



ARTIGO DE REVISÃO

Absorção, metabolismo e diagnóstico do estado de nitrogênio em plantas de batata

Uptake, metabolism and diagnostic of nitrogen nutritional status of potato plants

Heder Braun^{1*}
Fabrício Silva Coelho²
Marcelo Cleón de Castro Silva³
Paulo Cezar Rezende Fontes⁴
Paulo Roberto Cecon⁵
Camilo Busato⁶

¹Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Cidade Universitária Paulo VI, s/n, Tirirical, 65054-970, São Luís, MA, Brasil

²Universidade Federal de Lavras – UFLA, Departamento de Agricultura, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

³Universidade Federal do Pará – UFPA, Bairro de São Sebastião, 68370-000, Altamira, PA, Brasil

⁴Universidade Federal de Viçosa – UFV, Departamento de Fitotecnia, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

⁵Universidade Federal de Viçosa – UFV, Departamento de Estatística, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

⁶Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Centro de Ciências Agrárias, 29500-000, Alegre, ES, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: hederbraun@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Solanum tuberosum L.
Nutrição mineral
Metabolismo do nitrogênio
Índices fisiológicos e de nitrogênio

KEYWORDS

Solanum tuberosum L.
Mineral nutrition
Nitrogen metabolism
Physiological and nitrogen indexes

RESUMO: Esta revisão visa a abordar as regulações metabólicas relacionadas a absorção e assimilação do nitrogênio (N), bem como mencionar parâmetros da planta (índices fisiológicos ou agrônômicos) que possam ser utilizados como indicadores do estado de N na cultura da batata, para prever a necessidade de adubação nitrogenada em cobertura. Também foi mencionado o correto manejo dos fertilizantes para obtenção da produtividade ótima ou próxima da ótima, com o objetivo de gerar uma agricultura sustentável. Na agricultura de precisão, o diagnóstico do estado de N precisa ser realizado em tempo real. O elevado consumo e o ineficiente uso dos fertilizantes nitrogenados continuam ser um problema na cultura da batata. O N é absorvido na forma de NO_3^- e NH_4^+ , e incorporado em aminoácidos nas raízes e na parte aérea. O NO_3^- é assimilado por duas enzimas: NR e NiR, que catalisam a redução do NO_3^- a NO_2^- e do NO_2^- para a NH_4^+ , respectivamente. Após a redução, o metabolismo do N contém dois caminhos: um para a GS e outro para a GOGAT, utilizando como fonte de N a glutamina. A otimização do manejo do N para cada cultivar é importante para maximizar a produtividade e a qualidade de tubérculos. O status de N das plantas de batata pode ser estimado por meio da análise de N na matéria seca. Alternativamente, podem-se utilizar procedimentos rápidos, como o teor de NO_3^- no pecíolo, os índices SPAD e Dualex®, a tabela de cor e os índices fisiológicos para avaliação do estado de N nas plantas de batata.

ABSTRACT: In this short review, we address the metabolic regulations related to nitrogen (N) uptake and assimilation, as well as the plant parameters (physiological indexes or agronomics) that can be used as indicators of N level in potato crop to predict the necessity of N supply in top-dressing. Also, we mention the correct fertilizer management to obtain optimum yield aiming to create sustainable agriculture. In precision agriculture, diagnosis of nitrogen nutritional status needs to be given in real time. The high and inefficient use of N fertilizer remains a problem in potato cultivation. N is absorbed as NO_3^- or NH_4^+ and it is assimilated into aminoacids in roots and shoots. The nitrate assimilatory pathway is mediated by two enzymes, nitrate reductase (NR) and nitrite reductase (NiR), which catalyze the reduction of NO_3^- to NO_2^- and NO_2^- to NH_4^+ , respectively. After reduction, N metabolism follows two pathways: one for glutaminase synthase (GS) and another for glutamate synthase (GOGAT), using glutamine as the sole N source. Optimizing N management for each cultivar is critically important to maximize the yield and quality of tubercles. The N status of potato plant can be estimated by the analysis of N in the dry matter. Alternatively, the N status of potato plant may be assessed by quick procedures such as petiole NO_3^- sap, chlorophyll meter readings (SPAD index and Dualex®), leaf color chart, and physiological indexes for N status evaluation.

1 Introdução

O nitrogênio (N) é constituinte principal dos nucleotídeos, aminoácidos e proteínas, e por isto é essencial à vida. Os amonoácidos representam cerca de 2% do conteúdo de N total em folhas de batata (KOCH et al., 2003). O N destaca-se dentre os nutrientes necessários ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, por afetar positivamente seu crescimento vegetativo (YIN et al., 2003; COELHO et al., 2012). A baixa disponibilidade de N na camada arável do solo, somada à grande demanda pelas plantas, faz com que este elemento seja um dos nutrientes mais limitantes à produtividade em plantas de batata. Assim, para corrigir essa limitação, é necessária a adição de determinada quantidade de fertilizante nitrogenado, suficiente para assegurar a produtividade máxima ou próxima da ótima.

Há crescente preocupação com as perdas ambientais do N nos sistemas de produção de batata. O N é fornecido às plantas pelos produtores de forma subjetiva, ou seja, em anos cujo índice pluviométrico excede a média, maior fornecimento de N é realizado; por outro lado, em anos com baixo índice pluviométrico, menor quantidade de N é fornecida. No entanto, tem sido constatado que, aproximadamente, de 48 a 77% do N aplicado no solo é aproveitado pelas plantas de batata, sendo o restante perdido por imobilização, volatilização (N_2 e NH_3) e lixiviação para as águas subterrâneas (ZEBARTH et al., 2009). Diante disso, tais perdas de N podem ter efeitos adversos para a saúde humana e animal, e contribuir para o aquecimento global e a destruição de camada de ozônio (ZEBARTH et al., 2009). No entanto, uma melhoria na eficiência de aplicação do N pode ser alcançada pela sincronização da demanda da planta com o suprimento de N durante o ciclo da batateira (MOREIRA et al., 2011).

Nesse contexto, grande avanço tem sido feito para melhorar a Eficiência do Uso do N (EUN), a qual é definida como unidade de produção de matéria seca por unidade de N aplicado ($kg\ kg^{-1}$ de N). O manejo adequado do N com o propósito de maximizar a EUN é altamente desejável. Para tanto, Zebarth et al. (2009) relataram que boas práticas de manejo do fertilizante nitrogenado são desenvolvidas para otimizar a produtividade e a qualidade dos tubérculos, e diminuir as perdas do nutriente, bem como a poluição ambiental. É, pois, fundamental que se saiba quando e quanto de N deve ser aplicado ao solo para garantir a produtividade esperada realizada pelo prognóstico. Zebarth e Milburn (2003) citaram que, para melhorar o aproveitamento dos fertilizantes nitrogenados e reduzir as perdas de N para águas subterrâneas, é preciso o entendimento da dinâmica do N no solo, bem como a compreensão da resposta da planta à aplicação de N.

A maioria dos solos brasileiros apresenta limitada liberação de N ao longo do ciclo das culturas. Essa baixa disponibilidade é explicada pelo fato de, aproximadamente, 98% do N presente no solo estar na forma orgânica (não disponível), sendo pequena parte mineralizada pela microbiota do solo durante o ciclo de determinada cultura (ALFAIA, 2006). O N-orgânico, pelo processo de mineralização, resulta na formação de amônio (NH_4^+), pelo processo de amonificação, e de nitrato (NO_3^-), pelo processo de nitrificação. A mineralização é a transformação

biológica do N-orgânico do solo em N-inorgânico, executada pelos microrganismos heterotróficos do solo.

Esta revisão visa a abordar as principais regulações metabólicas relacionadas a absorção e assimilação do N nas plantas, além de mencionar os índices fisiológicos ou agrônômicos que possam ser utilizados como indicadores do *status* de N na cultura, para prever a necessidade de adubação nitrogenada em cobertura. Também foi mencionado o correto manejo dos fertilizantes para obtenção da produtividade ótima ou próxima da ótima, com o objetivo de gerar uma agricultura sustentável.

