

Agricultura de Precisão: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no Cerrado



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 214

Agricultura de Precisão: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no Cerrado

*Sandro Manuel Carmelino Hurtado
Álvaro Vilela de Resende
Carlos Alberto Silva
Edemar Joaquim Corazza
Luciano Shozo Shiratsuchi*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Equipe de revisão: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Francisca Elijani do Nascimento

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Foto(s) da capa: *Álvaro Vilela de Resende*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Sousa*

Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2008): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

A278 Agricultura de precisão: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no cerrado / Sandro Manuel Carmelino Hurtado ... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2008.

48 p. – (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111 ; 214)

1. Nitrogênio. 2. Milho. 3. Agricultura de precisão. 4. Fertilidade do solo. I. Carmelino Hurtado, Sandro Manuel. II. Série.

631.8 - CDD 21

© Embrapa 2008

Autores

Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Bolsista CNPq
sandroelbat@yahoo.com.br

Álvaro Vilela de Resende

Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da
Embrapa Cerrados
alvaro@cpnms.embrapa.br

Carlos Alberto Silva

Engenheiro Agrônomo, D.Sc.
Departamento de Ciência do Solo, Universidade
Federal de Lavras
csilva@ufla.br

Edemar Joaquim Corazza

Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da
Embrapa Informação Tecnológica
edemar@sct.embrapa.br

Luciano Shozo Shiratsuchi

Engenheiro Agrônomo, M.Sc., Pesquisador da
Embrapa Cerrados
shozo@cpac.embrapa.br

Apresentação

A busca por altas produtividades de milho requer investimento na construção da fertilidade do solo, principalmente nas condições edafoclimáticas da região do Cerrado. Dada a forte evolução agrícola observada na região, com elevado investimento em fertilizantes, a pesquisa moderna deve viabilizar formas de otimização do manejo da adubação. Essa meta é válida, sobretudo, em se tratando do nitrogênio (N), um dos nutrientes mais limitantes a produtividade e que apresenta maior custo e menor eficiência de aproveitamento nas lavouras. Nesse sentido, aplicações diferenciadas de N, ponderadas pela existência da variabilidade espacial na capacidade de suprimento pelo solo dentro dos talhões de cultivo, podem trazer benefícios econômicos e ambientais. Esta publicação discorre sobre aspectos relacionados ao manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho, com ênfase na estimativa da disponibilidade e recomendação do N em sistemas de produção tecnificados, vinculadas ao uso de técnicas de agricultura de precisão.

Roberto Teixeira Alves
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução.....	9
Solos do Bioma Cerrado e o Sistema Plantio Direto.....	10
Obtenção de Altas Produtividades de Milho	12
Recomendações de Adubação Nitrogenada.....	15
Agricultura de Precisão e Avaliação do Potencial Produtivo do Solo	21
Manejo Sítio-específico da Adubação Nitrogenada	29
Uso do Clorofilômetro Portátil como Indicador da Necessidade de N para o Milho	34
Considerações Finais	37
Referências	38
Abstract.....	48

Agricultura de Precisão: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no Cerrado

Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Álvaro Vilela de Resende

Carlos Alberto Silva

Edemar Joaquim Corazza

Luciano Shozo Shiratsuchi

Introdução

Altas produtividades de milho são dependentes da interação de fatores como clima, solo e manejo. O manejo da adubação nitrogenada é um dos principais condicionantes da produtividade, pela complexa dinâmica do nitrogênio (N) nos sistemas agrícolas. É com base nessa dinâmica que se busca estimar o potencial de suprimento de N pelo solo e o seu aproveitamento pela cultura, o que possibilita definir as recomendações de adubação.

Contudo, a maioria das variáveis que influencia a necessidade de N na adubação pode mudar no espaço e no tempo, como é o caso das características edafoclimáticas que interferem no potencial de suprimento do nutriente pelo solo. Assim, para se refinar o manejo da adubação nitrogenada, é preciso considerar a sua variabilidade espacial e temporal, especialmente dos atributos do solo. Isso pode ser obtido pela utilização de técnicas que envolvem sistema de informações geográficas (SIG), sistema de posicionamento global (GPS), geoestatística e uso de sensores. Essas técnicas vêm sendo utilizadas na agricultura de precisão.

Em condições de lavoura, tem-se observado instabilidade nas produtividades de milho em resposta às aplicações de fertilizantes

nitrogenados baseadas na variabilidade espacial do solo (WELSH et al., 2003). Aliado a esse fato, tem-se, também, um custo elevado e certa demora na obtenção de informações espacializadas do solo para determinação de adubação a taxas variáveis. Nesse cenário, a utilização de medidores de clorofila portáteis constitui uma alternativa que auxilia no reconhecimento do estado nutricional do milho, possibilitando diagnosticar rapidamente zonas deficientes em N e viabilizar intervenções para correção ainda durante a safra.

Nesta revisão, são apresentados aspectos sobre manejo da cultura e disponibilidade e recomendação de N para o milho na região do Cerrado, associando o uso de técnicas de agricultura de precisão na busca de maior eficiência da adubação nitrogenada.

Solos do Bioma Cerrado e o Sistema Plantio Direto

O Cerrado é considerado o segundo maior bioma brasileiro. As áreas de Latossolos e Neossolo Quartzarênico (Areia Quartzosa) representam quase 125 milhões de hectares com aptidão para agricultura (RESCK et al., 2006). Cerca de 15 milhões de hectares são explorados com culturas anuais, 50 milhões com pastagens cultivadas e 3,5 milhões com culturas perenes (EMBRAPA CERRADOS, 2005). O bioma apresenta importância estratégica ao ser responsável por cerca de 50 %, 30 % e 18 % da produção nacional de soja, de milho e de feijão, respectivamente (BERNARDI et al., 2003).

Atualmente, o Cerrado é uma das áreas de maior potencial agrícola do mundo, devido, em grande parte, ao notável desenvolvimento tecnológico verificado em relação às práticas de correção do solo e adubação, que permitiu incorporar ao sistema produtivo solos, originalmente ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes. Apesar de quimicamente pobres, os solos desse bioma, representados principalmente por Latossolos (46 %) e Neossolos Quartzarênicos (15 %), apresentam ótimas qualidades físicas e aptidão à mecanização (LOPES, 1983), além da possibilidade de irrigação em larga escala.

A obtenção de altas produtividades, nesses solos, requer investimento na construção da sua fertilidade. A calagem, além de reduzir a toxidez por alumínio e elevar os teores de bases, promove, também, aumento na capacidade de troca de cátions (CTC), menor fixação de fósforo e estímulo ao desenvolvimento de raízes na camada de incorporação do calcário. A gessagem minimiza os problemas relacionados à deficiência de cálcio e à toxidez por alumínio em subsuperfície, permitindo o aprofundamento do sistema radicular e, conseqüentemente, maior tolerância das culturas a períodos sem precipitação (veranico). Adubações corretivas com fósforo, potássio e micronutrientes são geralmente necessárias. Assim, calagem, gessagem e adubação corretiva, juntamente com adubações de manutenção bem manejadas, são as principais práticas agronômicas relacionadas à produtividade agrícola no Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004a, c).

Cabe ressaltar que a presença de cobertura vegetal mais exuberante e a obtenção de produtividades elevadas encontram-se, geralmente, vinculadas a boas características de agregação, aeração e infiltração de água, e maiores teores de matéria orgânica do solo (MOS). Perdas de MOS afetam os componentes físicos, químicos e biológicos do solo, reduzindo a disponibilidade de nutrientes, a eficiência das fertilizações e a produtividade das culturas (SILVA et al., 1994b). Sistemas de manejo com menor revolvimento do solo, como o plantio direto (SPD), contribuem eficientemente nesse sentido, elevando os estoques de MOS na camada superficial e oferecendo, entre outros benefícios, maior disponibilidade de nutrientes, de temperaturas mais amenas, de melhor armazenamento de água e de maiores taxas de infiltração (LOPES et al., 2004; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A elevação dos teores de MOS, via adoção do SPD, apresenta papel precípua na construção da fertilidade, uma vez que a matéria orgânica é responsável por quase 90 % da capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos no Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004a).

O Brasil tem a segunda maior área cultivada sob plantio direto no mundo, com quase 25,5 milhões de hectares (FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 2007). Desses, quase

10 milhões encontram-se no Cerrado¹, apresentando assim, desde os anos 90, uma forte evolução na região, devido, em parte, aos custos de produção atrativos e outras vantagens oferecidas pelo sistema (LOPES et al., 2004).

Obtenção de Altas Produtividades de Milho

O cultivo do milho responde por grande parte da produção de grãos no Brasil. Somando-se a safra normal e a safrinha, alcança aproximadamente 51,1 milhões de toneladas colhidas numa área de quase 13,6 milhões de hectares (CONAB, 2007). Apesar da diversidade climática e edáfica do País, altas produtividades podem ser logradas em diferentes regiões. Produtividades de grãos de 10 t ha⁻¹ a 14 t ha⁻¹ são alcançadas por bons produtores, tendo sido relatada produtividade de até 16 t ha⁻¹ (BERNARDES, 1989). Contudo, a média nacional é ainda muito baixa quando comparada aos principais países produtores, da ordem de 3,6 t ha⁻¹ (CONAB, 2007).

O rendimento do milho é afetado por uma gama de fatores, tais como: população e espaçamento de plantas adotados; época de semeadura e híbridos selecionados; qualidade do solo e adubações realizadas; disponibilidade hídrica e outros fatores climáticos; interferência por plantas daninhas; pragas e doenças. Condições desfavoráveis desses fatores resultam em até 70 % de perdas em produtividade (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Entre os fatores ambientais, a altitude, que é associada às temperaturas médias diurnas e noturnas, é importante por interferir na fotossíntese e na respiração do milho. Em áreas tropicais, maiores rendimentos estão associados a altitudes intermediárias ou altas (DURÃES, 2007), que no Brasil correspondem às regiões por volta de 1.000 m acima do nível do mar, onde ocorrem temperaturas diurnas e noturnas ideais. Vastas áreas do Bioma Cerrado enquadram-se

¹ John N. Landers. Coordenador da Associação de Plantio Direto no Cerrado (APDC). Comunicação pessoal. Junho 2007.

nessas condições. Observam-se maiores produtividades em locais com temperaturas mais amenas e elevada radiação solar incidente. Nas regiões baixas, temperaturas diurnas superiores a 35 °C estão relacionadas à diminuição da atividade da redutase do nitrato e da taxa fotossintética, enquanto temperaturas noturnas maiores de 24 °C elevam a taxa de respiração celular, reduzindo a área foliar pelo menor acúmulo de fotossintatos (FANCELLI, 2003).

