

## INDICES DE VARIABILIDADE DO SOLO EM APOIO AO MANEJO EFICIENTE DE FERTILIZANTES EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO

RONALDO P. de OLIVEIRA<sup>1</sup> e VINICIUS de M. BENITES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engº Eletrônico, PhD Agricultura de Precisão, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. Fone:(21)21794565, [ronaldo@cnpes.embrapa.br](mailto:ronaldo@cnpes.embrapa.br)

<sup>2</sup> Engº Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Embrapa Solos, Rio de Janeiro – RJ. [vincius@cnpes.embrapa.br](mailto:vincius@cnpes.embrapa.br)

Apresentado no  
**Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2012**  
24 a 26 de setembro de 2012- Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** O monitoramento intensivo da condutividade elétrica aparente do solo é uma técnica de agricultura de precisão comumente disponível. A quantificação da variabilidade espacial expressa por esta tecnologia serve de apoio a decisão em fases iniciais de adoção, propiciando indicações sobre a variação das propriedades de solo correlacionadas. Este trabalho utiliza dados de sensores de condutividade por contato e da amostragem do solo por grade regular, objetivando aplicar, adaptar e calibrar um modelo de quantificação da variabilidade espacial de atributos do solo. Este indicador da oportunidade de adoção do manejo por taxas variadas de insumos foi aplicado no sistema de rotação de culturas (soja-milho-sorgo) em plantio direto no Cerrado, utilizando análise de semi-variogramas e Krigagem na parametrização dos índices de variabilidade e integração das informações em diferentes resoluções espaciais. Resultados preliminares da aplicação do índice para sensores de condutividade por contato mostraram coerência com a avaliação de outros indicadores de adoção da AP e com valores típicos para sensores por indução eletromagnética, indicando potencial oportunidade para o manejo de nutrientes por sítio-específico no talhão em estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** variabilidade espacial, suporte a decisão, índice de oportunidade.

### SOIL VARIABILITY INDICES SUPPORTING EFFICIENT FETILIZER MANAGEMNT IN NO-TILL PRODUCTION SYSTEM AT CERRADO

**ABSTRACT:** Intensive monitoring of apparent soil electrical conductivity ( $EC_a$ ) is an usually available Precision Agriculture (PA) technology. The quantitative characterization of soil variation represented in this measure may support PA adoption processes, indirectly indicating the variation of correlated soil properties. This work uses data from coulter-based  $EC_a$  sensor and grid soil sampling, aiming to apply, adapt and calibrate a quantitative model, for the opportunity of variable-rate application adoption in Cerrado areas with no-till production system. Semi-variograma analysis and Kriging procedures were applied for index computations and data resolution match. Preliminary index results could correlate with  $EC_a$  by induction typical values and have indicated potential opportunity for site-specific nutrient management.