2 Absorção do N

A batateira extrai grande quantidade de N do solo, variando de 64 a 122 $kg\ ha^{-1}$ (BRAUN et al., 2011). As plantas absorvem o N inorgânico presente no solo, principalmente nas formas de NO_3^- e NH_4^+ , que são as formas predominantes de N mineral disponível às plantas. Estes íons são utilizados para manter o balanço iônico interno. Para tal, a H^+ -ATPase (bomba de H^+) excreta prótons (H^+) ou hidroxilas (OH^-) que modificam, diferentemente, o pH da rizosfera, implicando na disponibilidade diferenciada de diversos íons, principalmente os micronutrientes, dependendo da fonte absorvida – NH_4^+ ou NO_3^- . Para ser incorporado em compostos orgânicos e realizar as funções essenciais e vitais como nutriente da planta, o NO_3^- tem que ser reduzido primeiramente a NH_4^+ .

Para que esse N seja absorvido e metabolizado pela planta, a H^+ -ATPase da membrana plasmática bombeia H^+ para o meio externo da célula por meio da energia liberada pela hidrólise do ATP, gerando gradiente eletroquímico de H^+ , em que se pode acoplar ao simporte e ao antiporte de diversos íons (DUBY; BOUTRY, 2009). O NO_3^- é a fonte de N mais importante presente no solo (FORDE, 2000; BALOTF et al., 2012). A absorção de NO_3^- é dependente do gradiente de potencial eletroquímico, gerado pela H^+ -ATPase da membrana plasmática, o qual é utilizado como fonte de energia para o movimento simporte de NO_3^- ; note-se que cada NO_3^- absorvido requer 2 H^+ (DUBY; BOUTRY, 2009).

De acordo com Forde (2000), as células das raízes das plantas apresentam quatro mecanismos distintos de absorção de NO_3^- , com diferentes afinidades para ânions: **a) sob baixa concentração externa:** são os sistemas de alta afinidade constitutiva (cHATS), que estão presentes na membrana, e o de alta afinidade indutiva (iHATS); **b) sob elevada concentração externa:** são os sistemas de baixa afinidade constitutiva (cLATS) e os sistemas de baixa afinidade indutiva (iLATS).

A absorção de NH_4^+ pode ser mediada pelos sistemas de transporte, quais sejam: HATS e LATS (VON WIRÉN; GAZZARRINI; FROMMER, 1997). O sistema de alta afinidade (HATS) depende do gradiente de prótons, enquanto o de baixa afinidade (LATS) ocorre sob concentrações mais elevadas de NH_4^+ e apresenta características de canais iônicos, provavelmente de potássio (LOQUÉ et al., 2005).

De acordo com os relatos de Xu, Tsai e Tsai (1992), a diferença de concentração entre NO_3^- e NH_4^+ presente no solo não afeta a taxa de absorção de ambas as formas de N, de modo que as plantas apresentam maior preferência por NH_4^+ , quando ambas as formas são disponíveis e limitantes. A fonte

preferencial de absorção de N (NO_3^- ou NH_4^+) é dependente da espécie da planta e alguns fatores ambientais devem ser considerados (XU; TSAI; TSAI, 1992).

A absorção de N é, portanto, modulada principalmente por: a) presença dos carregadores específicos; b) afinidade desses carregadores em relação ao nitrato ou amônio, e c) quantidade de N presente no solo (VON WIRÉN, GAZZARRINI; FROMMER, 1997).

3 Metabolismo do N

O NO_3^- presente no solo é absorvido pelas raízes e, em seguida é: 1) reduzido no citosol das células das raízes; 2) armazenado no vacúolo das células radiculares; 3) transportado às folhas via xilema, em que será reduzido no citosol, ou 4) armazenado no vacúolo para posterior redução no citosol (JACKSON; BURGER; CAVAGNARO, 2008; BALOTF et al., 2012). O transporte para as folhas ocorre via xilema, embora a redistribuição a partir das folhas para outros órgãos ocorra predominantemente na forma de aminoácidos, via floema.

Na planta, a conversão de NO_3^- em NH_4^+ ocorre em duas etapas. A primeira é por meio de uma redução que requer oito elétrons. O N passa do estado de oxidação (+5) para (-3). Inicialmente, ocorre no citosol a redução do NO_3^- a nitrito (NO_2^-) com o uso de dois elétrons, transferidos das coenzimas NADPH ou NADH, catalisadas pela enzima redutase do nitrato (NR). Em seguida, o NO_2^- é transportado para os cloroplastos nos tecidos fotossintetizantes ou para os plastídeos nas raízes, sendo então reduzido a NH_4^+ , por meio da enzima redutase do nitrito (NiR), com transferência de seis elétrons doados pela ferredoxina reduzida (CAMPBELL, 1999).

A maior parte do NH_4^+ absorvido tem que ser rapidamente incorporada em compostos orgânicos nas raízes. A assimilação de NH_4^+ em aminoácidos envolve reações catalisadas pela presença de duas enzimas: GS e GOGAT. A enzima GS incorpora o NH_4^+ , formando glutamina, por meio da ligação do NH_4^+ ao grupo carboxílico do glutamato, usando energia fornecida pelo ATP. Nas plantas, existe a GOGAT que pode utilizar NADH ou ferredoxina (Fd) como doadoras de elétrons. Ambas as isoformas promovem a transferência redutiva do grupo amida da glutamina para o 2-oxoglutarato, produzindo duas moléculas de glutamato (GUILLAMÓN et al., 2001; FORDE; LEA, 2007). Posteriormente, o glutamato produzido pela GOGAT pode seguir a rota da biossíntese de clorofila (FORDE; LEA, 2007).

Uma vez assimilado em glutamina e glutamato, o N é incorporado em outros aminoácidos por meio de reações de transaminação. As enzimas que catalisam tais reações são conhecidas como aminotransferases ou transaminases. Dentre estas, cita-se a sintetase da asparagina (AS), que catalisa a reação pela transferência de um grupo aminoácido da glutamina para o aspartato, produzindo asparagina (MIFLIN; HABASH, 2002; MASCLAUX-DAUBRESSE et al., 2010; CHAWLA; SHAKYA; ROMMENS, 2012) no citosol das células das folhas e raízes (MASCLAUX-DAUBRESSE et al., 2010). Ainda, a enzima AS é importante em virtude de atuar em conjunto com a GS-GOGAT e a aspartato aminotransferase, para a síntese de asparagina, que pode ser usada para a translocação

de N para as partes de crescimento das plantas (SHI et al., 1997; LEHMANN; RATAJCZAK, 2008; BETTI et al., 2012). Ademais, a asparagina apresenta natureza estável e alta relação C/N (MASCLAUX-DAUBRESSE et al., 2006; TODD et al., 2008) em comparação a glutamina e glutamato (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A forma que o N é transportado via xilema é dependente da espécie estudada (TAIZ; ZEIGER, 2004). Em plantas leguminosas, os ureídeos (alantoína e ácido alantoico) são os principais compostos para armazenagem e transporte de N para a parte aérea (HERRIDGE, 1982; HANSEN et al. 1993; DONALDSON et al., 2001), e representam de 70 a 80% (m/v) do N-orgânico na seiva xilemática de plantas de soja noduladas (McCLURE; ISRAEL, 1979); para as plantas não noduladas, são a asparagina e a glutamina (PATE; SHARKEY; LEWIS, 1975; STREETER, 1977), e a alantoína e o alantoato, em feijão (DÍAZ-LEAL et al., 2012). Recentemente, Yang e Han (2004); Todd e Polacco (2006) relataram enzimas envolvidas no metabolismo de ureídeos em plantas não leguminosas, como em *Arabidopsis*.

Assim, a síntese de alantoína deriva da degradação das purinas. Urato oxidase (UO) é uma enzima presente na via de degradação da purina e é normalmente encontrada em peroxissomas, juntamente com a catalase, que consome o peróxido de hidrogênio produzido. O ácido úrico é oxidado pela UO em alantoína, nos peroxissomos. Assim, pequenas quantidades de UO estão presentes em glioxissomos de sementes oleaginosas na fase de germinação e de tubérculos de batata (DONALDSON et al., 2001). Posteriormente, os compostos nitrogenados formados são liberados para o xilema e transportados para a parte aérea, na qual são rapidamente metabolizados (MIFLIN; HABASH, 2002).