A disponibilidade hídrica é crítica nas fases de emergência, florescimento e formação de grãos, especialmente no período compreendido entre os 15 dias prévios e posteriores ao aparecimento do pendão. No solo, o déficit hídrico restringe, fortemente, o desenvolvimento radicular, sobretudo ao elevar a resistência à penetração. Nesse aspecto, a presença de MOS assume importância ao favorecer a exploração do solo pelas raízes e aumentar a quantidade de água disponível à cultura (FANCELLI, 2003, 2006).

Práticas que visem a aproveitar mais eficientemente a radiação solar incidente, como uma melhor distribuição espacial de plantas, podem significar acréscimos de produtividade. Vantagens adicionais de ajustes no arranjo de plantas podem ser obtidas em razão do melhor controle de plantas daninhas e a possibilidade de se trabalhar com maior densidade de plantas de milho, sendo estes ajustes dependentes de outros fatores, como qualidade de colmo e tipo de híbrido (SILVA et al, 1999). Experiências brasileiras têm evidenciado maiores rendimentos com aumento na densidade de plantio (CRUZ et al., 2006), sobretudo com a utilização de espaçamentos entre fileiras reduzidos (45 cm a 50 cm). De maneira geral, híbridos de porte baixo permitem menores espaçamentos e maiores densidades populacionais com menor risco de haver competição intra-específica. Populações de 60 mil plantas ha⁻¹ a 90 mil plantas ha⁻¹ têm resultado aumento de produtividade para genótipos de arquitetura foliar ereta, porte baixo e ciclo precoce ou semiprecoce, o que não se verifica na mesma intensidade no caso de híbridos de arquitetura foliar semi-ereta ou aberta (DOURADO NETO et al., 2003).

Dado que o potencial produtivo da cultura é atingido quando não há limitações ao seu desenvolvimento, aspectos ambientais, genotípicos e de manejo podem ser decisivos quando se visam às altas produtividades. Entre os fatores que afetam o potencial produtivo do milho, Vitti et al. (2003) destacam, como mais limitantes, aqueles associados ao manejo químico do solo e suas interações com as condições climáticas. Para Fancelli (2006), o conhecimento da fisiologia e exigências edafoclimáticas, direcionando o manejo da lavoura, garante o lucro desejado, por ser o milho uma das plantas mais bem dotadas fisiologicamente, com alta capacidade de conversão de nutrientes e fotoassimilados em grãos.

Como principais estratégias para propiciar condições ideais de ambiente e máximo potencial produtivo do milho, Dobermann (2006) e Fancelli (2006) indicam:

- Correção de áreas compactadas, da acidez e da disponibilidade de nutrientes no solo, visando ao aprofundamento radicular.
- Construção da fertilidade do solo mediante o uso do SPD e manejo de resíduos.
- Distribuição espacial adequada associada à máxima população de plantas.
- Nutrição equilibrada de macro e micronutrientes.
- Adubação nitrogenada de acordo com as demandas por estágio fenológico.
- Otimização do uso de água disponível (sistema de sequeiro ou irrigado).
- Controle de doenças, pragas e ervas daninhas nos estádios fenológicos críticos, procurando garantir área foliar máxima.
- Gerenciamento de qualidade: insumos apropriados, capacitação de pessoal.

De acordo com Dobermann (2006), na região do cinturão do milho nos EUA, produtividades superiores a 80 % do potencial da cultura são obtidas com populações acima de 70 mil plantas ha^{-1} , nitrogênio fornecido em pré-plantio e no estágio V6, em sistemas de rotação de culturas e com correção do solo. Já, para se atingir produções acima de 90 % do potencial produtivo, requerem-se maiores populações (80 mil plantas ha^{-1} a 95 mil plantas ha^{-1}) em espaçamento entre linhas reduzido (40 cm a 50 cm), maiores doses de NPK e parcelamento de nitrogênio, bem como, adequado balanço de nutrientes. Pode-se esperar que essas diferenças de manejo da cultura e da adubação, relacionadas à expectativa de produção, também se apliquem como premissas básicas às lavouras brasileiras, desde que devidamente ajustadas às condições locais.

Recomendações de Adubação Nitrogenada

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pela cultura do milho e o exportado em maior quantidade nos grãos. Segundo Oliveira (2004), a concentração adequada de N no tecido foliar é de 28 g kg^{-1} a 35 g kg^{-1} . De acordo com as indicações de Sousa e Lobato (2004b), para se produzir uma tonelada de grãos são necessários cerca de 20 kg de N, o que corresponde a 180 kg ha^{-1} do nutriente para uma produtividade de 9 t ha^{-1} , quantidade que normalmente não pode ser suprida exclusivamente pelo solo.

A demanda de N, pela planta, pode ser afetada por numerosos fatores, encontrando-se variadas recomendações de adubação na literatura. No Brasil, as indicações mudam de acordo com as particularidades de cada região. Em geral, a definição da quantidade de N na adubação do milho é realizada previamente à semeadura, sem monitoramento posterior à emergência das plantas. Isso pode acarretar subestimativa ou superestimativa dos requerimentos da cultura (RAMBO et al., 2004) e, conseqüentemente, algumas áreas podem apresentar deficiência tardia, enquanto outras recebem excesso de N.

No Estado de São Paulo, as doses de N recomendadas para o milho variam com a expectativa de rendimento e a probabilidade de resposta

ao nutriente, sendo sugeridas doses de 20 kg ha⁻¹ a 170 kg ha⁻¹ de N (RAIJ et al., 1996). Doses adicionais de 20 kg ha⁻¹ a 40 kg ha⁻¹ devem ser aplicadas quando da presença de palhada com alta relação Carbono/Nitrogênio (C/N). Segundo Cantarella e Duarte (2004), nos últimos anos, há uma tendência de se aplicar mais nitrogênio, o que seria explicado pela maior expectativa de produção e maior demanda de N sob plantio direto, associadas à elevada demanda em estádios iniciais de desenvolvimento do milho.

Em Minas gerais, a recomendação é de 10 kg ha⁻¹ a 20 kg ha⁻¹ de N no plantio, elevando-se essa dose para 20-30 kg ha⁻¹ nos sistemas que envolvem o uso de palhadas com alta relação C/N. Em cobertura, são indicadas doses de 60 kg ha⁻¹ a 140 kg ha⁻¹ de N, considerando a produtividade esperada (ALVES et al., 1999). Para o Cerrado, Sousa e Lobato (2004c) propõem a aplicação de 20 kg ha⁻¹ a 30 kg ha⁻¹ de N no plantio e 40 kg ha⁻¹ a 180 kg ha⁻¹ de N em cobertura, para expectativas de produtividade de 6 t ha⁻¹ a 12 t ha⁻¹ de grãos. Segundo os autores, essas doses devem ser melhor ajustadas conforme o histórico de cultivo da área e tipo de palhada presente (relação C/N).

Na Região Sul, por sua vez, consideram-se, além das expectativas de produção, os teores de MOS (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO, 1995). O aumento da área plantada sob SPD e as diferentes relações C/N das palhadas sugerem a atualização das doses recomendadas, considerando também a cultura antecedente (AMADO et al., 2002).

A matéria orgânica destaca-se como a principal reserva de nitrogênio no solo, estando a ela associado cerca de 95 % do N total (BAYER; MIELNICZUK, 1997). É em virtude desse fato que, em algumas regiões no Brasil, para definição da quantidade de N nas adubações, consideram-se créditos de 20 kg ha⁻¹ a 30 kg ha⁻¹ de N disponível à cultura para cada 1 % de MOS. Podem ser creditados, também, 15 kg ha⁻¹ a 30 kg ha⁻¹ de N quando foi feito cultivo anterior de espécies recicladoras/fixadoras de N, ou 25 kg ha⁻¹ a 35 kg ha⁻¹ de N, dependendo da relação C/N da cultura anterior, em razão da maior ou menor intensidade de imobilização do nutriente no sistema (VITTI et al, 2003).

Todavia, a MOS engloba um grande número de moléculas heterogêneas com variados graus de decomposição, sendo essa uma possível explicação para o fato de os teores de matéria orgânica não indicarem, por si só, o acúmulo potencial de N na planta. Na sua composição, incluem-se diferentes compartimentos contendo N em formas mais ou menos disponíveis: a liteira, a fração leve, a biomassa microbiana, os compostos orgânicos solúveis em água e a matéria orgânica estabilizada, conhecida como húmus (STEVENSON, 1994).

A reserva de N-orgânico encontra-se sujeita a transformações por ação dos microrganismos, sendo o aporte anual de N via mineralização cerca de 1 % a 4 % do N-orgânico total. Segundo Stevenson (1994), Sousa e Lobato (2004b) e Bissani et al. (2004), a intensidade da mineralização depende de fatores como tipo de solo, conteúdos de matéria orgânica e N total, relação C/N, pH, temperatura, umidade, secamento do solo, suprimento de nutrientes inorgânicos e interações solo-planta. O pH é um dos fatores que mais influencia o processo nos solos ácidos, nos quais a calagem aumenta a taxa de mineralização (SILVA et al., 1994a; FREIRE, 2000).

Aportes contínuos de materiais orgânicos, como os associados à adoção do SPD, afetam a dinâmica do N no solo. De acordo com Sá (1999), altas relações C/N, nas palhadas, apresentam maior influência, favorecendo a imobilização de nitrogênio e restringindo a mineralização no início do estabelecimento do SPD. Com o tempo de adoção do sistema, os processos de imobilização perdem intensidade e passa existir maior taxa de liberação de N às culturas.