**KEYWORDS:** spatial variability, decision support, opportunity index.

**INTRODUÇÃO:** O monitoramento em alta resolução espacial da condutividade elétrica aparente do solo ( $CE_a$ ) é uma técnica eficaz, acessível e comumente disponível no processo de adoção da Agricultura de Precisão (AP). A quantificação da variabilidade espacial do solo expressa por esta medida de forma contínua, com grande número de observações consecuentes, serve como ferramenta de suporte a decisão em fases iniciais do processo de adoção da AP; indiretamente propiciando um indicativo da variação das propriedades físicas e químicas correlacionadas (SUDDUTH *et al.*, 2003; McBRATNEY *et al.*, 2005). Entretanto, a carência de ferramentas de apoio a decisão, mais efetivamente integradas na gestão do sistema de produção, persiste como entrave na adoção da tecnologia (MATTHEWS *et al.*, 2008). A dinâmica e complexidade de intervenções eficientes requisita modelos mais simples e acessíveis (McBRATNEY *et al.*, 2005), os quais integrem os conceitos agrônômicos aos processos de gerenciamento operacional estabelecidos. Neste sentido, algumas contribuições tem base semi-quantitativa parametrizada pelas análises de semi-variogramas, de forma a caracterizar a estrutura de variação espacial das propriedades. Onde a razão entre parâmetros do variograma (CAMBARDELLA *et al.*, 1994) ou a estimativa de variogramas médios e proporcionais (McBRATNEY e PRINGLE, 1999) auxiliam na definição de fluxos decisórios na adoção da AP. Uma primeira aproximação do índice de oportunidade de adoção das tecnologias de AP, introduzida por PRINGLE *et al.* (2003), sugere a avaliação da magnitude e da estrutura espacial de variação dentro do talhão como função das características dos equipamentos de aplicação por taxas variadas. Este modelo preliminar, desenvolvido com base em dados de sensores de produtividade e visando um instrumento de comparação técnica entre safras de um mesmo talhão, foi também adaptado para questões de viabilidade operacional da tecnologia (TISSEYRE e McBRATNEY, 2007) e sistematizado em sua aplicação com dados de sensores remotos e de proximidade (de OLIVEIRA e WHELAN, 2008). Este trabalho utiliza dados de sensores de  $CE_a$  por contato (Veris 3100) e amostragem de solo em grade regular, intervalos de 1 ha, com o objetivo de aplicar e avaliar um modelo quantitativo da variabilidade espacial do solo; sendo este um indicador da oportunidade de adoção do manejo por taxas variadas de insumos para áreas de rotação de culturas. Procedimentos de ajuste e parametrização dos semi-variogramas e interpolação por krigagem ordinária foram utilizados para fins de determinação de 3 índices de variabilidade espacial (i.e. CAMBARDELLA *et al.*, 1994; McBRATNEY e PRINGLE, 1999; e OLIVEIRA, 2009), bem como para a integração de dados em diferentes resoluções espaciais. Resultados das primeiras etapas de adoção das tecnologias indicam a oportunidade de adoção, como sugerido pelos diferentes índices aplicados. Valores do índice de oportunidade aplicado a dados de  $CE_a$  por contato no Brasil se correlacionaram com valores típicos para dados de sensores de  $CE_a$  por indução eletromagnética na Austrália, refletindo uma robustez no na resposta do modelo e indicando uma potencial oportunidade na adoção do manejo de fertilizantes por sítio-específico.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O talhão em estudo, T6 (33 ha), da Fazenda Cruzeiro, no município de Castelândia, no sudoeste goiano, é numa área comercial de produção de grãos em sistema de plantio direto com a rotação das culturas de soja, milho e sorgo em região de Cerrado. O solo predominante é um Latossolo Vermelho distroférrico desenvolvido sobre material basáltico da formação Serra Geral e altitude média de 455 m. As etapas de adoção da AP envolvem dados gerados em diferentes densidades amostrais, sendo: a) a amostragem de solos por grade regular em malha de uma amostra por hectare (35 observações); e b) o monitoramento intensivo das medidas de  $CE_a$  (7.480 observações), Figura 1a e 1b respectivamente. Amostras por grade foram coletas após a colheita da safrinha, na

profundidade de 0 a 20 cm, com uso de um amostrador de rosca motorizado de uma polegada; sendo cada amostra formada por 10 subamostras tomadas em um raio de 20 metros a partir dos pontos da malha georeferenciada. As determinações analíticas foram realizadas nos laboratórios de solo da Universidade de Rio Verde. O monitoramento georreferenciado das medidas de  $CE_a$  foi realizado utilizando a tecnologia em rastreamento contínuo por contato, Veris 3100 (Veris Technologies<sup>®</sup>), nas profundidades de 30 cm e 90 cm; segundo implementações físicas e características de operação descritas em RABELLO *et al.* (2008).