4 Diagnóstico do Estado Nutricional Nitrogenado em Tempo Real

Na agricultura de precisão, a diagnose nutricional nitrogenada necessita ser realizada em tempo real. O Estado Nutricional Nitrogenado da Planta (ENP) pode ser monitorado por métodos diretos ou indiretos (FONTES, 2001, 2011). Tradicionalmente, o monitoramento do ENP é realizado por meio da análise química do teor de N na matéria seca das folhas ou da análise foliar, e posterior interpretação do resultado. A utilização da análise foliar apresenta limitações, como o tempo gasto entre a tomada das amostras no campo e a obtenção dos resultados, o que atrasa ou impede a correção da possível deficiência, principalmente em tempo real.

Diante disso, medidas indiretas e rápidas para diagnosticar o ENP têm sido propostas (FONTES, 2001, 2011), como a análise do teor de nitrato (NO_3^-) na seiva do pecíolo, do teor de clorofila ou do verde da folha, da tabela de cor, dos índices fisiológicos e nitrogenados, e recentemente o diagnóstico realizado com o equipamento portátil Dualex®. Esses métodos vêm sendo utilizados por diversos autores, na Universidade Federal de Viçosa (BUSATO et al., 2010; ; COELHO et al., 2010, 2012). A determinação do estado nutricional por técnica rápida de diagnóstico, em tempo real, realizada no campo, parece ser uma ferramenta útil no manejo do N na batateira.

4.1 Teor de NO_3^- na seiva do pecíolo

Dentre os índices diretos determinados em tempo real, destaca-se o teor de NO_3^- na seiva do pecíolo. Desde que apropriadamente calibrada, esta análise pode ser feita no próprio campo, com microeletrodo portátil ou com o uso da fita indicadora. O teste rápido de NO_3^- na seiva do pecíolo é procedimento útil para determinar o *status* nitrogenado na planta de batata, na medida em que as concentrações de NO_3^- na seiva xilemática apresentam-se fortemente correlacionadas com o teor de N na matéria seca da quarta folha (QF) e com a leitura do índice SPAD (Tabela 1).

Vários trabalhos têm demonstrado que é possível detectar diferenças no teor de NO_3^- na seiva do pecíolo (RONCHI et al., 2001; BUSATO, 2007), quando são aplicadas doses de fertilizante nitrogenado. Assim, o teste rápido de NO_3^- na seiva do pecíolo é procedimento útil para determinar o estado nitrogenado da batata.

4.2 Índice SPAD na quarta folha

A incerteza das recomendações realizadas para os fertilizantes nitrogenados a partir da análise de solo, antes do plantio, e a maior eficiência do N aplicado em cobertura (WESTERMANN; KLEINKOPF; PORTER, 1988), têm gerado informação importante para melhorar as recomendações de N durante a estação de crescimento (RODRIGUES et al., 2005). Assim, uma estratégia aceitável para o manejo do N parece ser a aplicação de parte da quantidade total do N em pré-plantio e o restante em cobertura, na época de maior demanda pela cultura (PORTER; SISSON, 1991; SILVA; FONTES; MIRANDA, 2009; BUSATO et al., 2010; COELHO et al., 2010).

Diante desse contexto, uma das técnicas de avaliação do estado nutricional do N possíveis de serem realizadas de maneira rápida, eficaz, com custo relativamente baixo e em tempo real na cultura da batata é a utilização do clorofilômetro SPAD-502. O SPAD é um aparelho portátil que mede a intensidade do verde das folhas e apresenta facilidade de operação, custo relativamente baixo e é acessível para os agricultores, além de possibilitar uma avaliação não destrutiva da folha (SILVA; FONTES; MIRANDA, 2009; BUSATO et al., 2010; COELHO et al., 2010). A aplicabilidade do uso dos clorofilômetros para diagnóstico em tempo real do estado nitrogenado tem sido demonstrada nas culturas da batata (GIL et al., 2002; SILVA; FONTES; MIRANDA, 2009; BUSATO et al., 2010; COELHO et al., 2010; SILVA et al., 2011); da abobrinha (*Cucurbita pepo* cv. Caserta) (PÔRTO et al., 2011); do trigo (ESPINDULA et al., 2009); do tomate (FERREIRA et al., 2006), e do arroz (CABANGON; CASTILLO; TUONG, 2011).

O clorofilômetro é ferramenta de grande potencial para alcançar maior eficiência produtiva e melhor aproveitamento de fertilizantes nitrogenados. Ao aplicar somente a quantidade que a planta demanda, no momento certo, há redução das perdas de fertilizante e aumento da EUN na cultura da batata. Recentemente, em razão do clorofilômetro, tem-se desenvolvido grande número de pesquisas e tem havido aceitação dos seus resultados para o diagnóstico do estado de

N da planta, na medida em que é uma técnica rápida, realizada no campo e, principalmente, em tempo real (FONTES, 2011).

A análise da intensidade do verde das folhas tem sido uma técnica bastante explorada em várias espécies como possibilidade para avaliar o estado de N da planta em tempo real, pelo fato de haver correlação significativa entre a intensidade do verde (índice SPAD) e o teor de clorofila com a concentração de N na folha, determinada em laboratório (COELHO et al., 2010). Estes resultados podem ser observados na Tabela 2. A concentração de N foliar também apresenta correlação significativa com a produção de massa de matéria seca da planta (FERREIRA et al., 2006) e com a taxa de fotossíntese (VOUILLOT; HUET; BOISSARD, 1998). Ademais, a leitura SPAD também apresenta boa correlação com o rendimento de diversas espécies (COELHO et al., 2010), podendo tal índice ser usado como ferramenta auxiliar, de maneira indireta, em tempo real, para caracterizar a necessidade de adubação nitrogenada em cobertura na cultura da batata.

O índice SPAD pode ser indicativo da necessidade da aplicação do N, desde que se conheça o nível crítico (NC) – abaixo deste, a planta estaria deficiente nesse elemento – e sejam considerados outros fatores que possam afetar o índice SPAD, como as condições edafoclimáticas, a cultivar, os ataques de pragas e doenças, o horário da leitura SPAD e o estágio de crescimento (SILVA et al., 2011). Por outro lado, valores da leitura do índice SPAD acima do NC mostram que não há necessidade de adicionar N. O NC é um parâmetro de grande importância para a avaliação do estado nutricional das plantas, mas não fornece informação sobre a quantidade de N a ser aplicada. Em razão da importância

Tabela 1. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre o teor de N na massa de matéria seca e o índice SPAD na quarta folha da batateira, aos 21 dias após a emergência, com o teor de NO_3^- na seiva do pecíolo da quarta folha.

Cultivar	Variável	Teor de NO_3^- (dag kg^{-1})	Índice SPAD
Ágata	NO_3^- na seiva (mg L^{-1})	0,87**	0,93**
Asterix	NO_3^- na seiva (mg L^{-1})	0,77**	0,90**
Atlantic	NO_3^- na seiva (mg L^{-1})	0,91**	0,96**
Monalisa	NO_3^- na seiva (mg L^{-1})	0,76**	0,93**

Fonte: Adaptado de Busato (2007); ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t*.

Tabela 2. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre o índice SPAD, teor de nitrogênio na quarta folha (TNQF) e teor de clorofila (TCL) das cultivares Ágata e Asterix.

Cultivares	Variáveis	Índice SPAD	TNQF
Ágata	TNQF	0,82**	-
	TCL	0,68**	0,81**
Asterix	TNQF	0,85**	-
	TCL	0,66**	0,73**

Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2010); ** significativo a 1% de probabilidade.

do NC, Silva (2007), trabalhando com a cultivar de batata Monalisa, no período seco, em Viçosa-MG, obteve o NC SPAD igual a 42,1 unidades SPAD, associado à dose em pré-plantio de 185,8 kg^aha⁻¹ de N. Esses dados foram validados adotando-se os critérios SPAD1, SPAD2 e SPAD3, baseados na fertilização de N recomendada em pré-plantio pela quinta aproximação para o Estado de Minas Gerais, juntamente com fertilização de N aplicada em cobertura, baseada no NC SPAD igual a 42,1; baseada em 90% do NC (37,9 unidade SPAD), e em 110% do NC (46,3 unidade SPAD), respectivamente. Os resultados obtidos por Silva (2007) estão apresentados na Tabela 3.