Em estudo conduzido na Região Sul do Brasil, Lovato (2001) verificou que a associação de plantio direto com sistemas de cultivo, incluindo leguminosas, resultou aumento do N armazenado no solo. O aumento no estoque do nutriente pode compensar, em parte, as menores taxas de decomposição de MOS verificadas em solos não-revolvidos (MIELNICZUK et al., 2003). Nessa situação, a disponibilidade de N ao milho pode ser suficiente para produzir, sem fertilizante nitrogenado, a mesma quantidade de grãos obtida na ausência de leguminosas com uma adubação de 120 kg ha⁻¹ de N (BURLE et al., 1997).

No Cerrado, o processo de mineralização da palhada, resultante do SPD, é acelerado pela presença de umidade combinada a altas temperaturas durante a estação de cultivo, situação em que, possivelmente, não seria necessário adubar com N nas mesmas quantidades indicadas para sistemas de cultivo com revolvimento do solo (SOUSA; LOBATO, 2000). Já de acordo com Lopes et al. (2004), períodos de chuva irregular podem ocasionar imobilização de N pela biomassa por períodos longos de tempo, razão pela qual, no Cerrado, uma máxima resposta econômica requereria elevação da adubação nitrogenada normalmente realizada no plantio.

O requerimento de N pelo milho mostra-se dependente, também, dos aportes de água no solo, que afetam drasticamente o potencial de rendimento da cultura, sendo necessárias coberturas de 50 kg ha⁻¹ a 90 kg ha⁻¹ de N em cultivo sob sequeiro e de 120 kg ha⁻¹ a 150 kg ha⁻¹ de N nas áreas irrigadas (SOUZA et al., 2003). Araújo et al. (2004), trabalhando com milho irrigado, observaram que as maiores produtividades foram atingidas com doses mais elevadas de N (até 240 kg ha⁻¹), não se diferenciando segundo o sistema de rotação milho-milho ou soja-milho.

Sob situações de estresse, ocasionadas por escassez ou excesso de água, a necessidade de nitrogênio para o milho pode ser alterada. Nesse caso, as aplicações tardias de cobertura nitrogenada podem ser vantajosas. Em virtude de mudanças na dinâmica de absorção de N, resultantes de alterações morfofisiológicas em híbridos modernos, pode haver absorção significativa no período de enchimento de grãos (SILVA et al., 2005). Esse fato foi também constatado por Scharf et al. (2002), embora a máxima produtividade não tenha sido atingida quando as aplicações de N foram atrasadas até esse estágio.

Como mencionado, diversos fatores podem ser considerados na definição da quantidade necessária de fertilizante nitrogenado para lavouras de milho. A aplicação de N costuma ser dimensionada levando em conta um ou mais dos seguintes aspectos: expectativa

de rendimento; histórico da área; tipo de solo; teor de MOS; teor de N potencialmente mineralizável; teor de N mineral no solo; uso ou não de adubos verdes ou adubação orgânica; entre outros (AMADO et al., 2002; CANTARELLA; DUARTE, 2004). Todavia, pode-se buscar maior refinamento, utilizando modelos matemáticos que comportam, na forma de parâmetros matemáticos, diferentes fatores condicionantes. Fancelli e Dourado Neto (2000) propõem, como equação geral, para se definir a dose de N para o milho a seguinte expressão:

$$Q_{FN} = \frac{R [P_G N_p IC + (1-IC)N_{op}](1-N_s)}{IC.Ef.T_{NF}}$$

em que: Q_{FN} refere-se à quantidade de fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); R é o rendimento esperado da parte exportável (kg ha^{-1}); P_G é o teor de proteína no grão (kg kg^{-1}); N_p o teor médio de N na proteína (kg kg^{-1}); IC é o índice de colheita ($\text{kg grãos} / \text{kg massa total da planta}$); N_{op} é o teor de N nas outras partes da planta (kg kg^{-1}), à exceção do grão; N_s corresponde à quantidade relativa de N fornecida pelo solo ($\text{kg N solo} / \text{kg N total extraído}$); Ef é o fator de eficiência da adubação nitrogenada ($\text{kg N absorvido do fertilizante} / \text{kg N total aplicado}$); e T_{NF} o teor de N no fertilizante (kg kg^{-1}).

Esses autores sugerem, ainda, formas de cálculo de adubação de cobertura considerando como fatores condicionantes: o rendimento esperado, a quantidade relativa de N fornecido pelo solo (com base no teor de MOS), a profundidade efetiva do sistema radicular, a cultura anterior, a eficiência da aplicação e o híbrido utilizado.

Outros métodos encontrados na literatura são os propostos pelas universidades de Nebraska e Minnesota, nos EUA, nos quais se dá ênfase aos teores de nitrato (NO_3^-) e de matéria orgânica no solo (FRANK; ROETH, 1996). O método proposto pela Universidade de Nebraska preconiza o modelo:

$$N_{rec} = 39,2 + (0,02141 * PE) - (8,96 * N\text{-NO}_3^-) - (0,00025 * PE * MOS) \\ - \text{outros créditos N}$$

em que: a recomendação de N (N_{rec} , em $kg\ ha^{-1}$) é dada em função da produtividade esperada (PE, em $kg\ ha^{-1}$); do valor médio do teor de nitrato ($N-NO_3^-$, em $mg\ kg^{-1}$) na zona de raízes a uma profundidade de 46 cm ou abaixo; do teor de matéria orgânica do solo (MOS, em $g\ kg^{-1}$) na camada superficial e; de outros créditos de N referentes ao uso de leguminosas, resíduos ou nitrato em água de irrigação.

Na Universidade de Minnesota, utiliza-se a fórmula:

$$N_{rec} = 0,02141 * PE - Nit_{(0\ cm\ a\ 60\ cm)} - Cn$$

em que: N_{rec} é a quantidade de fertilizante nitrogenado ($kg\ ha^{-1}$); PE é a produtividade esperada ($kg\ ha^{-1}$); $Nit_{(0\ cm\ a\ 60\ cm)}$ é o $N-NO_3^-$ medido na profundidade de 0 cm a 60 cm ($kg\ ha^{-1}$); e Cn corresponde aos créditos de N de cultivos prévios à rotação ($kg\ ha^{-1}$).

Um outro método, empregado na Universidade de Illinois e adaptado para as condições do Brasil (VITTI et al., 2003) propõe:

$$N_t = [(R_m + 5\%) 18,5 - (Cn_1 + Cn_2 + Cn_3)]$$

em que: N_t ($kg\ ha^{-1}$) é a quantidade de N total aplicado à cultura em semeadura e cobertura; R_m ($t\ ha^{-1}$) é o rendimento médio do milho obtido nos últimos 3 anos; e $Cn_{1,2,3...n}$ são os créditos de N ($kg\ ha^{-1}$) do sistema, devidos à cultura anterior, teor de MOS, adubação verde, etc.

Para as condições do Cerrado, Sousa e Lobato (2004b) propuseram o uso da seguinte equação, baseado em Stanford e Legg (1966) e Grove (1968):

$$N_f = (N_a - N_s) / E_f$$

em que: N_f ($kg\ ha^{-1}$) é a quantidade de N demandada na adubação para a cultura; N_a ($kg\ ha^{-1}$) é o N acumulado na matéria seca da parte aérea para a produção desejada, considerando-se a produtividade esperada e o requerimento de 20 kg de N por tonelada de grãos; N_s ($kg\ ha^{-1}$) é o N suprido pelo solo, estimado de acordo com o teor de MOS (suprimento de 30 $kg\ ha^{-1}$ de N para cada 1 % de MOS) e as produtividades médias

obtidas nas três últimas safras (suprimento de N pela decomposição das palhadas considerando o fator de 0,1 para gramíneas e 0,11, 0,22 e 0,45 para as leguminosas colhidas há três, dois e um ano, respectivamente) e E_f é o fator de eficiência de utilização do fertilizante (normalmente 75 %).

Outros modelos para cálculo da dose de N, em diversos países, são disponibilizados em compilação feita por Hofman e Cleemput (2004), sendo a escolha dos parâmetros das diversas equações matemáticas baseada na capacidade de o solo suprir N, na expectativa de extração/exportação do nutriente pelas plantas e em índices de perdas de N por lixiviação, volatilização, erosão e outros.

A determinação do teor de nitrato, na base do colmo (SIMS et al., 1995), especialmente ao final do período vegetativo, tem sido usada como critério diagnóstico de N para obtenção de altas produtividades de grãos na safra seguinte. Entretanto, para Binder et al. (2000), citados por SILVA et al. (2005), um bom critério deve considerar o grau de deficiência com relação ao balanço entre a quantidade de N suprido pelo solo e a sua demanda nutricional em cada estágio fenológico. Nesse sentido, a análise do teor de nitrato no solo na camada de 0 cm a 30 cm pode ser viável na avaliação do cálculo de N requerido pela cultura (SIMS et al., 1995) durante a fase de desenvolvimento, embora, na definição da camada de solo a ser amostrada, deva-se considerar a profundidade efetiva do sistema radicular. Outros trabalhos têm demonstrado que leituras dos teores de clorofila em folha podem auxiliar na determinação das necessidades de N em cobertura. Esse aspecto será mais detalhado no decorrer desta revisão.

Agricultura de Precisão e Avaliação do Potencial Produtivo do Solo

Agricultores, pesquisadores e técnicos têm reconhecido que as produções das culturas não são uniformes no campo (COELHO, 2003), podendo variar espacialmente, por exemplo, em locais que perdem umidade rapidamente, em regiões de maior erosão, ou onde a altura de plantas, que é consequência da presença de alguma variabilidade no campo, apresenta-se irregularmente distribuída.

Em resposta à existência de variabilidade dos fatores que influenciam na produtividade, surgiu a agricultura de precisão (AP), englobando quatro etapas básicas: a coleta de informação georreferenciada; o processamento/gerenciamento da informação (com auxílio dos diferentes métodos de interpolação e análise geoestatística); a aplicação localizada de insumos; e a avaliação dos resultados, com auxílio de sistema de posicionamento geográfico (GPS), sistema de informações geográficas (SIG) e sensores (SARAIVA et al., 2000).

A sua adoção envolve a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada à produção agrícola, objetivando aumentar a produtividade das culturas e a qualidade ambiental (PIERCE; NOWAK, 1999). Com o manejo sítio-específico na utilização de insumos, visa-se a minimizar perdas e a otimizar os sistemas de produção.