O pré-processamento considerou transformações de coordenadas, análise da normalidade da distribuição dos dados e procedimentos de Krigagem simples e ordinária nas estimativas de valores em mapas de mesma resolução amostral. Krigagens por blocos de 10 m e raio de busca proporcional ao maior intervalo entre os pares de observações (lag) gerou uma grade regular do valor estimado e do erro associado em intervalos de 5 m. Para determinação do índice de oportunidade da adoção da AP, os resultados foram confrontados com condições de contorno de fluxos decisórios previamente sugeridos (CAMPARDELLA *et al.*, 1994; McBRATNEY e PRINGLE, 1999; OLIVEIRA, 2009). CAMPARDELLA *et al.*, 1994 sugere um modelo semi-quantitativo onde a razão entre o efeito pepita e o patamar da variância é classificada em classes de estrutura da variação espacial (i.e. Forte, Média ou Fraca). Relativos a uma árvore de decisão baseada na estrutura espacial da variação, valores determinantes do fluxo decisório na adoção da AP são indicados por variogramas médios e proporcionais estimados em McBRATNEY e PRINGLE (1999). Nesta abordagem, McBRATNEY e PRINGLE (1999) sugerem intervalos de valores típicos de variogramas para atributos do solo, sendo: argila, areia, pH, carbono, nitrogênio, potássio e fósforo.

O modelo quantitativo sugerido em OLIVEIRA (2009) calcula o índice de oportunidade para adoção das tecnologias de AP, expresso na variação dos atributos de solo, considerando dois componentes: a magnitude do intervalo de variação ( $M_V$ ) e a estrutura espacial da variação ( $S_V$ ). A determinação da magnitude considera a covariância média, em todo o talhão, subtraída do efeito pepita indicado no variograma de melhor ajuste, para o cálculo do coeficiente de variação por unidade de área. O componente da 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 de fertilizantes. Em resumo, o índice de oportunidade como função da variabilidade espacial do solo ( $S_i$ ) é dado pela equação 1:

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

em que,

- $M_V$  - 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.

Procedimentos de pós-processamento para organização, visualização e comparação da distribuição dos valores de  $CE_a$  e de diferentes atributos de solos foram normatizados como sugerido em TAYLOR *et al.* (2007).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Resultados dos ajustes dos variogramas dos atributos de solo, diretamente ou indiretamente relacionados com as medidas de  $CE_a$  (Tabela 1), mostram parâmetros dos semi-variogramas em intervalos típicos da literatura (McBRATNEY e PRINGLE, 1999). Entretanto, observou-se uma potencial não-estacionariedade na variação dos teores de argila, potássio, fósforo e matéria orgânica, a qual pode estar diretamente relacionada às limitações impostas pelo esquema amostral de grade regular. O ajuste dos respectivos variogramas indica uma forte aleatoriedade das respostas reduzindo a significância das correlações e, em alguns casos, inviabilizando o uso da Co-Krigagem e da krigagem simples visando o cálculo do índice de oportunidade. Valores relativamente baixos do efeito pepita e o difícil ajuste visual destes atributos foram observados. Apenas parâmetros obtidos na Krigagem ordinária favoreceram o cálculo do índice. O melhor ajuste do modelo esférico para a maioria dos atributos foi um aspecto contrastante com um ajuste mais frequente do modelo exponencial (CAMBARDELLA *et al.*, 1994; McBRATNEY e PRINGLE, 1999). Mapas de  $CE_a$  interpolados a partir do monitoramento intensivo com a tecnologia Veris, nas profundidades de 30 e 90 cm, estão ilustrados respectivamente nas Figura 1c e 1d; conforme normatização de legenda única para fins de comparação. Observa-se nos dois casos, a pequena amplitude de valores na variação e uma distribuição espacial pouco estruturada, em particular na profundidade de 90 cm, indicando uma oportunidade de adoção pouco expressiva.

TABELA 1. Parâmetros dos semi-variogramas dos atributos de solo; por amostragem com espaçamento de 1 ponto por hectare e  $CE_a$  por contato em duas profundidades.