A medição do teor de clorofila pelo SPAD parece ser pouco influenciada pelo consumo de luxo de N pela cultura, em função de a planta produzir somente a clorofila que necessita, indiferentemente do N encontrado na planta. A baixa sensibilidade do medidor de clorofila ao consumo de luxo de N é, possivelmente, por causa da forma com que o excesso de N se encontra na folha. Quando absorvido em excesso, o N acumula-se sob a forma de NO₃⁻, não se associando à molécula de clorofila e, por isso, não é detectado pelo medidor SPAD (BLACKMER; SCHEPERS, 1995).

Além do teor de N na planta, outros fatores podem afetar os valores do índice SPAD, como as condições edafoclimáticas, o ano, o local, a cultivar, o horário de avaliação, dentre outros, impossibilitando estabelecer um valor fixo universal de nível crítico (FONTES, 2011; SILVA et al., 2011). Para viabilizar a utilização do clorofilômetro em diferentes condições ambientais, Schepers et al. (1992) propuseram, para a cultura do milho, a instalação de uma área de referência na lavoura, a qual deverá ser adubada com dose não limitante de N. Baseado nesta premissa, foi sugerido usar o índice de suficiência de N (ISN), obtido pela relação entre as medidas obtidas com o clorofilômetro nas plantas representativas da área a ser avaliada na lavoura e nas plantas da área de referência (sem deficiência de N). Geralmente, a planta é considerada deficiente em N quando o ISN atinge 90 ou 95 % do valor da leitura obtida nas plantas da área de referência (VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997). Assim, a utilização do ISN permite a normalização das leituras com o aparelho, possibilitando eliminar possíveis erros inerentes a diferentes solos, condições climáticas, cultivares, dentre outros fatores.

Para a cultura da batata, Coelho (2011) avaliou o manejo da adubação com o índice SPAD em parcelas adubadas com N em pré-plantio, com doses de 0 a 300 kg ha⁻¹ de N. Esse autor utilizou o critério do ISN menor que 0,95 para realizar

Tabela 3. Nível crítico do índice SPAD adotado (NC), índice SPAD obtido e dose de nitrogênio aplicada na batata, em função dos critérios SPAD1, SPAD2 e SPAD3, aos 21 dias após a emergência.

Critério	NC SPAD	Leitura do índice SPAD	Dose de N a ser aplicada em cobertura (kg ha ⁻¹) ¹
SPAD1	42,1	38,9	64
SPAD2	37,9	40,3	-48
SPAD3	46,3	39,7	132

Fonte: Adaptado de Silva (2007). Valores negativos indicam a não necessidade de aplicar N em cobertura. ¹Uma unidade SPAD representa o fornecimento de 20 kg ha⁻¹ de N em cobertura.

a adubação de N em cobertura e concluiu que a decisão de adubar em cobertura com N utilizando-se o critério do ISN e de estimar a dose de N com o índice SPAD propiciou a precisão de acerto de 85 e 70 % dos casos avaliados nas safras 'de inverno' e 'das águas', respectivamente, sendo mais eficaz na identificação das plantas mais deficientes em N.

4.3 Equipamento Dualex[®]

O Dualex[®] (*dual excitation*, FORCE-A, Orsay, France) é um equipamento portátil utilizado para estimar, principalmente, em tempo real e de forma não destrutiva, os índices isolados e combinados de clorofila e de flavonóis na folha (FONTES, 2011). O equipamento emite um feixe de luz de 375 nm (absorvido pelos polifenóis) e outro de referência a 650 nm (região do vermelho), que penetra na epiderme da folha (GOULAS et al., 2004; CARTELAT et al., 2005). O Dualex[®] fornece na tela do seu visor, em uma única medição realizada na folha, três índices: índice de clorofila (ICHL), índice de flavonóis (IFLV) e índice de balanço do N (IBN), que é obtido pela relação entre ICHL e IFLV. Dependendo da espécie e de adequada calibração, a concentração de N na folha pode ser estimada indiretamente com o equipamento, pois há correlação negativa entre os teores de compostos fenólicos e de N na folha, e correlação positiva deste com os teores de clorofila e com o IBN (COELHO et al., 2012).

A partir da comercialização, alguns autores têm utilizado o Dualex[®] para estimar a concentração de N na folha de algumas espécies (TREMBLAY; WANG; BÉLEC, 2010; COELHO et al., 2012). Em estudo realizado por Coelho et al. (2012), com a cultura da batata, foi demonstrado haver uma correlação linear positiva e significativa entre os índices de clorofila (ICHL) e balanceado de N (NBI), e negativa entre o índice de flavonoides (IFLV) e o teor de N determinado na QF a partir do ápice da batateira (Tabela 4), confirmando os resultados encontrados por Cartelat et al. (2005).

Os resultados do Dualex[®] no Brasil ainda são incipientes, mas apontam para a viabilidade técnica do equipamento que ainda tem preço pouco acessível. Além destes índices listados acima, são importantes o estudo e o entendimento acerca da produção e do acúmulo de carboidratos nas folhas das plantas.

4.4 Tabela de cor

O olho humano enxerga a cor verde da folha em virtude, principalmente, das moléculas de clorofila *a* (verde-azulada) e *b* (verde-amarelada), que absorvem comprimentos de onda na região do azul e vermelho do espectro, refletindo aqueles

Tabela 4. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre o índice de flavonoides (IFLV), o índice de clorofila (ICHL) e o índice de balanço de N (IBN) com o teor de nitrogênio determinados na quarta folha da batateira, aos 21 e 42 dias após a emergência, cultivar Ágata.

Características	21 DAE	42 DAE	
Teor de N na QF	IFLV	-0,73**	-0,79**
	ICHL	0,89**	0,72**
	IBN	0,82**	0,77**

Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2012); ** significativo no nível de 1% de probabilidade, pelo teste *t*.

comprimentos no verde. Assim, pelo fato de diferentes doses de N proporcionarem diferentes tons de verde na folha, o teor de clorofila ou verde da folha tem sido indicado como índice para avaliar o ENP (MOREIRA et al., 2011).

Com base nesta premissa e com o desenvolvimento dos clorofilômetros, a intensidade do verde também pode ser avaliada por meio de uma tabela de cor, como proposto para o arroz (HOUSHMANDFAR; KIMARO, 2011). A tabela de cor é simples, fácil de manusear e de baixo custo, sendo ferramenta alternativa ao clorofilômetro.

Estudos têm mostrado haver correlação entre as leituras SPAD e a tabela de cor para o arroz (SHUKLA et al., 2004). Para a cultivar Monalisa, foi proposta a tabela de cor UFV-80 para avaliar o ENP (FONTES; SILVA, 2006). Esta tabela é composta de diferentes tonalidades de cor verde, sendo numerada de 1 (deficiência de N) a 5 (excesso de N), em que o maior valor indica maior intensidade do verde e, conseqüentemente, maior teor de N. A relação entre a leitura SPAD (X) e o valor da cor verde na tabela UFV-80-Monalisa (Y), obtida em experimentos realizados nas épocas das águas e da seca, foi (Equações 1 e 2):

$$Y = 23,245 + 7,595X - 0,720X^2, R^2 = 0,87 \text{ (águas)} \quad (1)$$

$$Y = 27,813 + 5,7107X - 0,5705X^2, R^2 = 0,85 \text{ (seca)} \quad (2)$$

em que: Y = número da cor, variando de 1 a 5; X = leitura SPAD, com valores entre 27 a 46.

Fontes e Silva (2006) ainda recomendam, para a cultivar Monalisa, que a cor verde número 4, determinada no folíolo terminal da QF completamente expandida no momento da amontoa (21 dias após a emergência – DAE), é a ‘cor crítica’ ou quando é sugerido não aplicar N em cobertura.