Sabe-se que a variabilidade da fertilidade do solo pode se dar tanto horizontal, quanto verticalmente (CHITOLINA et al., 1999), sendo causas da primeira a forma de adubação (ex.: a lanço ou em sulco) e a orientação das linhas no plantio. A variação vertical está mais associada às particularidades dos nutrientes (ex.: mobilidade no perfil) e ao sistema de manejo de solo adotado (ex.: plantio direto ou com preparo). Contudo, os protocolos de recomendação de adubação foram criados, pressupondo condições de áreas homogêneas, a partir de calibrações baseadas em valores médios, o que, dada à existência da variabilidade, pode não representar satisfatoriamente a realidade dos campos de cultivo.

Entre as diversas metodologias para se acessar a variabilidade espacial, o mapeamento baseado na utilização de grades regulares é a mais utilizada, sendo comum a realização de amostragens de solo em grades densas, com grande número de amostras a serem analisadas em laboratório. Cabe ressaltar que o aumento do tamanho da célula ou malha amostral, reduzindo o número de pontos de coleta na área de estudo, leva a distorções nos mapas obtidos, como observado por Pierce e Novak (1999) e Resende et al. (2006). No caso do nitrogênio, avaliando a variação espacial dos teores de nitrato no solo, Franzen et

al. (2000), citados por Silva et al. (2002), relataram imprecisões para densidades amostrais com grade menor a 10 células ha⁻¹.

Segundo Luchiari Júnior et al. (2004), as distorções, nos mapas, são mais relacionadas ao local de coleta das amostras nas malhas e ao tamanho da malha, do que ao método de interpolação utilizado. A influência da densidade amostral para elaboração de mapas de recomendação de N foi estudada por Ferguson et al. (1996), demonstrando que a utilização de 6,75 amostras ha⁻¹ seria suficiente para a sua confecção e não 54,0 amostras ha⁻¹ como proposto, inicialmente. Em condições brasileiras, Silva et al. (2002) sugeriram o uso de 14 amostras ha⁻¹ para identificação da variabilidade espacial da fertilidade do solo. Trabalhando com simulação de grades amostrais menos densas, na região do Cerrado, Resende et al. (2006) encontraram dependência espacial para a maioria dos atributos de fertilidade do solo com uma célula amostral a cada 2,25 ha. Para a MOS, obteve-se dependência espacial, com amostragem em células de até 4,0 ha.

Um parâmetro da geoestatística que auxilia na definição do tamanho da célula amostral é o alcance, descrito como a distância a partir da qual as observações tornam-se independentes, sendo a distância máxima em que ainda se verifica dependência espacial entre os valores de um dado atributo (VIEIRA, 2000b). Para delimitar as dimensões das células da malha em amostragens futuras, Mulla e Mc Bratney (2000) sugerem usar valor correspondente de 25 % a 50 % do alcance.

Na região do Cerrado, especificamente, tem-se observado que o tamanho dos talhões de cultivo pode representar um entrave para o manejo da variabilidade espacial, pois suas dimensões são muito superiores às encontradas em propriedades agrícolas de outras regiões do Brasil e do exterior. Empresas prestadoras de serviços em agricultura de precisão no Cerrado têm utilizado malhas amostrais com células de 5 ha a 10 ha (RESENDE et al., 2006), embora a pesquisa ainda não tenha confirmado essa possibilidade.

Uma solução prática e viável, para reduzir os elevados custos de amostragens adensadas, consiste da utilização de mapas de produtividade e de condutividade elétrica, fotografias aéreas, histórico da área, características topográficas e uso de sensores, associados a amostragens direcionadas, para identificação de subáreas no talhão denominadas “zonas de manejo”. Busca-se que cada zona de manejo seja homogênea quanto aos aspectos de potencial produtivo, eficiência do uso de insumos e risco ambiental (LUCHIARI JÚNIOR et al., 2000). Assim, é possível implementar manejo diferenciado no talhão, conforme as diferentes zonas identificadas.

Exemplo disso é relatado por Varvel et al. (1999), ao perceberem que a mesma informação proporcionada por mapas criados a partir de amostragens em malha densa era obtida ao correlacionar a imagem de um solo nu com a distribuição da MOS e nutrientes. Vilela et al. (2007), fazendo uso de fotografias aéreas não-convencionais (tomadas com câmeras simples em vôos de baixa altitude) e análises não-supervisionadas (classificação automática da imagem por meio de programa computacional de SIG), chegaram à mesma conclusão para o atributo MOS (Fig. 1).

De acordo com Clay et al. (2004a), dois critérios para chegar ao manejo por zonas são: (1) agrupar áreas com resultados similares de análise de solo; e (2) agrupar áreas com produtividade similares. Para Dorge (1996), na identificação das zonas de manejo, deve-se agregar a avaliação de aspectos quantitativos e qualitativos, além de intuitivos/históricos (Tabela 1).

Entre as técnicas utilizadas na AP, o sensoriamento remoto é considerado o mais promissor em função da possibilidade de redução de custos na aquisição de dados e facilidade de processamento, podendo mostrar-se viável no reconhecimento de “manchas” de variabilidade. Mapas de teores de MOS, textura, umidade no solo, de infestação por doenças, pragas e plantas daninhas (CHANG et al., 2004), assim como de teores de clorofila em folhas (LUCHIARI JUNIOR et al., 2004), podem ser obtidos via sensoriamento remoto.

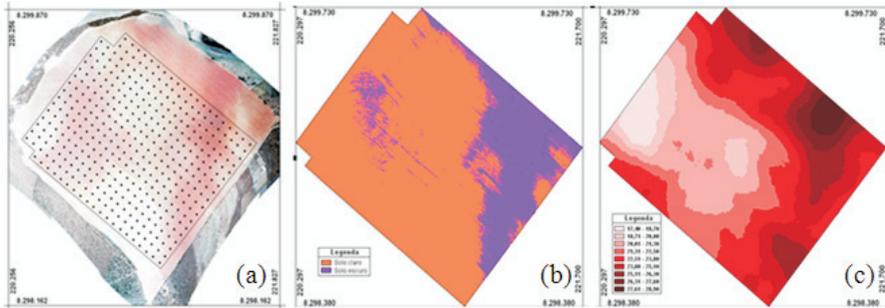


Fig. 1. Mosaico da cor do solo obtido por fotografia aérea não-conventional (a); imagem após classificação não-supervisionada da cor do solo (b); e mapa de MOS obtido com amostragem em malha regular e interpolação por krigagem (c).

Fonte: Adaptado de Vilela et al., 2007.

Tabela 1. Características para definição de locais onde o manejo por zonas pode ser utilizado.

Tipo de característica do local	Exemplos
Quantitativa, estável	Elevação/topografia, teor de MOS, pH, condutividade elétrica do solo, mapas de superfície de solo detalhados, curvas de nível, propriedades hidrológicas.
Quantitativa, dinâmica	Dados do monitor de colheita, densidade e distribuição de plantas daninhas, aparência ou temperatura do dossel, umidade do solo, <i>status</i> de N no solo ou na planta.
Qualitativa, estável	Cor do solo, nutrientes pouco móveis no solo, comportamentos de patógenos do solo ou pragas, profundidade do subsolo, estado de aeração e drenagem do solo.
Intuitiva/histórica	Conhecimento do agricultor sobre características do campo, comportamento das produtividades e histórico do campo, declividade e qualidade do solo, rotação com pastagens, comportamento da drenagem e atributos do subsolo.

Fonte: Adaptado de Dorge, 1996.

Diferentes tipos de dados podem ser obtidos por sensores a bordo de satélites. Há diferenças quanto à resolução espectral, espacial e temporal, horário de tomada da imagem e custos. Cabe destacar que, sensores de alta resolução espacial (ex.: satélite Ikonos) nem sempre são requeridos na solução dos problemas de campo (Fig. 2). Dalsted et al. (2003) e Clay et al. (2004b) destacam que a escolha do satélite deve ser baseada nas necessidades de resolução espacial, nas bandas espectrais utilizadas para acessar a variabilidade espacial, na viabilidade de uso da informação a campo, na necessidade de processamento dos dados, no custo e valor da informação obtida, e no tempo de aquisição da informação.

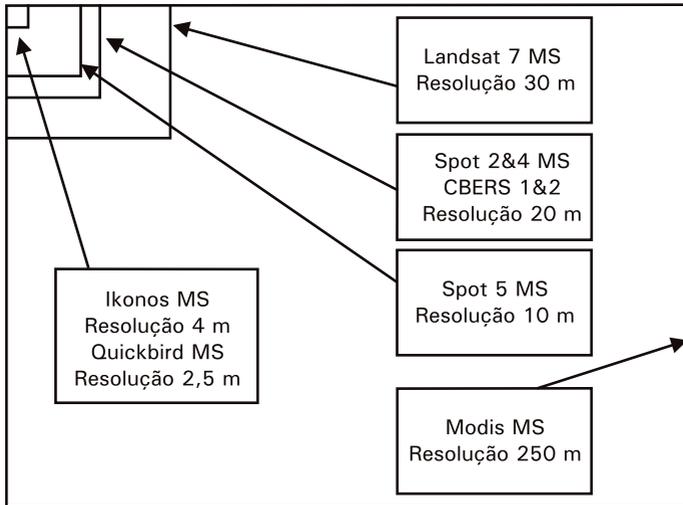


Fig. 2. Tamanhos relativos de pixel de sensores a bordo de alguns satélites.

Fonte: Adaptado de Dalsted et al., 2003.

Outra técnica utilizada na AP que merece destaque, e uma das mais validadas pela pesquisa, refere-se ao uso de monitores de produtividade para auxiliar na identificação das causas da sua variabilidade, definição de possíveis zonas de manejo e visualização do sistema de produção da fazenda como um todo (Fig. 3).