Atributo	Modelo de Ajustado	$C0^*$	$C1^{**}$	$a1^{***}$	Distância de Autocorrelação (m)
Argila	Esférico	0,0	24,38	119,8	118
Areia	Exponencial	0,01	15,25	51,0	150
pH	Esférico	0,021	0,01	536,4	530
Potássio	Esférico	0,0	5625,6	286,7	280
Fósforo	Esférico	0,274	7,095	183,5	180
Ca	Esférico	0,301	0,419	294,0	235
Mg	Esférico	0,007	0,012	297,0	295
M.O.	Esférico	4,522	34,2	199,4	195
$CE_a$ (30_cm)	Exponencial	3,80	2.48	51,0	51
$CE_a$ (90_cm)	Esférico	0,48	0.25	183,0	183

\* $C0$  = efeito pepita; \*\* $C1$  = variância estrutural; \*\*\* $a1$  = alcance.

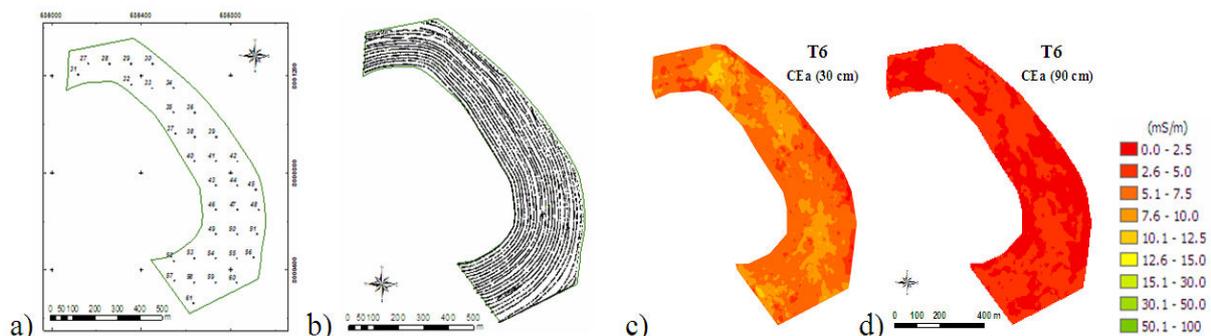


FIGURA 1. Diferentes resoluções amostrais em AP, sendo: a) por grade regular (1 ha); b) por monitoramento intensivo da  $CE_a$ ; c) por interpolação de  $CE_a$  a 30 cm; e d) por interpolação de  $CE_a$  a 90 cm.

Mapas de atributos de solos interpolados a partir da grade regular são apresentados na Figura 2, ilustrando a estruturada espacial da variabilidade de atributos de fertilidade do solo considerados potenciais indicadores da oportunidade para o manejo eficiente de nutrientes. Observou-se em todos estes mapas um alto valor de incerteza nas estimativas na porção norte - noroeste do talhão. Estas distorções foram associadas ao desfavorável alinhamento dos pontos amostrais, de 27 a 31, prejudicando uma boa distribuição espacial da amostragem nesta parte do talhão. Também ficou claro que a distribuição amostral retangular foi pouco elucidativa na caracterização da autocorrelação espacial das variáveis consideradas dado o formato radial do talhão (na forma de arco). Regiões das bordas do talhão também apresentaram distorções significativas quando mais distantes dos 35 pontos amostrais. Estes resultados sugerem uma necessária revisão na abordagem da amostragem de solos por grade regular, considerando-se o alto custo e a eventual incompatibilidade com a topologia e/ou a geometria do talhão.