4.5 Teor de N na matéria seca foliar

O teor de N na folha é outro parâmetro que pode ser utilizado como indicador do nível de N na planta. Tradicionalmente, a avaliação do estado de N da planta é feito por meio da análise química do teor de N na matéria seca da folha e posterior interpretação do resultado, procedimento este conhecido por análise foliar (BUSATO et al., 2010). A utilização da análise foliar apresenta limitações, como o tempo gasto entre a retirada das amostras e a obtenção dos resultados, o que atrasa ou impede a correção da possível deficiência de N em cultura de ciclo curto, como, no caso, a batata. Adicionalmente, para a execução da análise foliar, são necessários mão-de-obra, aparelhos e laboratórios especializados, tornando elevado o custo das análises.

4.6 Índices fisiológicos ou agrônômicos

Aos 21 DAE, quando é decidida a aplicação de N em cobertura, uma medida mais simples e rápida que a curva de absorção e os índices nutricionais da planta talvez possa ser utilizada para manejar o programa de adubação da cultura da batata. Recentemente, foi proposto que características agrônômicas relacionadas ao crescimento (altura de planta, diâmetro do caule, área foliar e massa fresca e seca de folhas) possam ser usadas para estimar o estado nutricional nitrogenado das plantas (FONTES, 2001; RONCHI et al.,

2001). Em analogia, alguma característica agrônômica, medida em tempo real, no próprio campo, pelo produtor, talvez possa ser usada como índice no manejo de N. Ademais, os valores das características fisiológicas refletem a relação de causa e efeito de doses de N sobre as mesmas. Esse enfoque foi usado em trabalhos realizados com a cultura do tomate (RONCHI et al., 2001) e melão (COELHO; FONTES, 2005).

Recentes avanços têm sido realizados com a técnica do sensoriamento em tempo real para a avaliação do estado nutricional nitrogenado das plantas, bem como essa técnica tem despertado maior interesse pelo uso das características da planta, em razão de a avaliação ser rápida, fácil e de baixo custo operacional. Há tentativas de utilizar determinadas características fisiológicas ou biométricas da planta, em condição de adequado suprimento dos demais nutrientes, tanto como índice do estado de N nas plantas de batata (RONCHI et al., 2001; MOREIRA et al., 2011) quanto para o controle da dose de N (FONTES; DIAS; GRAÇA, 2005).

5 Manejo da Adubação Nitrogenada com o SPAD

É importante realizar o correto manejo dos fertilizantes para obtenção da produtividade ótima ou próxima da ótima, bem como gerar uma agricultura sustentável. Assim, quando nutrientes são fornecidos de forma insuficiente ou em excesso, constituem fatores limitantes para a produção agrícola. Em muitos solos agrícolas, raramente há suficiente disponibilidade ou concentração de N, P ou K suficiente para suprir o rápido crescimento das plantas durante o crescimento inicial. Assim, estes elementos são fornecidos aos sistemas agrícolas como fertilizantes minerais ou via plantas leguminosas (caso específico para o N). Dessa forma, há custos financeiros e ambientais para o uso de fertilizantes minerais. Portanto, é importante melhorar ou aumentar a eficiência dos fertilizantes empregados na agricultura, principalmente os nitrogenados. É possível aumentar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados pelo diagnóstico de características agrônômicas (FONTES, 2011), pela melhoria das boas práticas de manejo dos fertilizantes (ZEBARTH et al., 2009) e/ou geneticamente, pela utilização de cultivares que adquirirem e/ou utilizem os elementos minerais de forma mais eficaz sob condição em que o nutriente é limitante (RENGEL; DAMON, 2008). Diante disso, a produção agrícola sustentável é alcançada quando os níveis estáveis da produção de alimentos e a qualidade dos produtos colhidos são mantidas sem comprometer a rentabilidade econômica ou o ambiente.

Ao realizar a adubação nitrogenada, é importante levar em consideração ambos os aspectos: o poder econômico e o risco de contaminação ambiental. Assim, podem-se diminuir as perdas destes fertilizantes para o ambiente, enquanto se obtêm rendimentos satisfatórios com a cultura em destaque. A dose, a época e o método de aplicação de fertilizantes têm efeito marcante tanto sobre a produtividade das culturas como sobre o potencial de contaminação dos mananciais de água pelos nutrientes. Quanto mais cedo o N for aplicado, antes da época na qual a cultura necessita, e quanto maior for a dose de aplicação, maior será a quantidade de N perdida para o ambiente, por meio de lixiviação ou volatilização. As

exigências nutricionais de uma cultura podem ser supridas pelo fornecimento de doses equilibradas do fertilizante ao solo, combinadas com época e modo adequado de aplicação. O programa de fertilização envolve a quantidade adequada, o modo e a época recomendada de aplicação para a cultura, que podem variar em função do solo, da planta e do ambiente.

A adubação mineral do solo consiste em fornecer, equilibrar e manter os nutrientes, de modo a propiciar aumento de produtividade e lucratividade para o bataticultor, sem agredir o meio ambiente. Na produção de batata, normalmente é empregada grande quantidade de fertilizantes, dentre os quais estão os nitrogenados. Dependendo do teor existente no solo, dose subótima de N reduz a produtividade. Por outro lado, o manejo não apropriado dos fertilizantes nitrogenados acarreta prejuízo financeiro e também prolonga o ciclo da cultura (SILVA; FONTES; MIRANDA, 2009); provoca contaminação das águas subterrâneas pela lixiviação de NO_3^- (ZEBARTH et al., 2009), além da redução da produtividade (SILVA; FONTES; MIRANDA, 2009; FONTES et al., 2010; COELHO et al., 2010) e da qualidade (BRAUN et al., 2010) dos tubérculos de batata.

A dose de N a ser aplicada à batata depende de diversos fatores. Os principais fatores são aqueles que influenciam a produtividade esperada da cultura, tais como: regime hídrico, manejo da cultura, condições edafoclimáticas, cultivar (FONTES, 2001, 2011) e, conseqüentemente, a exportação de N (BRAUN et al., 2011). A exportação de N pelos tubérculos das cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa foi 87, 98, 123 e 64 kg ha^{-1} , respectivamente (BRAUN et al., 2011). Estes autores relataram que, para a produção de uma tonelada de tubérculo, são necessários 2,65; 3,03; 3,70, e 2,47 kg de N , para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa, respectivamente.

Adicionalmente, a dose de N a ser aplicada à batata depende de fatores que influenciam a eficiência de utilização do adubo nitrogenado (quantidade aplicada \times quantidade colhida ou extraída de N). A eficiência de exportação de N, calculada pela relação entre a quantidade exportada nos tubérculos e a dose ótima de N para a máxima produção de tubérculos comerciais, foi de 52, 46, 70, e 33% para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa, respectivamente (BRAUN et al., 2011). A eficiência de recuperação do N é maior quanto menor a dose aplicada, mas uma dose considerada reduzida (por exemplo, 50 kg ha^{-1} de N) proporciona baixa produtividade, na maioria das áreas de solo destinadas ao plantio de batata. Por outro lado, a obtenção de altas produtividades é, em grande parte, resultado de adequados suprimento, distribuição e acúmulo de nutrientes pela planta (FONTES; DIAS; GRAÇA, 2005; FONTES; DIAS; SILVA, 2005).

A dose ótima econômica de N (DOEN) é obtida por meio da média da relação 'preço N/preço da batata' ($\text{\$ kg}^{-1}$ de N: $\text{\$ kg}^{-1}$ por tubérculo) referente aos últimos cinco anos (2003 a 2007), junto ao Instituto de Economia Agrícola de São Paulo, para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa. Considerando-se a produtividade de tubérculos nas relações mais favoráveis (baixo preço do N e alto preço da batata) e menos favoráveis (alto preço do N e baixo preço da batata), as doses de N associadas à máxima eficiência econômica variaram de 147 a 201 kg ha^{-1} de N (Tabela 5). Da mesma forma,

Coelho et al. (2010), trabalhando com as cultivares Ágata e Asterix, relataram que, no período de 2003 a 2008, a relação média de 'preços N/preço da batata' ($\text{\$ kg}^{-1}$ de N: $\text{\$ kg}^{-1}$ de tubérculo) foi 1,91, referente ao preço da batata de $\text{R\$ 0,67 kg}^{-1}$ e ao preço do N na forma de ureia de $\text{R\$ 1,28 kg}^{-1}$. Esses autores relataram que a dose de N para obtenção da máxima eficiência econômica (MEE) variou de 283 a 293 kg ha^{-1} de N, para a cultivar Ágata, e 240 a 247 kg ha^{-1} de N, para a cultivar Asterix.

