelamente, o SIG está relacionado ao gerenciamento de informações, à análise da variabilidade espacial e a aplicações diversas (Agronomia, Engenharia, meio ambiente, etc.), por isso vários autores o consideram como uma das fases principais do processo de AP (ZHANG; WANG; WANG, 2002; GOSWAMI; SAXENA; BAIRAGI, 2012; BERRY, 2013; BRAMLEY; QUABBA, 2013).

Em um SIG, o mundo real é estruturado segundo níveis de informação digitais (modelo numérico), ajustados a um sistema único de coordenadas, permitindo sua integração por meio de algoritmos lógicos, estatísticos e matemáticos. O processo pode ser comparado com o de sobreposição de mapas em material transparente, para visualização simultânea, como era realizado antigamente. A vantagem do sistema digital é a facilidade de modificar os níveis de informação ou integrar vários deles, de maneira a produzir novas modelagens e simulações, isto é, produzir novas informações, de onde surge a expressão “modelagem SIG”.

O sensoriamento remoto trata de medições à distância, ou seja, sem contato físico entre o alvo e o sensor, envolvendo o estudo da interação da radiação eletromagnética com os objetos terrestres. O processamento digital de imagens (CROSTA, 1993) envolve aplicativos que processam arquivos do tipo *raster*, ou seja, definidos segundo formato de matriz (malha regular), como imagens orbitais. Algumas das funções dos aplicativos de processamento digital também são utilizadas por SIGs. Por outro lado, um SIG representa o ambiente ideal para gerenciar e integrar qualquer tipo de informação relacionada com geoprocessamento, inclusive imagens orbitais, no entanto o sistema é menos eficiente no processamento digital delas (JENSEN, 1996).

Sintetizando os conceitos de Filippini-Alba, Berny e Costa (2009), as principais funções de um SIG são: (1) banco de dados geográfico; (2) procedimentos de interpolação, que incluem a Teoria das Variáveis Regionalizadas, também conhecida como Geoestatística (MATHERON, 1963); (3) funções de extração por condição, por seleção ou por recorte (janela), proximidade (*buffers*) e integração (união, dissolução, intersecção...); (4) métodos de classificação. As funções (1) e (2) representam o início de todo projeto de SIG como é exposto por Shiratsuchi, Sano e Bezerra (2005) como suporte a ações em AP, e inclui o levantamento de dados a campo, via SPOS. Modelagens complexas podem ser obtidas incorporando-se as funções de tipo (3) e (4), como apresentado, em escala regional, por Filippini-Alba e Souza Filho (2010) para avaliação ambiental, e por Filippini-Alba et al. (2010) em relação ao zoneamento edafoclimático de espécies florestais.

A análise da variabilidade espacial e o processamento digital de imagens, procedimentos extremamente importantes no contexto de geoprocessamento e SIG, são em geral executados de maneira mais eficiente por aplicativos específicos e não serão considerados, pois foram discutidos em outros capítulos do presente livro. Por isso, iniciou-se com um marco conceitual sobre geotecnologias e AP, sendo na sequência exposta uma revisão do tema para o período 1998-2013, finalizando-se com aplicações específicas de modelagem SIG em escala de lavoura, de caráter didático. Métodos de inteligência artificial

como as redes neurais (ASSAD; SANO, 1998) e o “Self-organizing maps” (SILVA et al., 2010), com potencial para interpretação e simulação de dados em AP, foram aplicados de forma genérica, focando estudos em escala regional, por isso não foram incluídos nesta revisão.

2. Revisão sobre SIG em AP

Zhang et al. (1999) inseriram o conceito de “field-level GIS” (FIS), que teria funcionalidades semelhantes às de um SIG comercial, porém mais específicas para AP, com menor custo e maior simplicidade. Os FIS são diferentes em quatro tipos de funções: (1) para integrar dados espaciais segundo escalas e resoluções diferentes; (2) para isolar, dividir ou integrar regiões de maneira que a análise seja simplificada no ambiente multifatorial; (3) para analisar padrões espaciais em coordenadas cartesianas ou polares (pivô-central); (4) para integrar dados de sensoriamento remoto no contexto da análise.

Conforme Earl, Thomas e Blackmore (2000), historicamente, a coleta de dados do solo e das culturas para fins de gestão tem estado na escala de lavoura, levando a volumes de dados bastante modestos para o armazenamento e processamento. A adoção de métodos de agricultura de precisão, no entanto, necessariamente envolve a coleta extensiva de dados espaciais ou necessita de estratégias de amostragem com o consequente aumento do volume de dados para serem armazenados e processados. Dependendo do método de coleta de dados escolhido, este aumento pode ser dramático, e em consequência nenhum registro, tratamento ou armazenamento poderá ser feito sem meios digitais. Os autores concluem que o aumento da disponibilidade de soluções para posicionamento na lavoura, monitoramento da condição das culturas e das propriedades do solo e controle de operações de campo é uma condição necessária, mas não suficiente para o sucesso do estabelecimento da agricultura de precisão. Os dados e fluxos de informação são fundamentais para uma gestão moderna de operações de campo. Estes dados e informações surgem da diversidade de equipamentos e máquinas direcionadas para o meio rural e exigem diferentes qualidades de interpretação. Notável neste contexto é o aumento

da disponibilidade de dados temporários, durante o período de desenvolvimento da cultura, que complementam os dados de produtividade. Embora o aumento de escala e complexidade dos dados e fluxos de informação seja evidente a partir dessa discussão, os dados e informações levantados são de natureza digital, e, portanto, ligados através de posicionamento espacial e tempo de aquisição. Desta forma, não é surpreendente que a tecnologia emergente de SIG esteja fornecendo a base necessária para a integração desses dados díspares e fontes de informação para definir as decisões gerenciais. Isso sugere que o SIG possa vir a ser cada vez mais central para AP, especialmente em termos do desenvolvimento da orientação automatizada de operações de campo. Este último, finalmente, exige a plena integração de posicionamento, sistemas de controle e de detecção para permitir a orientação das máquinas e o controle das operações de campo. À luz dos recentes desenvolvimentos em tecnologia da informação, esta sinergia entre gestão e orientação agora parece possível.