As condições de análise dos métodos de quantificação da variabilidade e os resultados dos modelos decisórios considerados estão apresentados na Tabela 2, podendo sugerir uma estrutura espacial não muito favorável ao manejo da produção por taxa variável em tempo real. Entretanto, este resultado é diretamente relacionado às limitações de estimativas causadas pelo esquema amostral, além de representar uma variação em baixa escala (pequenos intervalos). Em contrapartida esta variação de caráter mais homogêneo favorece o delineamento de zonas de manejo, visando uma gestão estratégica de médio prazo, dado o tamanho e a distribuição de áreas relativamente mais homogêneas dentro do no talhão. Índices positivos foram obtidos para os modelos propostos em CAMBARDELLA *et al.* (1994) e OLIVEIRA (2009), sugerindo a oportunidade de adoção. Entretanto, modelo em McBRATNEY e PRINGLE (1999) mostrou-se menos conclusivo para parâmetros de areia e pH que ficaram próximos aos limiares sugeridos, não ficando claro o fluxo decisório no contexto do plantio direto no Cerrado.

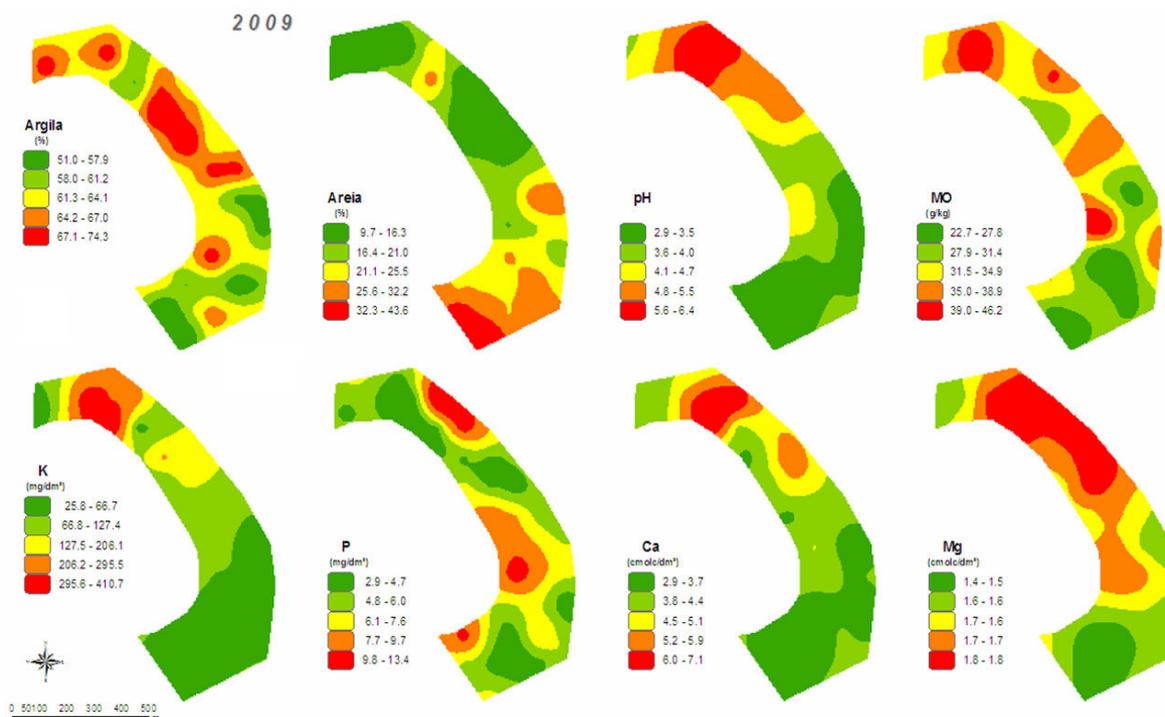


FIGURA 2. Mapas de atributos de solo interpolados por krigagem a partir da grade regular com intervalos de 1 ha na profundidade de 0 a 20 cm.

TABELA 2. Avaliação dos parâmetros da variografia para atributos de solo utilizados como métricas da oportunidade de adoção do manejo por sítio-específico.