A produtividade de batata pode ser explicada por um modelo linear de regressão, caracterizada por uma parábola. O valor da DOEN médio para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa foi de 169 kg ha^{-1} de N (Figura 1). É importante orientar os bataticultores no sentido de obter a produtividade máxima econômica em relação à produtividade máxima, em virtude de proporcionar maior lucro para o agricultor e, conseqüentemente, diminuir a poluição ambiental.

Em estudo realizado por Fontes et al. (2010), trabalhando com as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa, em resposta à adubação nitrogenada aplicada em pré-plantio, proporcionou-se a máxima produtividade comercial com as doses de 168; 212; 175, e 193 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Essas doses proporcionaram 33,1; 32,3; 33,3, e 25,9 t ha^{-1} , para as quatro cultivares, respectivamente.

Analisando-se as máximas produtividades obtidas por Fontes et al. (2010) e a relação média de preço do N e do produto colhido, seria possível reduzir a dose de N em 43, 6

Tabela 5. Doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) aplicadas para máxima eficiência econômica, considerando o rendimento de tubérculos de batata, em função da relação preço de N/preço de batata, para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa.

Cultivar	Preço N/Preço de batata		
	Baixo (4,75)	Médio (6,25)	Alta (7,75)
Ágata	155	151	147
Asterix	201	198	195
Atlantic	161	156	151
Monalisa	177	172	167

Fonte: Adaptado de Fontes et al. (2010).

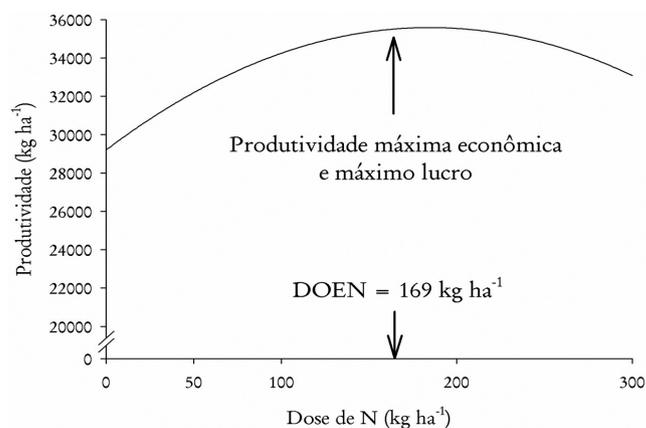


Figura 1. Relação entre a produtividade comercial e a dose de N aplicada em pré-plantio.

e 24 kg ha⁻¹ de N, ou seja, 20, 3,5 e 12,5% de economia na quantidade de N para as cultivares Asterix, Atlantic e Monalisa, respectivamente, em relação à DOEN (169 kg ha⁻¹ de N). Para a cultivar Ágata, a dose de N que proporcionou a máxima produtividade comercial foi 168 kg ha⁻¹ de N. A relação preço do N/preço da batata determina a taxa mais econômica a ser aplicada, pelo fato de a maioria das culturas apresentar resposta decrescente com o aumento das doses de N. À medida que esta relação aumenta, a DOEN diminui. Assim, boas práticas de manejo da adubação nitrogenada podem ser eficientes para diminuir as perdas de N por imobilização, volatilização (N₂O e NH₃) e lixiviação de NO₃⁻ (ZEBARTH et al., 2009).

O teor de N nos tubérculos das cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa associado à dose ótima de N foi de 14,4; 16,3; 13,8, e 13,5 g kg⁻¹ de N, respectivamente (BRAUN et al., 2011). Diante desses dados, seriam necessários 10,37; 11,74; 9,94, e 9,72 g de N para produzir 1 kg de tubérculos frescos, para as cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa, respectivamente, considerando-se a contribuição do solo e a exportação pelos tubérculos igual a zero. Com base nestas pressuposições, foi construída a Tabela 6.

A partir dos dados da Tabela 6, quando há probabilidade de chuvas, Silva, Fontes e Miranda (2009) relataram que, nas condições edafoclimáticas de Viçosa-MG, devem ser realizadas as aplicações de N em pré-plantio e em cobertura, com a dose de 255,85 kg ha⁻¹ de N, sendo 20% aplicados em pré-plantio e o restante em cobertura, antes de realizar a amontoa (21 DAE). Esses mesmos autores relataram que, na época seca, todo o N aplicado em pré-plantio foi suficiente para acarretar incremento na produtividade da cultivar Monalisa, sendo a máxima produção comercial de tubérculos obtidos com 189,98 kg ha⁻¹ de N. Ademais, é importante o agricultor ter conhecimento desta influência (época de plantio, seca ou chuvosa), evitando gastos desnecessários com fertilizantes, bem como promovendo a redução dos prejuízos ambientais.

O estado nutricional nitrogenado é avaliado, tradicionalmente, por meio da análise foliar em determinado período do ciclo da cultura – como na batata, aos 21 DAE –, comparando-se determinada forma de N presente na planta com padrões de referência (índices diretos) (FONTES, 2001). Apesar da economia por parte do bataticultor quando se aplica somente N em pré-plantio, pode haver inconveniência quando se

faz a aplicação de todo o N em pré-plantio. O motivo desta inconveniência é que a aplicação de todo o N em pré-plantio torna impossível fazer correções de acordo com o requerimento então atual da cultura durante todo período de cultivo; conseqüentemente, não há possibilidade de manejar a aplicação do N em cobertura.

6 Considerações Finais

É importante que os bataticultores ajustem, ao programa de adubação, estratégias de monitoramento do estado nutricional da cultura, que envolvam algum método de diagnosticar o estado de N e de possibilitar a posterior interpretação dos resultados com o nível crítico pré-estabelecido. Além disso, o aprimoramento da utilização dos parâmetros de planta já conhecidos, bem como a geração de novos índices que auxiliem no manejo da adubação nitrogenada, são fundamentais, pois contribuirão para aumentar a eficiência de uso do N, reduzir o custo de produção da lavoura, otimizar a margem de lucro do produtor e minimizar a contaminação ambiental do solo e da água, principalmente pela redução da lixiviação de NO₃⁻. Esta tem sido a tendência dos sistemas de manejo de adubação nitrogenada, seguindo-se a linha de agricultura de precisão.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela Bolsa de Doutorado e pela Bolsa de Produtividade, concedidas ao primeiro e ao segundo autores, respectivamente. À FAPEMIG, pelos recursos financeiros, e à UFV, pela estrutura física e profissional.

Referências

- ALFAIA, S. S. Caracterização e distribuição das formas do nitrogênio orgânico em três solos da Amazônia Central. *Acta Amazônica*, v. 36, n. 2, p. 135-140, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672006000200001>
- BALOTF, S.; NIAZI, A.; KAVOOSI, G.; RAMEZANI, A. Differential expression of nitrate reductase in response to potassium and sodium nitrate: real-time PCR analysis. *Australian Journal of Crop Science*, v. 6, n. 1, p. 130-134, 2012.
- BETTI, M.; GARCÍA-CALDERÓN, M.; PÉREZ-DELGADO, C. M.; CREDALI, A.; ESTIVILL, G.; GALVÁN, F.; VEJA, J. M.; MÁRQUEZ, A. J. Glutamine synthetase in legumes: recent advances in enzyme structure and functional genomics. *International Journal Molecular Sciences*, v. 13, p. 7994-8024, 2012. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms13077994>
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule for corn. *Journal Production Agriculture*, v. 8, p. 55-60, 1995. <http://dx.doi.org/10.2134/jpa1995.0056>
- BRAUN, H.; FONTES, P. C. R.; BUSATO, C.; CECON, P. R. Teor e exportação de macro e micronutrientes nos tubérculos de cultivares de batata em função do nitrogênio. *Bragantia*, v. 70, n. 1, p. 50-57, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052011000100009>
- BRAUN, H.; FONTES, P. C. R.; FINGER, F. L.; BUSATO, C.; CECON, P. R. Carboidratos e matéria seca de tubérculos de cultivares de batata influenciados por doses de nitrogênio. *Ciência*

Tabela 6. Dose de nitrogênio a ser aplicada no plantio na época de outono/inverno, baseada na produtividade esperada (t ha⁻¹) das cultivares Ágata, Asterix, Atlantic e Monalisa.