Zhu et al. (2008) efetuaram simulações e modelagem SIG para fertilização com N em diversas culturas, no período 1991 - 2000 na província de Jiangsu, China. Concluíram que o manejo do N pode ser melhor descrito em escala regional por integração de modelos matemáticos por meio de SIG, permitindo a tomada de decisão para zoneamento da necessidade de N do solo e manejo agrícola do insumo em escala de província.

Avellar et al. (2002) trabalharam com produção de milho e soja por irrigação com pivô central em Sete Lagoas, MG. As zonas de manejo foram definidas por modelagem SIG considerando-se as variáveis: condutividade elétrica, fertilidade do solo com os teores de K, P e matéria orgânica (MO) e produtividade em 2000 e 2001, que foram integradas por modelagem FuzMe (classificador por k-médias).

Kai et al. (2003) consideram o SIG comercial complexo de usar, caro e sem especificidade para AP. Na China a AP está atrasada, mas foi desenvolvido um SIG para gerenciamento da agricultura em escala macro, diferente do considerado pelos autores, em escala local (Farmland GIS). Considerou-se uma área experimental de 130 hectares, com temperatura média anual de 15,5 °C, precipitações de 1.072 mm

e 2.224 horas de sol, solos neutros e aptidão para várias culturas. Foi criada uma base de dados geográfica com mapas administrativos distritais, de uso/ocupação da terra, fatores ambientais, localização, amostragem, produção, distribuição de nutrientes e manejo das culturas, sendo também incluídos atributos de clima, solos, macro e micronutrientes e planta (doenças, pesticidas, etc.), que orientaram a elaboração dos mapas de fertilidade. Gao-di et al. (2003) apresentaram trabalho semelhante considerando a cultura de arroz na China.

Para Santos et al. (2003), a AP prevê o aproveitamento da estrutura da variação espacial dos elementos do meio físico, condicionantes da produtividade agrícola, para avançar na racionalização da aplicação de insumos e abrandamento de eventuais impactos ambientais advindos de dosagem excessiva. Integraram dados de produtividade (1999/2000 e 2000/2001) por levantamento de 16 mil pontos via sensor mecânico, com o microzoneamento para a cultura de milho conforme método multivariado que considerou a lógica “fuzzy” para agrupar dados de solos. Foram trabalhadas 11 variáveis físicas do solo sendo avaliados os resultados com duas, três e quatro classes. As variáveis argila, silte e areia muito grossa foram as mais significativas segundo análise discriminante. Concluíram que: (1) a integração metodológica utilizada para separar zonas de manejo mostrou-se adequada para o reconhecimento de padrões de agrupamento nas propriedades do solo; (2) o delineamento de zonas de manejo é dinâmico, podendo ser influenciado pelo manejo anual do milho, pelas variáveis utilizadas para a segmentação e pelo regime microclimático; (3) para o milho, a mudança na direção das linhas de plantio pode alterar o número e a localização das zonas de manejo.

Satti e Jacobs (2004) desenvolveram um SIG baseado na modelagem de recursos hídricos para agricultura e gestão rural, integrando um simulador do consumo de água por culturas agrícolas (citros, batatas, samambaias e pastagens), considerando uma base de dados geográficos, incluindo dados de solos, climáticos e de uso da terra, nos condados de Alachua e Volusia, Flórida, USA. O sistema facilita a quantificação da água de irrigação para o planejamento regional em escala de fazenda permitindo avaliar estatisticamente

as condições “normais” e de seca. Além disso, fornece estimativas de retirada diária de água em escala regional, necessárias para a entrada em modelos hidrológicos superficiais e/ou subterrâneos. O estudo demonstra a capacidade do sistema para caracterizar as necessidades de irrigação nas fazendas da Flórida com base em solos espacialmente heterogêneos e dados climáticos conforme modelo aglomerado. Os resultados mostram que, embora a inclusão da heterogeneidade do solo seja importante para captar as necessidades de água em fazendas individuais, as demandas regionais de água são adequadamente capturadas, simplesmente usando-se o solo predominante de cada fazenda.

Bramley e Hamiltom (2004) compararam resultados de produtividade de uva para vinho em três vinhedos da Austrália (Coonawarra, Sunraysia e Clare), no período 1999-2003, com tamanho de 7,3; 4,5 e 3,6 hectares respectivamente. A integração dos dados para diferentes anos foi feita pela soma de mapas binários considerando-se valor nulo quando a produtividade não superou a média ou valor um, nos casos que a média foi ultrapassada. Em 1999 o vinhedo de Coonawarra foi dividido em zonas de manejo, com a correspondente coleta de uva e produção de vinhos em lotes. Os vinhos foram analisados, apresentando características sensoriais e químicas diferenciadas. Concluiu-se que existe uma relação de certa forma antagônica entre produtividade e qualidade, que muda ano a ano.

Em aplicação envolvendo GPS de dois canais com precisão centimétrica, Ramos et al. (2007) monitoraram a movimentação das oliveiras devido à erosão, em um olival na Andaluzia, Espanha. Observaram-se três características: (1) posição exata das plantas in situ durante um ano; (2) modelo digital de elevação; e (3) modelo de declividade. As plantas apresentaram pouco deslocamento variando de 2 cm até 6 cm na horizontal e também deslocamento vertical. As medidas de 3D com alta precisão permitiram gerar um modelo digital de elevação preciso e a correspondente declividade, sendo relacionadas essas informações. Assim o manejo do olival poderá ser modificado para minimizar o problema de erosão.