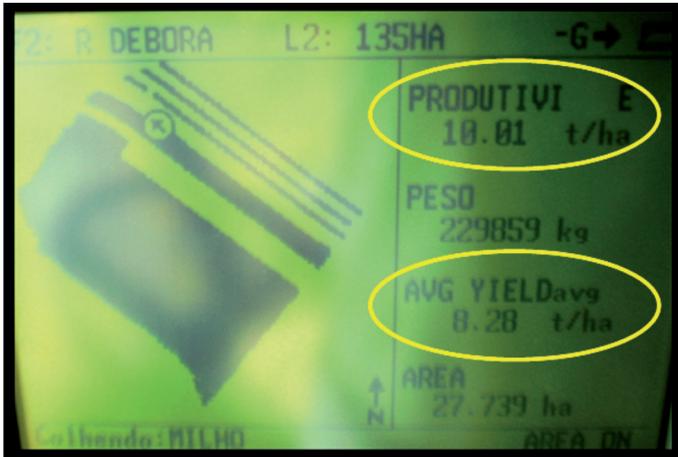


Fig. 3. Imagem da tela de um monitor de colheita, destacando a diferença entre as produtividades instantânea (acima) e média do talhão (abaixo).

Um dos maiores desafios para a agricultura de precisão está na obtenção de grande volume de dados a baixo custo. Nesse sentido, o desenvolvimento de sensores para o monitoramento em tempo real pode trazer vantagens nas avaliações dos atributos do solo (PIERCE; NOVAK, 1999). Porém, os mapas obtidos a partir desses dados não devem ser utilizados isoladamente, mas como parte do processo de decisão, dada a somatória de fatores que interagem no sistema solo-planta-atmosfera.

De acordo com Adamchuk (2006), a maioria dos sensores para o monitoramento de atributos do solo, em tempo real, envolve a utilização de métodos elétricos, eletromagnéticos, óticos, radiométricos, acústicos, pneumáticos, mecânicos ou eletroquímicos (Fig. 4), em que:

– Os sensores elétricos e eletromagnéticos medem a capacidade das partículas do solo em conduzir ou acumular cargas elétricas. A condutividade elétrica do solo pode ser mensurada dessa maneira. Sensores eletromagnéticos, também podem prover informações sobre a disponibilidade de nutrientes e pH do solo.

- Os sensores óticos e radiométricos utilizam a reflectância ou outro sinal proveniente do espectro eletromagnético para caracterizar o solo. Têm sido utilizados na quantificação dos teores de argila, MOS, conteúdo de água e CTC.
- Os sensores mecânicos podem ser usados para estimar a resistência mecânica do solo ou compactação, em avaliações de penetrometria.
- Os sensores acústicos e pneumáticos são usados na determinação da textura e densidade do solo por meio das mudanças nos níveis de ruído causado pela interação com as partículas do solo.

Entre esses diversos tipos de sensores, somente os elétricos e eletromagnéticos têm recebido maior atenção da pesquisa como potencial ferramenta para a agricultura de precisão (ADAMCHUK, 2006).

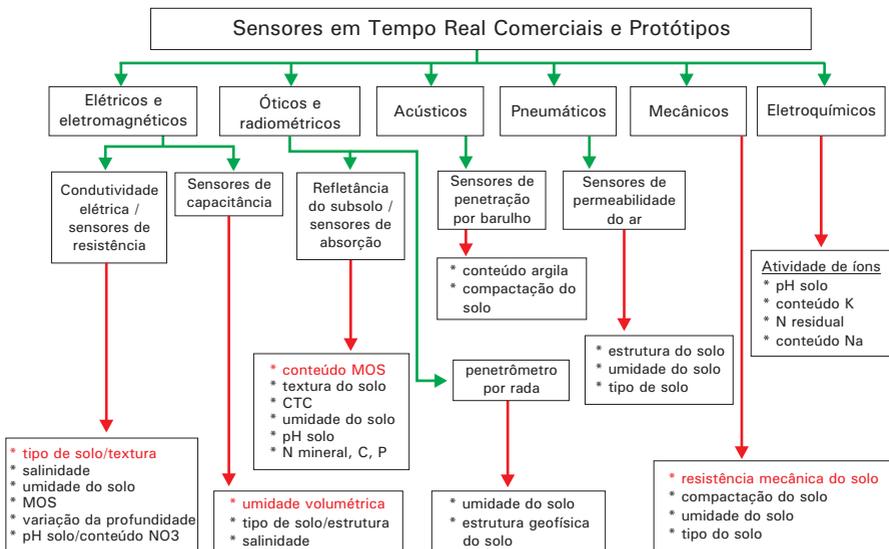


Fig. 4. Classificação dos sistemas sensores para o monitoramento de atributos do solo em tempo real. Atributos em vermelho são indicados como aplicações mais promissoras dos sensores de solo.

Fonte: Adaptado de Adamchuk, 2006.

Manejo Sítio-específico da Adubação Nitrogenada

Na agricultura de precisão, o manejo sítio-específico da adubação surge em contraposição à visão tradicional, que preconiza o manejo baseado nas condições médias da lavoura (MOLIN, 2001). Implica na adoção de tratamento diferenciado, segundo variações nas condições do campo (VERHAGEN, 1997), diminuindo a possibilidade de subdosagens ou superdosagens de fertilizantes, o que implicaria em condições de desenvolvimento não ideais da cultura, além de maiores possibilidades de perdas de nutrientes e poluição de águas subterrâneas e superficiais, sobretudo, com relação ao nitrogênio.

O dimensionamento do fornecimento de nitrogênio, de modo espacializado, pode resultar em maior eficiência de uso do N do solo, a qual é estimada, mundialmente, na média de 33 %, considerando os sistemas de produção de cereais (RAUN; JOHNSON, 1999). O manejo espacializado do nutriente, nas lavouras, se justifica também em função de outros aspectos: (a) ocorrência de variações de 30 % a 50 % nos índices de rendimento de grãos dentro dos talhões de cultivo (KITCHEN et al., 1995); (b) dependência espacial e influência do relevo no tocante aos teores de nitrato e de matéria orgânica no solo (FERGUNSON et al., 1995; VETSCH et al., 1995; MACHADO et al., 2004); (c) possibilidade de se utilizar mapas de colheita como ferramenta de predição das doses de adubo nitrogenado (KITCHEN et al., 1995, WELSH et al., 2003); (d) possibilidade de uso de técnicas de monitoramento dos teores de N nas folhas (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; ARGENTA et al., 2001); (e) chance de minimizar as perdas de N e aumentar a produtividade (BAILEY et al., 2001) e a lucratividade (LI; YOST, 2000) das lavouras.

O primeiro passo para o manejo sítio-específico do N deve focar o estudo do histórico do campo e a consideração dos possíveis efeitos da MOS, textura, drenagem e precipitação. De acordo com Vetsch et al. (1995), o manejo de N pode ser também influenciado pelo declive do terreno, em função das diferentes produtividades das culturas e aportes de N pelo solo conforme o relevo.

Para Schroder et al. (2000), recomendações baseadas simplesmente nas expectativas de produtividade são questionáveis, devendo-se atentar para o estado de fertilidade do solo e o potencial de mineralização nas diferentes áreas do talhão, tal como observado por Mahmoudjafari et al. (1997). Ainda, em razão da variabilidade espacial da disponibilidade de N em solos com elevado suprimento residual, adubações nitrogenadas podem não ter efeito, ou até mesmo diminuir o rendimento da cultura.

Dado que os teores de MOS, de nitrato e o rendimento de milho variam de uma parte para outra na lavoura, é conveniente espacializar a adubação nitrogenada, visto que esses fatores influenciam na dosagem de fertilizantes (MULLA; SCHEPPERS, 1997). Ferguson et al. (1996), observando mapas de recomendação de N para a cultura de milho, segundo a fórmula de cálculo proposta pela Universidade de Nebraska (p.13), observaram que os padrões exibidos nos mapas apresentavam alta correlação com os teores de nitrato e de matéria orgânica no solo, sendo necessárias menores taxas de adubação nitrogenada nas áreas com maior presença dessas fontes de N.

Numa simulação para as condições do Cerrado, Resende et al. (2007) tentaram relacionar a distribuição espacial dos teores de MOS e estimativas da necessidade de N para o milho numa lavoura comercial (Fig. 5), tomando como referência as indicações de adubação nitrogenada para a região (SOUSA; LOBATO, 2004b). O fornecimento de N pela fazenda foi uniforme no talhão (121 kg ha^{-1}). Contrariando as expectativas, foram observadas produtividades de grãos similares (de $10,9 \text{ t ha}^{-1}$ a $11,2 \text{ t ha}^{-1}$) em pontos contrastantes quanto ao teor de MOS e estimativa da necessidade de N na adubação (locais 1, 2 e 3). A ausência de resposta diferenciada foi atribuída à influência de condições climáticas favoráveis à mineralização, garantindo, em toda a área, suprimento de N condizente com o potencial produtivo do híbrido.

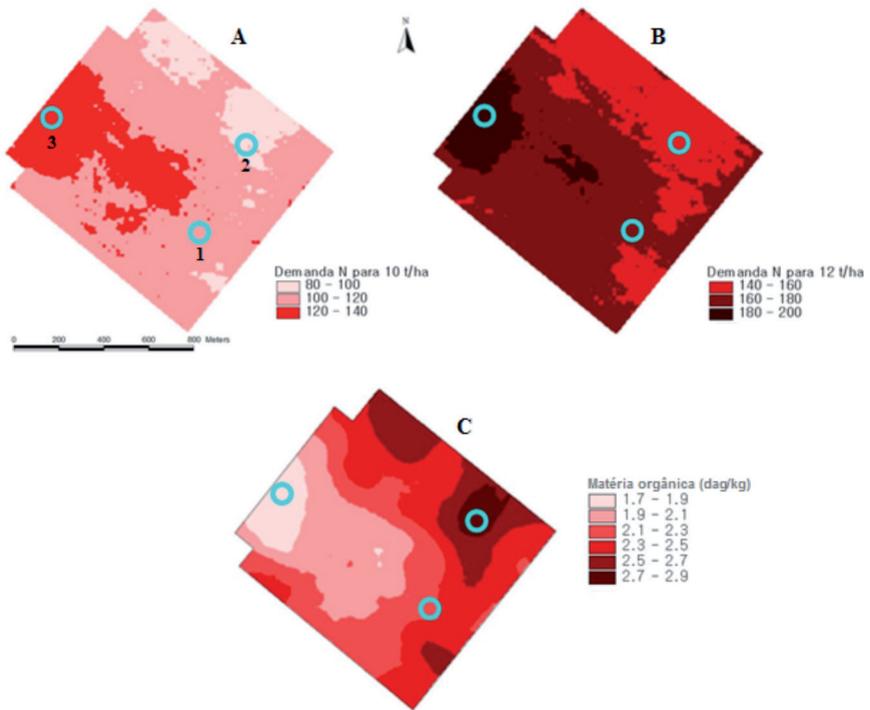


Fig. 5. Mapas de estimativas da necessidade de N na adubação (kg ha^{-1} de N) para expectativas de produtividade de milho de 10 t ha^{-1} (A) e 12 t ha^{-1} (B) de grãos, considerando a variação nos teores de MOS (C). Os círculos nos mapas indicam os locais de amostragem da produtividade do milho obtida em três zonas distintas.