Produtividade esperada (t ha ⁻¹)	Necessidade de N (kg ha ⁻¹)			
	Cultivares			
	Ágata	Asterix	Atlantic	Monalisa
10	104	117	99	97
15	155	176	149	146
20	207	235	199	194
25	260	293	248	243
30	311	352	298	291
35	363	411	348	340
40	415	470	397	389

- e Agrotecnologia*, v. 34, n. 2, p. 285-293, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542010000200003>
- BUSATO, C. *Características da planta, teores de nitrogênio na folha e produtividade de tubérculos de cultivares de batata em função de doses de nitrogênio*. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- BUSATO, C.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; BRAUN, H. Seasonal variation and threshold values for chlorophyll meter readings on leaves of potato cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, v. 33, p. 2148-2156, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2010.519087>
- CABANGON, R. J.; CASTILLO, E. G.; TUONG, T. P. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, v. 121, n. 1, p. 136-146, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.12.002>
- CAMPBELL, W. H. Nitrate reductase structure, function and regulation: Bridging the gap between biochemistry and physiology. *Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology*, v. 50, p. 277-303, 1999. PMID:15012211. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.277>
- CARTELAT, A.; CEROVIC, Z. G.; GOULAS, Y.; MEYER, S.; LELARGE, C.; PRIOUL, J. L.; BARBOTTIN, A.; JEUFFROY, M. H.; GATE, P.; AGATI, G.; MOYA, I. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, v. 91, p. 35-49, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.05.002>
- CHAWLA, R.; SHAKYA, R.; ROMMENS, C. M. Tuber-specific silencing of asparagine synthetase-1 reduces the acrylamide-forming potential of potatoes grown in the field without affecting tuber shape and yield. *Plant Biotechnology Journal*, v. 10, p. 913-924, 2012. PMID:22726556. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00720.x>
- COELHO, E. L.; FONTES, P. C. R. Índices agronômicos do meloeiro associados à dose adequada de nitrogênio, em ambiente protegido e no campo. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 5, p. 974-979, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542005000500009>
- COELHO, F. S. *Uso do clorofilômetro como ferramenta de manejo da adubação nitrogenada na cultura da batata*. 2011. 162 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- COELHO, F. S.; FONTES, P. C. R.; FINGER, F. L.; CECON, P. R. Avaliação do estado nutricional do nitrogênio em batateira por meio de polifenóis e clorofila na folha. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 4, p. 584-592, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000400015>
- COELHO, F. S.; FONTES, P. C. R.; PUIATTI, M.; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. C. C. Dose de nitrogênio associada à produtividade de batata e índices do estado de nitrogênio na folha. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1175-1183, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400017>
- DÍAZ-LEAL, J. L.; GÁLVEZ-VALDIVIESO, G.; FERNÁNDEZ, J.; PINEDA, M.; ALAMILLO, J. M. Developmental effects on ureide levels are mediated by tissue specific regulation of allantoinase in *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Experimental Botany*, v. 63, p. 4095-4106, 2012. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ers090>
- DONALDSON, R. P.; ASSADI, M.; KARYOTOU, K.; OLCUM, T.; QIU, T. Plant cells: peroxisomes and glyoxysomes. *Encyclopedia of Life Sciences-Nature*, p. 1-7, 2001. Disponível em: <www.els.net>. Acesso em: 15 de março de 2013.
- DUBY, G.; BOUTRY, M. The plant plasma membrane proton pump ATPase: a highly regulated P-type ATPase with multiple physiological roles. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, v. 457, n. 3, p. 645-655, 2009. PMID:18228034. <http://dx.doi.org/10.1007/s00424-008-0457-x>
- ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; FONTES, P. C. R.; CORREA, R. S. C.; SOUZA, L. T. Effect of nitrogen and trinexapac-ethyl rates on the SPAD index of wheat leaves. *Journal of Plant Nutrition*, v. 32, p. 1956-1964, 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160903245113>
- FERREIRA, M. M. M.; FERREIRA, G. B.; FONTES, P. C. R.; DANTAS, J. P. Índice SPAD e teor de clorofila no limbo foliar do tomateiro em função de doses de nitrogênio e da adubação orgânica, em duas épocas de cultivo. *Revista Ceres*, v. 53, p. 83-92, 2006.
- FONTES, P. C. R. *Diagnóstico do estado nutricional das plantas*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 122 p.
- FONTES, P. C. R. *Nutrição mineral de plantas: avaliação e diagnose*. Viçosa: Arka Editora, 2011. 296 p.
- FONTES, P. C. R.; BRAUN, H.; BUSATO, C.; CECON, P. R. Economic optimum nitrogen fertilization rates and nitrogen fertilization rate effects on tuber characteristics of potato cultivars. *Potato Research*, v. 53, p. 167-179, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11540-010-9160-3>
- FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; GRAÇA, R. N. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *Horticultura Brasileira*, v. 23, n. 2, p. 275-280, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362005000200022>
- FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; SILVA, D. J. H. Dinâmica do crescimento, distribuição de matéria seca na planta e produção de pimentão em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, v. 23, n. 1, p. 94-99, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362005000100020>
- FONTES, P. C. R.; SILVA, M. C. C. Proposição de uma tabela de cor (UFV 80 - Monalisa) para a avaliação do estado de nitrogênio da batateira. *Batata Show*, v. 6, n. 16, 2006.
- FORDE, B. G. Nitrate transporters in plants: structure, function and regulation. *Biochimic Biophysica Acta*, v. 1465, p. 219-235, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0005-2736\(00\)00140-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0005-2736(00)00140-1)
- FORDE, B. G.; LEA, P. J. Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling. *Journal of Experimental Botany*, v. 58, n. 9, p. 2339-2358, 2007. PMID:17578865. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erm121>
- GIL, P. T.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; FERREIRA, F. A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. *Horticultura Brasileira*, v. 20, n. 4, p. 611-615, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362002000400020>
- GOULAS, Y.; CEROVIC, Z. G.; CARTELAT, A.; MOYA, I. Duallex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Applied Optics*, v. 43, p. 4488-4496, 2004. PMID:15382317. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.43.004488>