Conforme Wu et al. (2009) vários fatores afetam o crescimento e qualidade dos citros

(propriedades do solo, topografia, clima e manejo), muitas delas relacionadas à localização do pomar, que pode ser registrada e analisada. Além disso, a competição no mercado internacional está forçando mudanças na produção chinesa de citros. Desta forma, para aperfeiçoar a produção, devem ser conhecidas as variáveis relevantes no contexto geográfico, para uma dada condição ambiental, de acordo com a tecnologia disponível. Investigações sobre variedades de citros e aplicações foram desenvolvidas na década passada, porém a informação não foi completamente analisada. Conhece-se pouco sobre as condições de crescimento e distribuição de pomares de citros em escala regional em Chongqing, China. Assim, desenvolveu-se um SIG para monitorar as condições de desenvolvimento dos citros envolvendo posição geográfica e atributos do solo na mencionada região e se identificou o potencial de cultivo de citros em escala regional. Foram estudados 50 pomares com área acima de 12 hectares, 80% irrigados por fluxo e o resto por gotejamento. Foram gerados mapas temáticos relacionados ao modelo digital de elevação, hidrografia, rede viária, solo (pH, MO, fertilizantes, etc.), clima e uso da terra. Avaliou-se a posição dos pomares, 80% com altitude de 200-400m e 57% com declividade inferior aos 15°. A sobreposição dos dados de clima de 30 anos, pH e MO permitiu determinar a área ótima para desenvolvimento de citros, que resultou em aproximadamente um terço do território avaliado.

Fountas et al. (2009) destacaram que a AP gera grande quantidade de informação, pois existem várias tecnologias para coletar e manusear informações em escala de lavoura. A Universidade de Copenhagen, Dinamarca, criou um sistema multiusuários para atender as várias propriedades que trabalham com AP, incluindo quatro granjas onde se desenvolvem as atividades experimentais em parcelas, considerando informações digitais de limites, topografia, cadastro oficial, amostragem de campo e medidas com sensores (EM-38). A pesquisa ilustra a metodologia e os benefícios de elaborar um sistema completo de análise, desenvolvimento e gerenciamento da informação rural. A metodologia dos “sistemas soft” revelou problemas, oportunidades e requerimentos de usuários. A metodologia dos “sistemas hard” deu suporte à estrutura lógica dos dados e

a informação de fluxo. O sistema manuseia simultaneamente os dados como ensaios ou como sítios específicos, imitando parcelas. Um SIG comercial foi utilizado por meio de computadores de mão, que permitem planejamento, entrada de dados, acesso e documentação dos ensaios e operações experimentais, para os especialistas e usuários de campo. A principal restrição que limita o potencial do sistema foi a relutância dos pesquisadores para compartilhar e carregar os dados dos ensaios em função das normas de segurança e hierarquias de acesso.

Parfitt (2009) realizou análise aprimorada da variabilidade espacial em lavoura de arroz sistematizada localizada em Capão do Leão, RS, mas não utilizou métodos de integração com modelagem SIG ou análise multivariada.

Uma amostra mais significativa do que vem sendo realizado no Brasil em relação a SIG em AP pode ser extraída dos anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (CONGRESSO..., 2010, 2012), assim como de Inamasu et al. (2011). Em geral, os dados foram georreferenciados via SPOS, e organizados em SIG usando-se as funções de banco de dados. A análise espacial é realizada de maneira predominante por métodos geoestatísticos, sendo gerados os respectivos mapas em softwares específicos ou em ambiente SIG. A integração de dados é realizada de forma pontual, considerando métodos multivariados com uso da krigagem para interpolação e interpretação visual. Luchiari et al. (apud INAMASU et al., 2011, p. 60-64) definiram zonas de manejo para grãos em área irrigada por pivô central, por sobreposição de bandas coloridas extraídas de foto aérea. Bognola et al. (apud INAMASU et al., 2011, p. 227-231) usaram análise em componentes principais em SIG para avaliar zona segundo o Índice de sítio, ou seja, a altura dominante aos 15 anos, em plantio florestal no município de Rio Negrinho, SC.

Amado e Santi (2011) analisaram a agricultura do sul do Brasil com ênfase na aplicação de AP na região do planalto (latossolos). A variabilidade e fertilidade do solo, assim como mapas de produtividade em várias lavouras de cultivo de grãos, foram apresentadas e discutidas. Os dados foram expostos segundo mapas interpolados considerando também a variabilidade temporal. O conteúdo e a capacidade de tamponamento

dos nutrientes do solo, a infiltração da água e sua disponibilidade para as plantas são os fatores limitantes da produtividade. O uso da malha regular resultou útil para determinar teores críticos de nutrientes. Em geral, a aplicação segundo taxa variável de fertilizantes e calcário permitiu reduzir a quantidade de insumos utilizados em relação aos métodos convencionais. A análise dos mapas de produtividade sugeriu que nas zonas erodidas e marginais houve limitações produtivas pela compactação do solo, perda de MO, redução de infiltração da água e capacidade de retenção.

El Nahrya, Ali e El Baroudy (2011) trabalharam em área experimental irrigada com pivô central no Egito, cultivada com milho e composta por mais de 90 unidades de raio aproximado de 400 m. Uma dessas unidades foi monitorada em 2008-2009, com malha regular de amostragem de solos com 68 pontos (MO, N, P, K, CaCO₃, Fe, Mn, Cu, Zn, CE e pH) e determinada a produtividade por meio do índice de vegetação (NDVI) e a evapotranspiração, por meio de imagens temáticas Landsat. O SIG colaborou no gerenciamento da informação e na definição das zonas de manejo. Para a unidade referência, onde foi aplicada AP, 84% do comportamento foi explicado por três zonas de manejo, que se discriminaram como área baixa, onde houve acúmulo de insumos e água, a área de altitude intermediária e uma terceira um pouco mais alta com problemas de erosão eólica, com produtividade de 2,2; 1,9 e 1,6 toneladas/ha, respectivamente. Nesse caso, foi utilizada significativamente menor quantidade de micronutrientes e água, com rentabilidade quase 30% maior.