Fonte: Adaptado de Resende et al., 2007.

Há, nos cerrados, a necessidade de ampla rede de experimentação (curvas de resposta) em diferentes situações. Depreende-se, portanto, a dificuldade de definição de padrões para o diagnóstico e manejo do nitrogênio e de respostas da cultura do milho, o que inviabiliza a simples extrapolação de informações e estratégias de manejo desenvolvidas em uma região para outra. Assim, o ideal é que o dimensionamento das adubações nitrogenadas seja baseado em dados e informações obtidos o mais regionalmente possível.

O comportamento do N pode mudar entre locais de cultivo e anos, além de variar em diferentes pontos de um mesmo talhão (KATSVAIRO et al., 2003). Nesse sentido, comparações de manejo da adubação, em taxas uniformes e variáveis, têm revelado poucas vantagens decorrentes da estratégia de aplicação de N na otimização da produtividade (SOGBEDJI et al., 2001). Os primeiros estudos em AP encontraram também, como limitações, a pouca e inconsistente redução nos teores de nitrato após colheita em resposta ao uso de doses variadas de N (FERGUSON et al., 1999; DORGE, 2001). Para melhorar a eficiência da experimentação em AP, Ferguson et al. (1999) sugeriram o uso de faixas experimentais com doses variadas de N, objetivando avaliar a resposta à adubação nas diferentes zonas de manejo (locais com potencial de produção distintos).

As limitações com relação à utilização de variáveis do solo, como critério para especialização da adubação nitrogenada, podem ser revertidas pelo uso de sensores, para avaliação do estado nutricional de N na planta, permitindo corrigir as deficiências ainda durante o período de desenvolvimento do milho. Métodos baseados na reflectância de luz para estimativa do conteúdo de clorofila na folha ou no dossel, para reconhecimento das condições de estresse, possibilitam a geração de mapas de recomendação de N em cobertura (LUCHIARI JUNIOR et al., 2004). Imagens aéreas também têm sido testadas na identificação das condições de suprimento de N às culturas. De acordo com Shanahan et al. (2001) citados por Luchiari Júnior (2004), índices de vegetação, baseados nas reflectâncias para as bandas verde e infravermelho próximo, têm se mostrado eficazes na determinação das variações espaciais do status de N em plantas de milho. Todavia, dificuldades relacionadas à presença de cobertura incompleta do solo pela cultura podem limitar a utilização de imagens aéreas para esse fim.

Teores elevados de N nos tecidos das plantas normalmente estão relacionados com níveis elevados de clorofila e altas taxas fotossintéticas (PIEKIELEK; FOX, 1992), sendo essas relações explicadas pelo fato de que 50 % a 70 % do nitrogênio total das folhas se encontram formando enzimas associadas aos cloroplastos

(CHAPMAN; BARRETO, 1997). As mudanças nos teores de clorofila, ocasionadas pela deficiência de N em folhas de milho, são detectadas pelos índices de reflectância (BLACKMER et al, 1996). Assinaturas espectrais específicas nos comprimentos de onda de verde (550 m a 580 m) e infravermelho próximo (700 m a 720 m) podem ser utilizadas na identificação das deficiências (ZHAO et al., 2003). As análises hiperspectrais realizadas por esses autores em milho indicaram que os teores de nitrogênio no dossel na planta inteira, nitrogênio em folha e clorofila em folha correlacionaram-se fortemente às reflectâncias de 554 m e 712 m; 575 m e 702 m e 554 m e 712 m, respectivamente. Contudo, as diferenças de reflectâncias, medidas em folhas de milho, que se encontram entre os estados de suficiência e de moderado estresse por N, podem não ser tão consistentes quanto às diferenças observadas quando se contrastam os estados de suficiência e de deficiência do nutriente (REUM; ZHANG, 2007).

As pesquisas, tanto nacionais como internacionais, têm indicado ao medidor portátil de clorofila (SPAD) como ferramenta promissora na avaliação do estado nutricional do milho em nitrogênio. No entanto, essa ferramenta pode ver-se inviabilizada quando avaliada a disponibilidade de N em escala comercial. Nesse sentido, sensores remotos multiespectrais, como o Crop Circle (Holland Scientific®) e o GreenSeeker, red e green (NTech®), têm sido testados, possibilitando leituras do teor relativo de clorofila em tempo real, assim como a confecção de mapas para a identificação de áreas com deficiência do nutriente, em diversos estádios vegetativos. Esses novos sensores apresentam, ainda, a possibilidade de interagir com sensores para a aplicação de N em taxa variada, corrigindo as deficiências do nutriente em tempo real. Esses sensores apresentam, por sua vez, como principal limitação a menor sensibilidade para doses crescentes do adubo nitrogenado, e dependendo do sensor utilizado, há pouca sensibilidade na diferenciação do estado nutricional do nutriente entre estádios vegetativos (SHAVER et al, 2007). No Brasil, essas ferramentas encontram-se ainda em fase incipiente.

Uso do Clorofilômetro Portátil como Indicador da Necessidade de N para o Milho

Uma grande vantagem das medidas da reflectância espectral de folhas é viabilizar com rapidez, facilidade e baixo custo uma alternativa para se detectar o estado nutricional de N em milho. Nesse sentido, foram desenvolvidos os medidores de clorofila portáteis, cujas leituras apresentam boas correlações com o teor foliar de N da planta. Entre outros, têm-se os que utilizam medidas de fluorescência da clorofila induzida por laser (SCHACHTL et al., 2005) e o Soil-Plant Analysis Development – Spad (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; BLACKMER; SCHEPERS, 1995). O Spad mede, como um índice de verde ou concentração relativa de clorofila, a diferença de luz transmitida na folha por meio de dois detectores nos comprimentos de 650 nm e 940 nm. A luz transmitida a 650 nm (luz vermelha) está associada aos comprimentos de onda das clorofilas a e b (645 nm e 663 nm, respectivamente), não sendo influenciada pelos carotenóides, enquanto a transmitida a 940 nm (infravermelho próximo) serve como medida de ajuste para as condições de umidade e espessura de folha (MINOLTA CAMERA CO. LTDA., 1989; BLACKMER; SCHEPERS, 1995; WASKOM et al., 1996).

No Brasil, o Spad tem sido o clorofilômetro mais testado, sendo utilizado experimentalmente na avaliação do estado nutricional de N em milho (ARGENTA et al., 2001; ARGENTA et al., 2004; GODOY et al., 2007); em feijão (SILVEIRA et al., 2003; SORATTO et al., 2004); e em algodão (NEVES et al., 2005). As recomendações gerais, para o milho, indicam a tomada de 10 a 30 leituras em 5 a 30 plantas, realizando a medida no terço médio da primeira folha completamente expandida a partir do ápice e considerando para registro a média dos valores lidos (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; VARVEL et al., 1997; ARGENTA et al., 2001).

As avaliações dos teores relativos de clorofila apresentam como vantagem adicional o fato de as leituras não serem influenciadas pelo consumo de luxo de N, o qual, nessa situação, acumula-se na forma de

nitrito nas plantas (SCHEPERS et al, 1992; BLACKMER; SCHEPERS, 1994). Ou seja, as leituras do clorofilômetro são relacionadas ao N que foi efetivamente metabolizado, e que, conseqüentemente, modula o potencial de produção da cultura. As desvantagens, por sua vez, referem-se ao fato de não diagnosticar o excesso de N no sistema solo/planta, assim como a interferência nas leituras por possíveis fatores causadores de clorose (deficiências de S, Mn) ou doenças.

Uma limitação para o caso do milho é que as leituras do clorofilômetro realizadas em estádios iniciais (prévios ao V6, estágio de seis folhas totalmente desenvolvidas) podem não ser consistentes para o diagnóstico nutricional de N, conforme reportado por Waskom et al. (1996) e Argenta et al. (2002). Assim sendo, esse condicionante restringe a possibilidade de intervenção no manejo para aplicação de N em cobertura ainda no início do ciclo, no período ideal para a máxima resposta da cultura. Todavia, tal limitação não foi confirmada nos resultados encontrados por Hurtado (2008) em lavoura no Cerrado, onde as leituras Spad permitiram detectar condição de deficiência de N desde o estágio V4, exibindo boa correlação ($r = 0,79^*$) com a produtividade de grãos (Fig. 6).

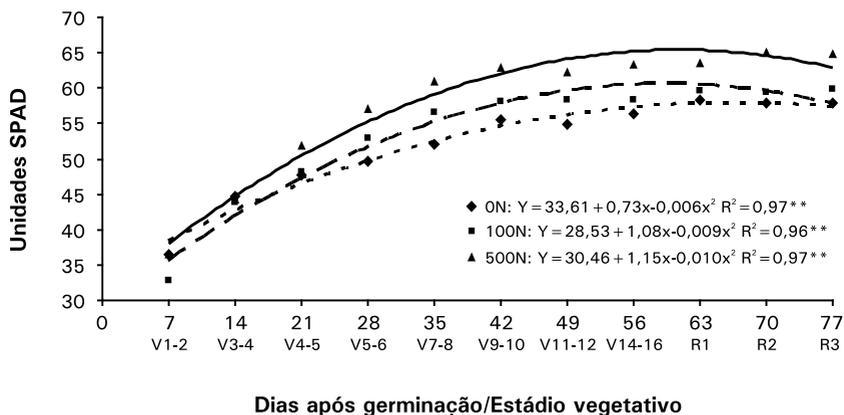


Fig. 6. Teores relativos de clorofila (unidades Spad), em função do estágio fenológico do milho sob diferentes condições de suprimento de N aplicado em cobertura. Planaltina de Goiás, GO.

Fonte: Hurtado, 2008.