Atributo do Solo	Variogramas Médios e Proporcionais <sup>1</sup>			Índice de Cambardella <sup>2</sup>		Índice de Oportunidade (S <sub>i</sub> ) <sup>3</sup>
	C1** >	C0* < ou a1*** >	Varição Estruturada	C0 / C0+ C1 (%)	Dependência Espacial	
Argila	Sim	Sim	Sim	30	Média	-
Areia	Não	Sim	Não	10	Forte	-
pH	Não	Sim	Não	60	Média	-
Potássio	Sim	Sim	Sim	80	Fraca	-
Fósforo	Sim	Sim	Sim	400	Aleatória	-
CE <sub>a</sub> (30 cm)	-	-	-	60	Média	3,9
CE <sub>a</sub> (90 cm)	-	-	-	70	Média	2,0

\*C0 = efeito pepita; \*\*C1 = variância estrutural; \*\*\*a1 = alcance.

<sup>1</sup> McBRATNEY e PRINGLE (1999); <sup>2</sup> CAMBARDELLA *et al.* (1994); <sup>3</sup> OLIVEIRA (2009).

( - ) Indica que a análise não se aplica ao atributo; seja pela inexistência de variogramas médios ou proporcionais de referência, ou pelo limitado número de amostras que impossibilita o uso do S<sub>i</sub>.

**CONCLUSÕES:** Dificuldades na análise variográfica dos atributos de solo por grade regular pode estar relacionada ao limitado número de pontos amostrais, com distribuição retangular que não diretamente se associa as variações edáficas, apresentando correlações pouco significativas e influenciando diretamente na incerteza da interpolação. Neste sentido, os dados de CE<sub>a</sub> prestam apoio fundamental nas interpretações, indicando a relevância do seu uso nas etapas iniciais dos processos decisórios de adoção. O monitoramento contínuo de CE<sub>a</sub> mostra-se complementar na quantificação da variabilidade espacial, além de sugerir seu potencial suporte na revisão do desenho amostral para a coleta de solos. A complexidade analítica da adoção da AP ratifica a necessidade de modelos quantitativos simples e integrados aos processos gerenciais do manejo de nutrientes. O índice de oportunidade (S<sub>i</sub>) mostrou-se robusto em sua aplicação, justificando sua calibração e uso com dados de outros sensores e aplicado a outros sistemas produtivos, segundo o seu ajuste para as condições operacionais brasileiras.

**AGRADECIMENTOS:** Agradecemos a Rede Brasileira de Agricultura de Precisão no apoio, financiamento e disponibilização de dados para fins de calibração, validação e difusão do índice de variabilidade espacial em culturas anuais e perenes.

## REFERÊNCIAS

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. *SSSAJ*, v58, 1994.

de OLIVEIRA, R. P.; WHELAN, B. M. An Index for Evaluating Crop Production Variability from Remote and Proximal Sensor Data. In: Proc. of 14<sup>th</sup> Australian Agro. Conf., Gosford, NSW : The Regional Institute Ltd., 2008.

MATTHEWS, K. B.; SCHWARZ, G.; BUCHAN, K.; RIVINGTON, M.; MILLER, D. Wither agricultural DSS? *Computers and Electronics in Agriculture*, v.61, p. 149-159, 2008.

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, p. 219–236, 1999.

McBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, v.6, p. 1-17, 2005.

OLIVEIRA, R. P. de. Contributions towards decision support for site-specific crop management. ACPA. Universidade de Sydney, Sydney. (ID 14851), 318 p., 2009.

PRINGLE, M. J.; McBRATNEY, A.; WHELAN, B.; TAYLOR, J. A. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using a yield monitor. *Ag.Syst.*, v.76, p. 273-292, 2003.

RABELLO, L. M.; INAMASSU, R. Y.; TORRETO NETO, A.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; MOLIN, J. P. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um implemento agrícola (subsolador). Embrapa Instrumentação Agropecuária. Circular Técnica 46, p.4, 2008.

SUDDUTH, K. A., KITCHEN, N. R.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; WIEBOLD, W. J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity, *Agron. J.*, v.95, p. 472–482, 2003.

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

TISSEYRE, B.; McBRATNEY, A. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> ECPA*, p. 249-256, 2007.