Rya et al. (2011) avaliaram 86 lavouras de arroz marrom na província de Kyoto, Japão em 2006-2007. O conteúdo de proteína no arroz foi comparado à resposta do NDVI (Razão entre a diferença e a soma da reflectância no infravermelho próximo e para a banda correspondente ao verde. O NDVI convencional usa a banda vermelha substituindo a do verde) - verde obtido por levantamento aéreo com o sensor ADS40. Esse sensor trabalha com quatro bandas (as três do visível mais a do infravermelho próximo) e resolução de 20 cm a 25 cm, sendo aplicada correção da refletância por placas de 16,2 m² in situ. Houve variabilidade espacial

no conteúdo das proteínas, sendo gerado um modelo de regressão dessa variável em função do NDVI - verde, com ajuste da regressão de 0,392 (R²) no geral e erro de 0,255%. A integração dessas informações com dados climáticos via modelagem SIG permitiu ajustar os métodos de manejo de maneira a reduzir o conteúdo de proteínas no arroz em até 27%.

Tremblay et al. (2011) aplicaram um modelo de integração com base SIG por meio da lógica “fuzzy” em função de três variáveis: capacidade elétrica do solo, índice de suficiência de nitrogênio (razão entre o NDVI da amostra e o NDVI controle, derivado de área bem fertilizada) e elevação, resultando um mapa de requerimento de nitrogênio.

Filippini-Alba, Flores e Miele (2012) consideraram o teor de argila, de MO e a saturação de bases dos solos em um vinhedo, no Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves, RS, para efetuar uma modelagem SIG simulando um microzoneamento com fusão das camadas de informação. Previamente à modelagem, foi analisada a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, resultando predominante o modelo esférico com alcance de 129 m. A mancha com aptidão preferencial se sobrepôs com um Cambissolo Háplico, viabilizando um manejo diferenciado no contexto do vinhedo, com possível agregação de valor.

Terra (2012) analisou a variabilidade espacial dos atributos de solo e planta em um pomar de pêssego em Morro Redondo, RS, aplicando um método multivariado de integração (variáveis canônicas). Os resultados permitiram sugerir duas zonas de manejo que viabilizariam um manejo diferenciado para o pomar.

Dohmen e Reh (2013) retomaram o conceito de “SIG móvel”, associado a AP, por intermédio da utilização de instrumentos de pequeno porte pelos produtores no contexto da lavoura, como fora mencionado previamente (“FIS”, op. cit.).

Arciniegas, Janssen e Rietveld (2013) discutem os resultados de uma análise empírica da eficiência de um conjunto de ferramentas para suporte à tomada de decisão em um polder ocupado principalmente com pastagem na Holanda, onde se avaliou o potencial para agricultura intensiva ou extensiva e a utilização para conservação da natureza. Trata-se de uma área recuperada do

mar com altitude de 2 m abaixo da cota zero. Foram usados mapas analógicos coloridos, um mapa digital quantitativo e um mapa digital qualitativo, que foram apresentados a um grupo de 30 acadêmicos, sendo coletados questionários, notas de observações e escores multicritério com registro em vídeo. A análise pretendia avaliar: (1) a utilidade das ferramentas; (2) a clareza do processo; (3) o impacto na decisão, com foco na qualidade da informação oferecida para o trabalho individual e colaborativo, assim como na qualidade dos mapas de uso da terra resultantes. Concluiu-se que a quantidade e qualidade da informação oferecida a cada participante (gestor) era crítica para a tomada de decisão. A ferramenta quantitativa ofereceu o panorama mais completo, mas não foi considerada a mais útil pelos participantes e não produziu os melhores resultados.

Em síntese, para construção do texto acima foram consultadas aproximadamente 30 referências, sendo considerados 8 livros ou teses e 22 artigos técnico-científicos. Metade das referências trata de gestão da informação, incluindo a função de banco de dados geográficos em SIG; a outra metade procurou a definição de zonas de manejo ou de aperfeiçoamento produtivo, envolvendo vários países e as culturas de grãos ou frutíferas. Do último grupo, mais ou menos 50%, isto é, a quarta parte do total, considerou alguma forma de integração, poucas por meio de modelagem SIG. Existe um forte direcionamento para a análise da variabilidade espacial via métodos geoestatísticos e interpolação por krigagem, mas a forma preferencial de integração é pontual, considerando-se métodos multivariados e não por fusão de camadas de informação no SIG (modelagem SIG). Vários autores mencionam o conceito de “SIG específico para AP”, denominado também FIS ou similar (ZHANG et al., 1999; FOUNTAS et al., 2009; EARL; THOMAS; BLACKMORE, 2000; KAI et al., 2003; GAO-DI et al., 2003; DOHMEN; REH, 2013), como uma ferramenta mais flexível para manuseio de dados, simples e barata. Essa tecnologia já foi introduzida no Brasil, segundo comentado por Amado e Santi (2011) e Jorge (apud INAMASU et al., 2011, p. 51-54). Nesse sentido, mostra-se interessante o ponto de vista de Fountas et al. (2009) sobre o uso de “FIS” na

lavoura, em pequena escala, porém incorporando o conceito de SIG comercial para o processamento de dados no contexto acadêmico e com maior fluxo de dados. Esses autores também destacam: “A principal restrição que limita o potencial do sistema é a relutância dos pesquisadores para compartilhar e carregar os dados dos ensaios em função das normas de segurança e as hierarquias de acesso”. Algumas aplicações mostraram avançado estágio em AP, no Brasil (SANTOS et al., 2003; AMADO; SANTI, 2011) e no exterior (BRANLEY; HAMILTON, 2004; RAMOS et al., 2007; EL NAHRYA; ALI; EL BAROUDY, 2011), porém não se utilizaram métodos de integração com fusão de dados em SIG. Isso sugere um forte potencial do método, na medida em que as bases de dados e as tecnologias associadas a AP sejam aprimoradas.

3. Exemplos de Modelagem SIG em AP

Como mencionado no fim da revisão, existem muitos trabalhos de SIG em AP para sistematização das informações, envolvendo as funções de banco de dados e interpolação, porém há uma quantidade pouco expressiva de trabalhos sobre modelagem SIG (fusão de dados). Segundo o autor, essa modalidade poderá trazer resultados significativos, principalmente quando considerados fluxos consistentes de informação. Nesta seção serão discutidos exemplos específicos considerando métodos de fusão dos dados envolvendo a lógica booleana e a lógica “fuzzy”.