Cabe destacar que as medidas do clorofilômetro podem variar não só com o estágio fenológico (SMEAL; ZHANG, 1994; VARVEL et al., 1997; ARGENTA et al., 2004), mas também conforme o local de tomada de leitura na folha (SCHEPERS et al., 1992) e dependendo do híbrido utilizado (ARGENTA et al., 2001). Na Fig. 7, tem-se um exemplo de variação nos teores relativos de clorofila, em função do híbrido de milho utilizado, para uma mesma condição de fertilidade do solo e manejo da adubação (21 kg ha^{-1} de N no plantio e 100 kg ha^{-1} de N em cobertura). Observa-se que as leituras variaram de 56 a 61 unidades Spad, que alerta para a dificuldade de se indicar valores de referência extrapoláveis para situações diversas. No caso em questão, a ausência de correlação das leituras Spad com a produtividade pode ser atribuída ao comportamento distinto dos híbridos, quanto à demanda de N ou ao potencial de rendimento de grãos.

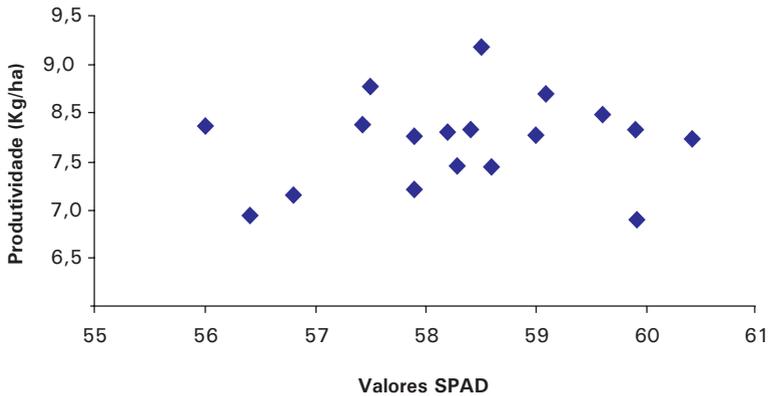


Fig. 7. Teores relativos de clorofila (valores Spad) no florescimento e produtividade de grãos de dezoito híbridos de milho. Planaltina de Goiás, GO.

Visto que numerosos fatores afetam a demanda e a resposta ao nitrogênio em cobertura, a dose requerida não poder ser definida de forma direta com base apenas na leitura do clorofilômetro (CANTARELLA; DUARTE, 2004), o que representa um entrave ao seu uso pelos agricultores. Todavia, o estabelecimento de parcelas de referência, na propriedade, com N abundantemente fornecido, de forma a garantir que o suprimento do nutriente não seja limitante,

constitui uma maneira de contornar a ausência de significado direto das leituras com o clorofilômetro (SCHEPERS et al., 1992). Esses autores evidenciaram que menores produtividades estavam associadas a leituras abaixo de 95 % do valor obtido nas parcelas de referência. Não obstante, a extrapolação das leituras para condições de lavoura, visando o manejo sítio-específico da adubação, mostrou dificuldades quanto ao número de leituras por grade amostral necessárias para caracterizar a variabilidade espacial e temporal do estado nutricional das plantas (SCHEPERS et al., 1992).

Considerações Finais

As tentativas de controlar fatores associados ao aproveitamento do nitrogênio que afetam a produtividade do milho passam pela busca de melhores estratégias de fornecimento do nutriente, considerando a quantidade e a época de aplicação mais apropriadas às condições de solo e ao potencial de produção das lavouras.

No Brasil, são ainda relativamente poucos os trabalhos que avaliam o uso do clorofilômetro na cultura de milho, e quase inexistentes os que tentam empregar suas leituras na identificação de zonas contrastantes de disponibilidade de N nos talhões de cultivo. Além disso, não se dispõe de uma rede abrangente de experimentação com adubação nitrogenada em campos de produção, por meio da qual se poderia gerar recomendações mais confiáveis.

A grande variabilidade espacial e temporal do N, verificada em termos de dinâmica e de resposta das culturas à adubação, torna esse nutriente de especial interesse quando se pensa em agricultura de precisão, sobretudo ao se contabilizar as implicações econômicas e ambientais do uso de fertilizantes nitrogenados. Dadas as restrições técnicas, operacionais ou de custo dos métodos tradicionalmente voltados para o diagnóstico e recomendação de N, o emprego de sensores tem futuro promissor na identificação de deficiências e na sua correção por meio do manejo diferenciado da adubação de cobertura (manejo sítio-específico ou adubação a taxas variáveis).

Referências

- ADAMCHUK, V. I. Characterizing soil variability using on-the-go sensing technology. In: Potash & Phosphate Institute. **Site specific management guidelines**. Georgia, n. 44, 2006. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 15 maio 2007.
- ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, G.E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J.M.; VIEIRA, J.R.; LOUREIRO, J.E. Milho. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 314-316.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 26, p. 241-248, 2002.
- ARAUJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 8, p. 771-777, 2004.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; SANGOI, L. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1379-1387, 2004.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; MIELNICZUK, J.; BERTOLINI, C. G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 519-527. 2002.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 158-167, 2001.
- BAILEY, J. S.; WANG, K.; JORDAN, C.; HIGGINS, A. A. Use of precision agriculture technology to investigate spatial variability in nitrogen yields in cut grassland. **Chemosphere**, v. 42, p. 131-140, 2001.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 235-239, 1997.
- BERNARDES, L. F. A management program for 16 000 kg/ha corn. **Better Crops International**, Atlanta, v. 5, p. 6-7, 1989.
- BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. de A. ; FREITAS, P. L.; COELHO, M. R.; LEANDRO, W. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; OLIVEIRA, R. P. de; SANTOS, H. G. dos; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. C. S. **Correção do solo e adubação no sistema de plantio direto nos cerrados**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 22 p. (Embrapa Solos. Documentos, 46).

BINDER, D. L.; SANDER, D. H.; WALTERS, D. T. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 1228-1236, 2000.

BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; CAMARGO, F. A. O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. 328 p.

BLACKMER, M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, p. 1791-1800, 1994.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S.; VARVEL, G. E.; WALTER-SHEA, E. A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, v. 88, p.1-5, 1996.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor N status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, p. 56-60, 1995.

BURLE, M. L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, v. 190, p. 309-316, 1997.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 366 p.

CHANG, J.; CLAY, S. A.; CLAY, D. E.; DALSTED, K. Detecting weed-free and weed-infested areas of a soybean field using near-infrared spectral data. **Weed Science**, v. 52, p. 642-648, 2004.

CHAPMAN, S. C.; BARRETO, H. J. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. **Agronomy Journal**, v. 89, p. 557-562, 1997.

CHITOLINA, J. C.; PRATA, F.; SILVA, F. C.; MURAOKA, T.; VITTI, A.C. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de solo para análise de fertilidade. In: SILVA, F. C. da (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. p. 13-48.

CLAY, D. E.; CARLSON, C. G.; CHANG, J. Determining the "best" approach to identify nutrient management zones: a south Dakota example. In: Potash & Phosphate Institute. **Site specific management guidelines**. Georgia, n. 41, 2004a. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 16 março 2007.

CLAY, S. A.; CHANG, J.; CLAY, D. E.; REESE, C. L.; DALSTED, K. Using remote sensing to develop weed management zones in soybeans. In: Potash & Phosphate Institute. **Site**

specific management guidelines. Georgia, n. 42, 2004b. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 10 maio 2007.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. de; LOPES, A. S.; ALVARES, V. V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 249-290.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: Núcleo Regional Sul: Embrapa, 1995. 223 p.

CONAB. **Oitavo levantamento de avaliação da safra 2006/2007**. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/8_levantamento_mai2007.doc>. Acesso em: 10 maio 2007.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1991. 900 p.

CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; ALVARENGA, R.C.; GONTIJO NETO, M.M.; VIANA, J.H.M.; OLIVEIRA, M.F. de; SANTANA, D.P. Manejo da cultura do milho em sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 233, p. 42-53, jul-ago. 2006.

DALSTED, K.; PARIS, J. F.; CLAY, D. E.; CLAY, S. A.; REESE, C. L.; CHANG, J. Selecting the appropriate satellite remote sensing product for precision farming. In: POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. **Site specific management guidelines**. Georgia, n. 40, 2003. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 10 abr. 2007.

DOBERMANN, A. Estratégias de manejo para alta produtividade de milho e soja nos Estados Unidos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 113, p.6-7, mar. 2006.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L.; MANFRON, P. A.; PALHARES, M.; VIEIRA JÚNIOR, P. A. População e distribuição espacial de plantas de milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Org.). **Milho: estratégias de manejo para alta produtividade**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2003. p. 116-133.

DORGE, T. A. Variable-rate nitrogen management for corn production – Success proves elusive. In: Potash & Phosphate Institute. **Site specific management guidelines**. Georgia, n.36, 2001. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 10 abril 2007.

DORGE, T. A. Management zone concepts. In: Potash & Phosphate Institute. **Site specific management guidelines**. Georgia, n. 2, 1996. Disponível em: <www.ppi-far.org/ssmg>. Acesso em: 10 março 2007.

DURÃES, F. O. M. **Limitações fisiológicas do milho nas condições de plantio nas regiões tropicais baixas**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2007_1/limitemilho/index.htm>. Acesso em: fev 2007.

EMBRAPA CERRADOS. **Conhecimento, tecnologia e compromisso ambiental**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 43 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 4).

FANCELLI, A. L. Estratégias de manejo para alta produtividade de milho no Brasil. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 113, p. 2-3, mar. 2006.

FANCELLI, A. L. Milho: ambiente e produtividade. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). **Milho: estratégias de manejo para alta produtividade**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2003. p. 174-208.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. 2007. <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 14 jun. 2007.

FERGUSON, R. B.; CAHOON, J. E.; HERGERT, G. W.; PETERSON, T. A.; GOTWAY, C. A.; HARTFORD, A. H. Managing spatial variability with furrow irrigation to increase nitrogen use efficiency. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1995, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1995. p. 443-464.

FERGUSON, R. B.; GOTWAY, C. A.; HERGERT, G. W.; PETERSON, T. A. Soil sampling for site-specific nitrogen management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. p. 13-22.