A lógica booleana trabalha com mapas binários, isto é, onde somente duas condições são espacializadas, por exemplo, a ocorrência de solo sem cobertura vegetal (valor 0) e com cobertura vegetal (valor 1). Nesse sentido, Melgani e Moser (2002) destacam a complexidade de estabelecer um limiar de separação entre ambas condições. A integração das informações pode ser realizada por meio de operadores lógicos do tipo OR (união/soma) ou AND (interseção/multiplicação), como exemplificado na Tabela 1 para três variáveis. Para o operador OR são geradas quatro classes no mapa final, já o operador AND conserva a estrutura binária.

A lógica “fuzzy” abre um leque maior de possibilidades, pois as variáveis usadas podem adquirir qualquer valor entre zero e um, por exemplo, numa situação arbitrária: 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0. No entanto, a atribuição de valores poderá ser também por meio uma função matemática, dependendo do interesse do usuário. A função linear estabelece uma proporcionalidade entre as variáveis (representada e “fuzzy”), já as funções logarítmica e exponencial reduzem ou destacam a influência dos valores superiores respectivamente. Na Tabela 2 se ilustra o processo de integração de variáveis segundo a lógica “fuzzy”, que é efetivado “pixel a pixel”. Da mesma forma que no exemplo anterior, o operador AND mantém a estrutura original (agora fuzzy), já o operador OR não. Por outro lado, o operador OR

não anula situações em que uma única variável (mapa) é nula (primeiras linhas), isso resulta importante em algumas avaliações.

Abaixo são apresentados exemplos de aplicação de ambos os métodos de integração, considerando-se dados de uma área sistematizada, cultivada com arroz, localizada na Estação Terras Baixa da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS (PARFITT, 2009). Os teores de K, N total, P e MO foram interpolados por krigagem considerando o modelo de semivariograma de melhor ajuste (Tabela 3).

Para a lógica booleana, o limiar foi estabelecido por observação do histograma, sendo escolhido o teor de descarte de 60-70% da população. Valores inferiores ao limiar foram anulados e valores superiores ou iguais adquiriram o

Tabela 1. Ilustração do processo de integração de três variáveis (mapas) binárias por meio de operadores lógicos booleanos.

Variável1	Variável 2	Variável 3	Integração OR	Integração AND
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	1	2	0
1	1	1	3	1

Tabela 2. Ilustração parcial do processo de integração de três variáveis (mapas) “fuzzy” por meio de operadores lógicos.

Variável1	Variável 2	Variável 3	Integração OR	Integração AND
0	0	0	0	0
0	0	0,1	0,1	0
-	-	-	-	-
0,2	0,1	0,2	0,5	0,004
-	-	-	-	-
0,5	0,3	0,5	1,3	0,075
-	-	-	-	-
0,6	0,7	0,9	2,2	0,378
-	-	-	-	-
0,9	1	1	2,9	0,9
1	1	1	3,0	1

valor 1. A área amostrada (malha de pontos) apresenta enriquecimento em N e matéria seca e empobrecimento de K e P ao NW (Figura 1). A intersecção de áreas com teores acima do limiar (valor 1) aparece na metade SE da área de maneira predominante, sem influência do relevo a priori. Dentro da quadrícula, aproximadamente 32% da área apresenta melhor “aptidão”, sugerindo a discriminação em duas ou três zonas de manejo. Já o modelo que usa a união dos teores de K, N e P com intersecção por matéria seca gera uma maior variedade de classes para a integração, com valores de 0 a 3 (Figura 2). Observa-se que uma faixa pobre em K, cobrindo 27% da área, pode

ser incorporada ao 32% de melhor “aptidão”, pois as outras variáveis ocorrem em teores elevados.

No caso da lógica “fuzzy”, as variáveis foram transformadas pela Equação 1:

$$F = \frac{x - m}{M + m} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo F o valor da variável “fuzzy”, x o valor da variável original, m seu mínimo e M o máximo.

A lógica fuzzy mostra maior detalhamento para os mapas de teor de macronutrientes e também no mapa de integração, muito embora este fosse apresentado conforme somente seis classes (Figura 3). A área ocupada pelas classes dois a seis, se uniformizada, conduz a resultados

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas processados.

Variável	Efeito Pepita	Patamar	Alcance
K	11,7 mg dm ⁻³	100,9 mg dm ⁻³	66,1 m
N total	0,007mg ha ⁻¹	0,0024 mg ha ⁻¹	24,6 m
P	2,0 mg dm ⁻³	10,8 mg dm ⁻³	60,0 m
Matéria seca	1,3 mg ha ⁻¹	2,1 mg ha ⁻¹	54,5 m

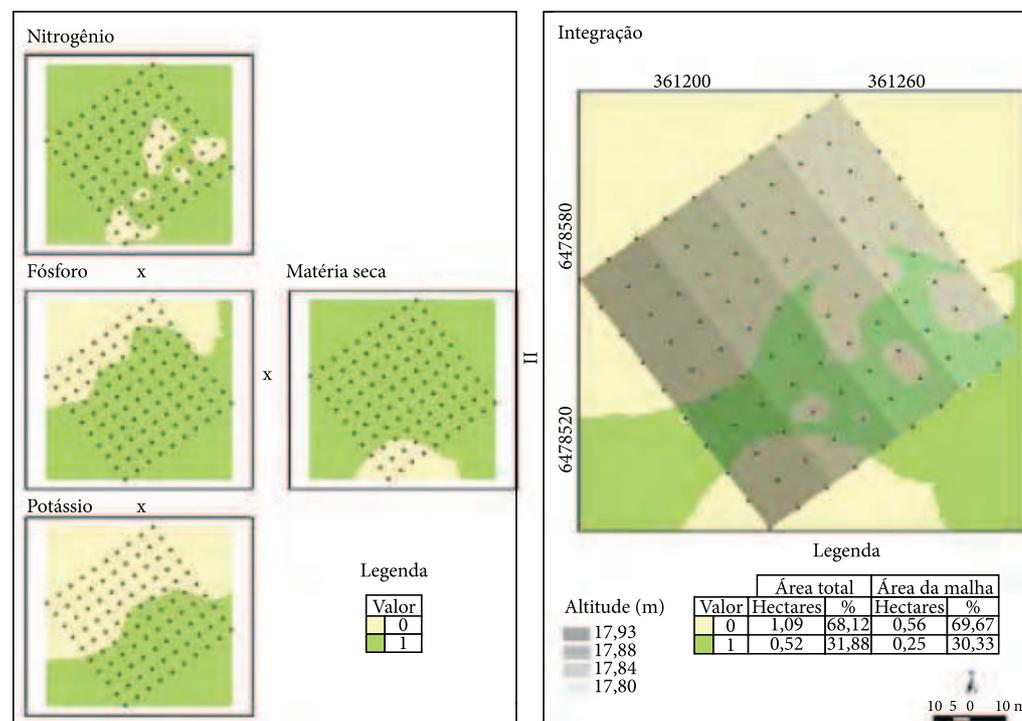


Figura 1. Exemplo de integração pela lógica booleana considerando quatro variáveis binárias fusionadas por intersecção e sobreposição do modelo digital de elevação. Malha de amostragem como referência. Fonte: Embrapa Clima Temperado e Parfitt (2009).

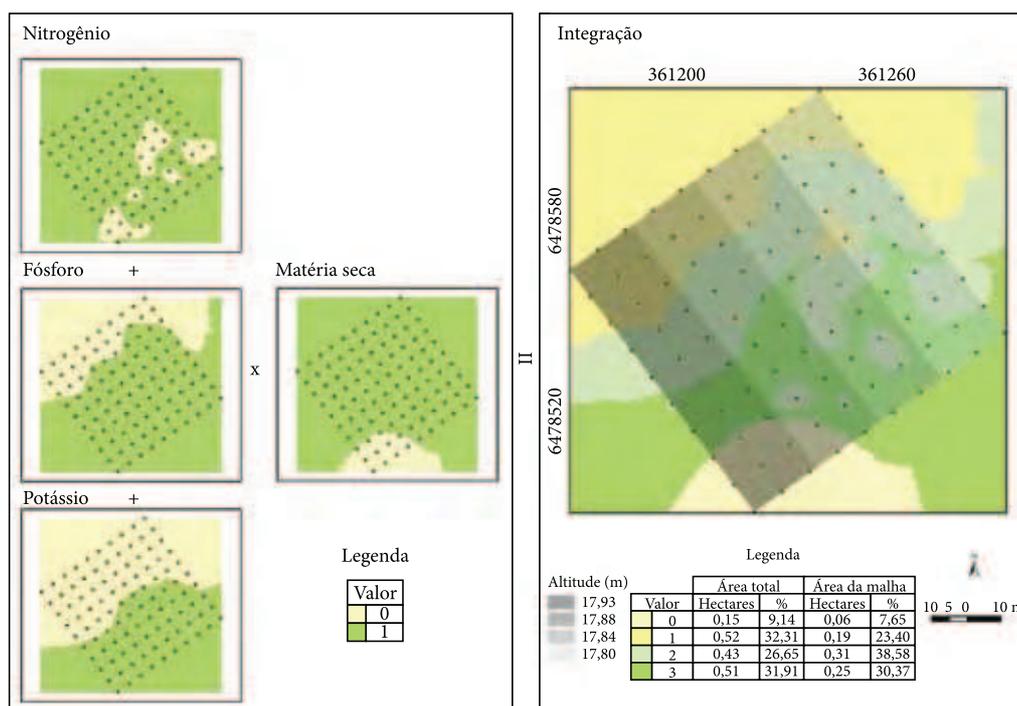


Figura 2. Exemplo de integração pela lógica booleana considerando três variáveis binárias fusionadas por união, intersecção com matéria seca e sobreposição do modelo digital de elevação. Malha de amostragem como referência. Fonte: Embrapa Clima Temperado e Parfitt (2009).

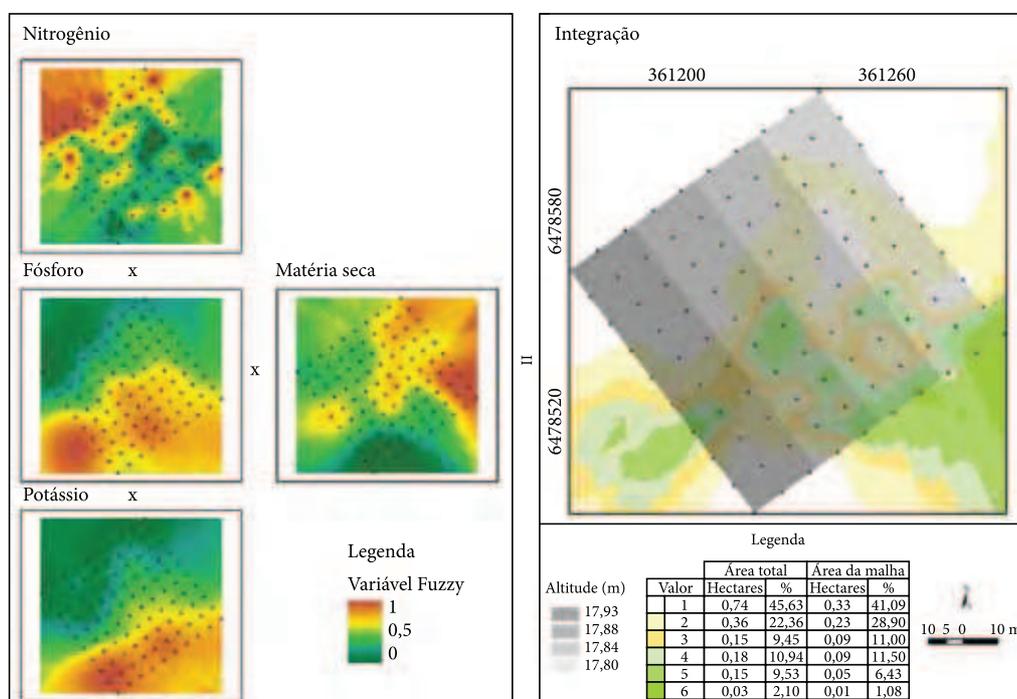


Figura 3. Exemplo de integração pela lógica “fuzzy” considerando quatro variáveis fusionadas por intersecção com discriminação de seis classes e sobreposição do modelo digital de elevação. Fonte: Embrapa Clima Temperado e Parfitt (2009).

muito semelhantes aos apresentados no exemplo anterior.