FERGUSON, R. B.; HERGERT, G. W.; SCHEPERS, J. S.; CRAWFORD, C. A. Site-specific nitrogen management of irrigated corn. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 4., 1999, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1999. p. 733-743.

FRANK, K. D.; ROETH, F. W. Using soil organic matter to help make fertilizer and pesticide recommendations. In: MAGDOFF, F. R.; TABATABAI, M. A.; HANLON JR., E. A. (Ed.). **Soil organic matter: analysis and interpretation**. Wisconsin: Soil Science Society of America, 1996. p. 33-40.

FREIRE, F. M.; VASCONCELLOS, C. A.; FRANÇA, G. E. de. Manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 49-62, 2000.

GODOY, L. J. G. de; SOUTO, L. S.; FERNANDES, D. M.; VILLA BÔAS, R. L. Uso do clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada para milho em sucessão a pastagem de *Brachiaria decumbens*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 38-44, 2007.

HOFMAN, G.; CLEEMPUT, O. van. **Soil and plant nitrogen**. Paris: IFA, 2004. 29 p.

HURTADO, S. M. C. **Uso do clorofilômetro e de agricultura de precisão no manejo da adubação nitrogenada do milho**. 2008. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

KATSVAIRO, T. W.; COX, W. J.; VAN ES, H. M.; GLOS, M. Spatial yield response of two corn hybrids at two nitrogen levels. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 1012-1022, 2003.

KITCHEN, N. R.; HUGHES, D. F.; SUDDUTH, K. A.; BIRRELL, S. J. Comparison of variable rate to single rate nitrogen fertilizer application: corn production and residual soil $\text{NO}_3\text{-N}$. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1995, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1995. p. 427- 439.

LI, M.; YOST, R. S. Management-oriented modeling: optimizing nitrogen management with artificial intelligence. **Agricultural Systems**, v. 65, p. 1-27, 2000.

LOPES, A. S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 115 p.

LOPES, A. S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. 162 p.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 130 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SILVA, A. D.; BUSCHINELLI, C. C. A.; HERMES, L. C. CARVALHO, J. R. P.; SHANAHAN, J.; SCHEPERS, J. S. Agricultura de precisão e meio ambiente. In: MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 19-36.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHAPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE-SITE ESPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings...** Bloomington: ASA/CSSA;SSSA/ASAE, 2000. p. 475-484.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 209 p.

MAHMOUDJAFARI, M.; KLUITENBERG, G. J.; HAVLIN, J. L.; SCHWAB, A. P. Spatial variability of nitrogen mineralization at field scale. **Soil Science Society America Journal**, v. 61, p. 1214-1221, 1997.

MARQUES JUNIOR, J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. da. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA, 1998. p. 31-70.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZANANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 3, p. 207-248, 2003.

MINOLTA CAMERA CO. LTDA. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka, Minolta, Radiometric Instruments divisions, 1989. 22 p.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ: USP, 2001. 83 p.

MOREIRA, F. M de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, 2006. 729 p.

MULLA, D. J.; Mc BRATNEY, A. B. Soil spatial variability. In: SUMMER, M. E. **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. A 321-352.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. In: **The state of Site-specific management for agriculture**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1997. p. 1-18.

NEVES, O. S. C. et al. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 517-521, 2005.

OLIVEIRA, S. A. de Análise foliar. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 2. ed. p. 245-256.

PIEKIELEK, W. P.; FOX, R. H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. **Agronomy Journal**, v. 84, p. 59-65, 1992.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 67, p. 1-85, 1999.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F. da; ARGENTA, G.; SANGOI, L. Parâmetros de planta para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada de cobertura em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1637-1645, 2004.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357-363, 1999.

RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E.; LOPES, A. S.; COSTA, L. M. Management Systems in Northern South America. In: PETERSON, G. A.; UNGER, P. W.; PAYNE, W. A. (Org.).

Dryland agriculture. 2. ed. Madison, Wisconsin: ASA/CSSA/SSSA, 2006. p. 427-525.

RESENDE, A. V.; HURTADO, S. M. C.; SHIRATSUCHI, L. S.; CORAZZA, E. J.; SILVA, C. A.; PALUDO, V. Mapeamento da matéria orgânica do solo e da produtividade das culturas como subsídio ao manejo sítio-específico da adubação nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: SBCS, 2007.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; SENA, M. C.; KRAHL, L. L.; OLIVEIRA, J. V. F.; CORRÊA, R. F.; ORO, T. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro – SP. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2006. CD-ROM.

REUM, D.; ZHANG, Q. Wavelet based multi-spectral image analysis of maize leaf chlorophyll content. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, p. 60-71, 2007.

SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS, 1999. p. 267-319.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variada de fertilizantes e sementes. In: BORÉM, A. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 109-145.

SCHARF, P. C.; WIEBOLD, W. J.; LORY, J. A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 435-441, 2002.

SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, p. 2173-2187, 1992.

SCHACHTL, J.; HUBER, G.; MAIDL, F. X.; STICKSEL, E.; SCHULZ, L.; HASCHBERGER, P. Measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, v. 6, p. 143-156, 2005.

SCHRODER, J. J.; NEETESON, J. J.; OENEMA, O.; STRUIK, P. C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, v. 66, p. 151-164, 2000.

SHAVER, T. M.; WESTFALL, D. G.; KHOSLA, R. Remote sensing of corn N status with active sensors. In: WESTERN NUTRIENT MANAGEMENT CONFERENCE, 2007, Salt Lake City – UT. **Proceedings...** Salt Lake City, 2007. v. 7, p. 78-84.

SILVA, P. R. F. da.; STRIEDER, M. L.; COSER, R. P. da S.; RAMBO, L.; SANGOI, L.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E. L.; SILVA, A. A. da. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, p. 487-492, 2005.

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; CARMO, C. A. F. S.; VALENCIA, L. I. O.; ANDRADE, A. G.; MEIRELLES, M. S. **Amostragem de solo em área de soja sob plantio direto**: uso de técnicas de agricultura de precisão. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 8 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 10).

SILVA, P. R. F. da; ARGENTA, G.; REZERA, F. Resposta de híbridos de milho irrigado à densidade de plantas em três épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 585-592, 1999.

SILVA, C. A.; VALE, F. R.; GUILHERME, L. R. G. Efeito da calagem na mineralização do nitrogênio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 471-476, 1994a.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 541-547, 1994b.

SILVEIRA, P. M. da; BRAZ, A. J. B. P.; DIDONET, A. D. Uso de clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1083-1087, 2003.

SIMS, J. T.; VASILAS, B. L.; GARTLEY, K. L.; MILLIKEN, B.; GREEN, V. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the Atlantic Coastal-Plain. **Agronomy Journal**, v. 87, p. 213-222, 1995.

SMEAL, D.; ZHANG, H. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, v. 25, p. 1495-1503. 1994.

SOGBEDJI, J. M.; VAN ES, H. M.; KLAUSNER, S. D.; BOULDIN, D. R.; COX, W. J. Spatial and temporal process affecting nitrogen availability at the landscape scale. **Soil & Tillage Research**, v. 58, p. 233-244. 2001.

SORATTO, R. P.; CARVALHO, M. A. C. de; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 895-901, 2004.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004a. p. 81-96.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004b. p. 129-145.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004c. p. 283-315.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência no cerrado. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 25., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2000.

SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; SOBRINHO, T. A.; FEDATTO, E.; ZANON, G. D.; HASEGAWA, E. K. B. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade do milho em plantio irrigado. **Revista Brasileira de Milho e sorgo**, v. 2, p. 55-62, 2003.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496 p.

VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1233-1239, 1997.

VARVEL, G. E.; SCHLEMMER, M. R.; SCHEPERS, J. S. Relationship between spectral data from aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 1, p. 291-300, 1999.

VERHAGEN, J. **Spatial soil variability as a guiding principle in nitrogen management**. 1997. 109 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Wageningen, Wageningen.

VETSCH, J.A.; MALZER, G.L.; ROBERT, P.C.; HUGGINS, D.R. Nitrogen specific management by soil condition: managing fertilizer nitrogen in corn. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. (Ed.). INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1995, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1995. p. 465-473.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BOREM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2000a. p. 93-108.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de., ALVAREZ, V. H., SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2000b. v. 1, p. 1-54.

VILELA, M. F.; HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V. de; SHIRATSUCHI, L. S.; FONTES, J. R. A. Mapeamento de zonas contrastantes de matéria orgânica por meio de fotografias aéreas não-convencionais. In: ENCONTRO DE JOVENS TALENTOS DA EMBRAPA CERRADOS, 3., 2007, Planaltina, DF. **Resumos apresentados**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. p. 68. (Embrapa Cerrados. Documentos, 176).

VITTI, G. C.; TEIXEIRA, L. H. B.; BARROS JÚNIOR., M. C. Diagnóstico da fertilidade do solo e adubação para alta produtividade de milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). **Milho: estratégias de manejo para alta produtividade**. Piracicaba: ESALQ/LPV, 2003. p. 174-197.

WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G.; SPELLMAN, D. E.; SOLTANPOUR, P. N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, p. 545-560, 1996.

WELSH, J. P.; WOOD, G. A.; GODWIN, R. J.; TAYLOR, J. C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S. M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals. Part I: Winter barley. **Biosystems Engineering**, v. 84, p. 481-494, 2003.

ZHAO, D.; RAJA REDDY, K.; KAKANI, V. G.; READ, J. J.; CARTER, G. A. Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. **Plant and Soil**, v. 257, p. 205-217, 2003.

Precision Agriculture: possibilities of nitrogen management for maize in the Cerrado Region

Abstract

Attaining high maize yields requires knowledge about the factors affecting maize production and the particularities of each field, mainly those related to soil fertility attributes. Nitrogen (N) fertilization is one of the most important variables influencing maize yield potential expression and the optimization of N use is a target for precision agriculture (PA). Application of some PA techniques is promising in Brazil, specially in farming systems of the Cerrado Region. This review presents some aspects related to maize production in the Cerrado, with emphasis on the nitrogen availability and the use of chlorophyll meter as a tool for improving fertilization efficiency.

Index terms: nitrogen, top-dressing, no till, site-specific management, spatial variability, management zones.