A integração dos dados, especialmente no caso da intersecção e lógica fuzzy, deve ser realizada com cautela, pois os valores intermediários correspondem a diferentes combinações entre as variáveis e podem levar a resultados inesperados. Os modelos apresentados poderão ser de utilidade para o ajuste de informações de fertilidade e produtividade, assim como para outras aplicações, que deverão ser adequadas aos dados disponíveis.

4. Considerações finais

Conforme Wu et al. (2009), o SIG tem sido usado para planejamento na agricultura, inventário do uso da terra, gerenciamento dos recursos naturais e suporte à decisão. Descartando o inventário do uso da terra, os outros tópicos estão inseridos no contexto da agricultura de precisão (AP). Quem sabe por isso, grande número de autores concorda sobre a importância do SIG para AP. No entanto, as funções de integração, um dos principais tipos de funções características desses sistemas, são pouco utilizadas ainda, como se deduz da revisão de Goswami, Saxena e Bairagi (2012) ou pelo artigo de Bramley e Quabba (2013). O SIG é principalmente utilizado para elaborar os mapas interpolados, conforme métodos geoestatísticos. Retomando-se os conceitos de Filippini-Alba, Berny e Costa (2009): banco de dados geográficos, interpolação, operações de extração /integração e métodos de classificação, representam as principais funções de um SIG. Aproximadamente metade dos trabalhos consultados procurou definir zonas de manejo ou de aprimoramento produtivo, considerando principalmente a função de base de dados do SIG, para sistematizar a informação e efetuando posteriormente a análise da variabilidade espacial (semivariogramas) e a produção de mapas por krigagem. As funções de extração/integração e classificação são pouco utilizadas, provavelmente, pela ausência de métodos de integração padronizados em agricultura, com a exceção dos zoneamentos, que trabalham em escala diferenciada quando comparada com aplicações em agricultura de precisão

(FILIPPINI-ALBA et al., 2010). Filippini-Alba, Flores e Miele (2012) tentaram uma aproximação desses métodos, com a aplicação de critérios de zoneamento via modelagem SIG em um vinhedo localizado no Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves, RS. Deve-se mencionar também que poucos trabalhos usaram métodos multivariados para interpretar os dados, o que já poderia significar um avanço em termos de integração.

Uma tecnologia que poderá contribuir para o avanço da AP é o “Fieldlevel GIS” (FIS) ou “SIG móvel” (ZHANG et al. 1999; DOHMEN; REH, 2013), que utiliza microcomputadores de mão para processar níveis de informação de maneira mais flexível, simples e econômica que no caso do SIG comercial. No entanto, Fountas et al. (2009) destacam a necessidade de utilizar ainda os últimos sistemas mencionados, principalmente quando processados maiores fluxos de informação, no domínio acadêmico e de pesquisa aplicada.

A modelagem SIG dos atributos de solo e planta conforme as lógicas booleana e “fuzzy”, apresentada na seção anterior, representa uma alternativa para avaliar as necessidades de fertilização, permitindo aprimorar o uso de insumos ou o descarte de setores improdutivo. Essas aplicações envolveram as quatro principais funções do SIG conforme comentado oportunamente. Esse processo deve ser aplicado durante vários ciclos agrícolas como recomendado por alguns autores (SANTOS et al., 2003; BRAMLEY; HAMILTON, 2004; LUCHIARI, et al. apud INAMASU et al., 2011, p. 60-64).

Finalmente destacar que a modelagem SIG permite trabalhar com foco quantitativo, na perspectiva de maior produtividade ou com visão qualitativa, isto é, para agregar valor à parte da produção, diferenciada por características específicas. Para isso, basta direcionar a modelagem em um ou outro sentido.

Sem dúvidas a modelagem SIG se apresenta como ferramenta de potencial significativo para AP, sendo necessário o desenvolvimento de procedimentos padrão de integração, o aprimoramento das bases de dados existentes e das tecnologias associadas a AP.

Agradecimentos

Aos gestores do projeto “Agricultura de precisão para a sustentabilidade de agronegócio brasileiro”, em especial ao D.Sc. Ricardo Yassushi Inamasu (líder), ao D.Sc. Alberto Carlos de Campos Bernardi (vice-líder) e ao D.Sc. Alvaro Vilela de Resende (líder do PC3) pela confiança depositada para elaboração do capítulo. À D.Sc. Lúcia Elena Coelho da Cruz pela colaboração no processamento dos dados das aplicações apresentadas e ao acadêmico Henrique Noguez da Cunha pela inserção desses dados no ambiente SIG e elaboração das figuras.

Referências

AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Using Precision Farming to overcome yield-limiting factors in southern Brazil oxisols: a case study. In: CLAY, D. E.; SHANAHAN, J. F. (Ed.). **GIS applications in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 31-60.

ARCINIEGAS, G.; JANSSEN, R.; RIETVELD, P. Effectiveness of collaborative map-based decision support tools: results of an experiment. **Environmental Modelling and Software**, v. 39, p. 159-175, 2013.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa, 1998. 434 p.

AVELLAR, G.; FRANÇA, G. E.; OLIVEIRA, A. C.; MANTOVANI, E. C. Uso de SIG'S no delineamento de zonas de manejo para uso agrícola. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. CD-ROM.

BERRY, J. **The precision farming primer**. Colorado: Basis, 1999. Disponível em: <<http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer/>>. Acesso em: 19 abr. 2013.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1994. 397 p. (Computer Methods in the Geosciences, 13).

BRAMLEY, R. G. V.; HAMILTON, R. P. Understanding variability in winegrape production systems. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 10, p. 32-45, 2004.

BRAMLEY, R. G. V.; QUABBA, R. P. **Opportunities for improving the management of sugarcane production through the adoption of precision agriculture: an Australian perspective**. Disponível em: <http://www.cse.csiro.au/client_serv/resources/ISSCT01.pdf>. Acesso em: 7 maio 2013.

CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2012, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBEA, 2010. CD-ROM.

CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBEA, 2012. CD-ROM.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1993. 170 p.

DOHMEN, B.; REH, A. **Linking GIS and “Mobile GIS” in Precision Agriculture**. Disponível em: <http://www.kolleg.loel.hs-anhalt.de/studiengaenge/mla/mla_fl/conf/pdf/conf2002/13doheng.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2013.

EARL, R.; THOMAS, G.; BLACKMORE, B. S. The potential role of GIS in autonomous field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, p. 107-120, 2000.

EL NAHRYA, A. H.; ALI, R. R.; EL BAROUDY, A. A. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 517-531, 2011.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; BERNY, V. M.; COSTA, F. A. **Geoprocessamento no contexto de empresas de pesquisa**. Pelotas: Embrapa, 2009. 44 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 254).

FILIPPINI-ALBA, J. M.; SOUZA FILHO, C. R. GIS-based environmental risk assessment in the Ribeira Valley, São Paulo, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 59, p. 1139-1147, 2010.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Modelagem espacial do solo para apoio à viticultura de precisão: Vale dos Vinhedos, Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, n. 4, p. 8-17, 2012.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; WREGE, M. S.; FLORES, C. A.; GARRASTAZU, M. C. Zoning based on climate and soil for planting eucalyptus in Southern Region of Rio Grande do Sul State, Brazil. In: PRADO, H. A.; LUIZ, A. J. B.; CHAIB FILHO, H. (Ed.). **Computational methods for agricultural research: advances and applications**. Hershey: Information Science Reference, 2010. p. 127-143.

FOUNTAS, S.; KYHN, M.; LIPCZAK JAKOBSEN, H.; WULFSOHN, D.; BLACKMORE, S.; GRIEPENTROG, H. W. A systems analysis of information system requirements for an experimental farm. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 247-261, 2009.

GAO-DI, X.; SHEN-BIN, C.; WEN-HU, Q.; YAO, L.; XING-WEI, Y.; CHENG-LIANG, L. A multidisciplinary and integrated study of rice precision farming. **Chinese Geographical Science**, v. 13, n. 1, p. 20-24, 2003.

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.

INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. 334 p.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 316 p.

KAI, A.; GAO-DI, X.; YUN-FA, L.; YU, X. Design of Farmland GIS for precision agriculture. **Chinese Geographical Science**, v. 13, n. 1, p. 20-24, 2003.

- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- MELGANI, F.; MOSER, G. Unsupervised change-detection methods for remote-sensing images. **Optical Engineering**, v. 41, p. 3288-3297, 2002.
- PARFITT, J. M. B. **Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos em solos de várzea**. 2009. 92 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2009.
- RAMOS, M. I.; GIL, A. J.; FEITO, F. R.; GARCÍA-FERRER, A. Using GPS and GIS tools to monitor olive tree movements. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 57, p. 135-148, 2007.
- RYA, C.; SUGURI, M.; IIDA, M.; UMEDA, M.; LEE, C. Integrating remote sensing and GIS for prediction of rice proteins contents. **Precision Agriculture** v. 12, p. 378-394, 2011.
- SANTOS, A. O.; PALLONE FILHO, W. J.; UNGARO, M. R. G.; LINO, A. C. L.; RADIN, B. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 463-468, 2003.
- SATTI, S. R.; JACOBS, J. M. A GIS-based model to estimate the regionally distributed drought water demand. **Agricultural Water Management**, v. 66, p. 1-13, 2004.
- SILVA, M. A. S.; SIQUEIRA, E. R.; TEIXEIRA, A. O.; MANOS, M. G. L.; MONTEIRO, A. M. V. Using self-organizing maps for rural territorial typology. In: PRADO, H. A.; LUIZ, A. J. B.; CHAIB FILHO, H. (Ed.). **Computational methods for agricultural research: advances and applications**. Hershey: Information Science Reference, 2010. p. 107-126.
- SHIRATSUCHI, L. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S. **Manual de utilização das principais funções do programa computacional Arc View 3.2. no apoio à Agricultura de precisão**. Planaltina: Embrapa Carrados, 2005, 47 p. (Embrapa Carrados. Documentos, 138).
- TERRA, V. S. S. **Variabilidade espacial e temporal de atributos agronômicos em pomar de pessegueiro**. 2012. 103 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.
- TREMBLAY, N.; BOUROUBI, Y.; PANNETON, B.; VIGNEAULT P.; GUILLAUME, S. Space, time, remote sensing and optimal nitrogen fertilization rates: a fuzzy logic approach In: CLAY, D. E.; SHANAHAN, J.F. (Ed.). **GIS applications in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 101-121.
- WU, W.; LIU, H.; DAI, H.; LI, W.; SUN, P. The management and planning of citrus orchards at a regional scale with GIS. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 247-261, 2009.
- ZHANG, N.; RUNQUIST, E.; SCHROCK, M.; HAVLIN, J.; KLUITENBURG, G.; REDULLA, C. Making GIS a versatile analytical tool for research in precision farming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 22, p. 221-231, 1999.
- ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture: a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 113-132, 2002.
- ZHU, D.; HUANG, Y.; JIN, Z.; ZHANG, W.; JIANG, J. Nitrogen Management Evaluated by Models Combined with GIS: a case study of Jiangsu Croplands, China, in 2000. **Agricultural Sciences in China**, v. 7, n. 8, p. 999-1009, 2008.