- GUILLAMÓN, J. M.; VAN RIEL, N. A.; GIUSEPPIN, M. L.; VERRIPS, C. T. The glutamate synthase (GOGAT) of *Saccharomyces cerevisiae* plays an important role in central nitrogen metabolism. *FEMS Yeast Research*, v. 1, n. 3, p. 169-175, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S1567-1356\(01\)00034-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1567-1356(01)00034-4)
- HANSEN, A. P.; RERKASEM, B.; LORDKAEW, S.; MARTIN, P. Xylem-solute technique to measure N₂ fixation in *Phaseolus vulgaris* L.: calibration and sources of error. *Plant and Soil*, v. 150, p. 223-231, 1993. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00013019>
- HERRIDGE, D. F. Relative abundance of ureides and nitrate in plant tissues of soybean as a quantitative assay of nitrogen fixation. *Plant Physiology*, v. 70, p. 1-6, 1982. PMID:16662425 PMCid:PMC1067075. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.70.1.1>
- HOUSHMANDFAR, A.; KIMARO, A. Calibrating the leaf color chart for rice nitrogen management in Northern Iran. *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 11, p. 2627-2633, 2011.
- JACKSON, L. E.; BURGER, M.; CAVAGNARO, T. R. Roots, nitrogen transformations, and ecosystem services. *Annual Review of Plant Biology*, v. 59, p. 341-363, 2008. PMID:18444903. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092932>
- KOCH, W.; KWART, M.; LAUBNER, M.; HEINEKE, D.; STRANSKY, H.; FROMMER, W. B.; TEGEDER, M. Reduced amino acid content in transgenic potato tubers due to antisense inhibition of the leaf H⁺/amino acid symporter StAAP1. *Plant Journal*, v. 33, p. 211-220, 2003. PMID:12535336. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01618.x>
- LEHMANN, T.; RATAJCZAK, L. The pivotal role of glutamine dehydrogenase (GDH) in the mobilization of N and C from storage material to asparagine in germinating seeds of yellow lupine. *Journal of Plant Physiology*, v. 165, p. 149-158, 2008. PMID:17566603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2006.12.010>
- LOQUÉ, D.; LUDEWIG, U.; YUAN, L.; VON WIRÉN, N. Tonoplast intrinsic proteins AtTIP2;1 and AtTIP2;3 facilitate NH₃ transport into the vacuole. *Plant Physiology*, v. 137, p. 671-680, 2005. PMID:15665250 PMCid:PMC1065367. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.104.051268>
- MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; DANIEL-VEDELE, F.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*, v. 105, p. 1141-1157, 2010. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcq028> <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcq028>
- MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; REISDORF-CREN, M.; PAGEAU, K.; LELANDAIS, M.; GRANDJEAN, O.; KRONENBERGER, J.; VALADIER, M. H.; FERAUD, M.; JOUGLET, T.; SUZUKI, A. Glutamine synthetase-glutamate synthase pathway and glutamate dehydrogenase play distinct roles in the sink-source nitrogen cycle in tobacco. *Plant Physiology*, v. 140, p. 444-456, 2006. PMID:16407450 PMCid:PMC1361315. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.105.071910>
- McCLURE, P. R.; ISRAEL, D. W. Transport of nitrogen in the xylem of soybean plants. *Plant Physiology*, v. 64, p. 411-416, 1979. PMID:16660977 PMCid:PMC543102. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.64.3.411>
- MIFLIN, B. J.; HABASH, D. Z. The role of glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase in nitrogen assimilation and possibilities for improvement in the nitrogen utilization of crops. *Journal of Experimental Botany*, v. 53, n. 370, p. 979-987, 2002. PMID:11912240. <http://dx.doi.org/10.1093/jexbot/53.370.979>
- MOREIRA, M. A.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; ARAÚJO, R. F. Índices para avaliar o estado de nitrogênio da batata multiplicada por distintos materiais propagativos. *Revista Ceres*, v. 58, n. 3, p. 384-392, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300020>
- PATE, J. S.; SHARKEY, P. J.; LEWIS, O. A. M. Xylem to phloem transfer of solutes in fruiting hoots of legumes, studies by a phloem bleeding technique. *Planta*, v. 122, p. 11-26, 1975. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00385400>
- PORTER, G. A.; SISSON, J. A. Petiole nitrate content of mainegrown Russet Burbank and Shepody potatoes in response to varying nitrogen rate. *American Potato Journal*, v. 68, p. 493-505, 1991. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02853766>
- PÔRTO, M. L.; PUIATTI, M.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; ALVES, J. C.; ARRUDA, J. A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio na cultura da abobrinha. *Horticultura Brasileira*, v. 29, p. 311-315, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362011000300009>
- RENGEL, Z.; DAMON, P. M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiologia Plantarum*, v. 133, p. 624-636, 2008. PMID:18397208. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01079.x>
- RODRIGUES, M. A.; COUTINHO, J.; MARTINS, F.; ARROBAS, M. Quantitative sidedress nitrogen recommendations for potatoes based upon crop nutritional índices. *European Journal Agronomy*, v. 23, p. 79-88, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2004.10.001>
- RONCHI, C. P.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G.; NUNES, J. C.; MARTINEZ, H. E. P. Índices de nitrogênio e de crescimento do tomateiro em solo e em solução nutritiva. *Revista Ceres*, v. 48, n. 278, p. 469-484, 2001.
- SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter reading. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, v. 23, p. 2173-2187, 1992. <http://dx.doi.org/10.1080/00103629209368733>
- SHI, L.; TWARY, S. N.; YOSHIOKA, H.; GREGERSON, R. G.; MILLER, S. S.; SAMAC, D. A.; GANTT, J. S.; UNKEFER, P. J.; VANCE, C. P. Nitrogen assimilation in alfalfa: isolation and characterization of an asparagine synthetase gene showing enhanced expression in root nodules and dark-adapted leaves. *Plant Cell*, v. 9, p. 1339-1356, 1997. PMID:9286111 PMCid:PMC157002.
- SHUKLA, A. K.; LADHA, J. K.; SINGH, V. K.; DWIVEDI, B. S.; BALASUBRAMANIAN, V.; GUPTA, R. K.; SHARNA, S. K.; SINGH, Y.; PATHAK, H.; PANDEY, P. S.; PADRE, A. T.; YADAVA, R. L. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes or rice and wheat in a systems perspective. *Agronomy Journal*, v. 96, p. 1606-1621, 2004. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.1606>
- SILVA, M. C. C. *Critérios para o manejo da adubação nitrogenada da batata em duas épocas de plantio*. 2007. 144 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- SILVA, M. C. C.; COELHO, F. S.; BRAUN, H.; FONTES, P. C. R. Índice SPAD em função de diferentes horários e posições no folíolo da batata sob fertilização nitrogenada. *Revista Ciência Agrônômica*,

- v. 42, n. 4, p. 971-977, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000400020>
- SILVA, M. C. C.; FONTES, P. C. R.; MIRANDA, G. V. Índice SPAD e produção de batata, em duas épocas de plantio, em função de doses de nitrogênio. *Horticultura Brasileira*, v. 27, p. 17-22, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362009000100004>
- STREETER, J. G. Asparaginase and asparagine transaminase in soybean leaves and root nodules. *Plant Physiology*, v. 60, p. 235-9, 1977. PMID:16660067 PMCID:PMC542587. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.60.2.235>
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 285-307.
- TODD, J.; SCREENA, S.; CROWLEY, J.; PENG, J.; ANDERSON, S.; BROWN, T.; QI, Q.; FABBRI, B.; DUFF, S. M. G. Identification and characterization of four distinct asparagine synthetase (*AsnS*) genes in maize (*Zea mays* L.). *Plant Science*, v. 175, p. 799-808, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.08.004>
- TODD, C. D.; POLACCO, J. C. AtAAH encodes a protein with allantoate amidohydrolase activity from *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, v. 223, p. 1108-1113, 2006. PMID:16496096. <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-006-0236-x>
- TREMBLAY, N.; WANG, Z.; BÉLEC, C. Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content. *Journal of Plant Nutrition*, v. 33, p. 57-70, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160903391081>
- 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 American Journal*, v. 61, p. 1233-1239, 1997. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040032x>
- VON WIRÉN, N.; GAZZARRINI, S.; FROMMER, W. Regulation of mineral nitrogen uptake in plants. *Plant and Soil*, v. 196, p. 191-199, 1997. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004241722172>
- VOUILLOT, M. O.; HUET, P.; BOISSARD, P. Early detection of N deficiency in wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie*, v. 18, p. 117-130, 1998. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19980202>
- WESTERMANN, D. T.; KLEINKOPF, G. E.; PORTER, L. K. Nitrogen fertilizer efficiencies on potatoes. *American Potato Journal*, v. 65, p. 377-386, 1988. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02852956>
- XU, Q. F.; TSAI, C. L.; TSAI, C. Y. Interaction of potassium with the form and amount of nitrogen nutrition on growth and nitrogen uptake of maize. *Journal of Plant Nutrition*, v. 15, p. 23-33, 1992. <http://dx.doi.org/10.1080/01904169209364299>
- YANG, J.; HAN, K-H. Functional characterization of Allantoinase genes from *Arabidopsis* and a nonureide-type legume black locust. *Plant Physiology*, v. 134, p. 1039-1049, 2004. PMID:14976234 PMCID:PMC389928. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.103.034637>
- YIN, X. Y.; LANTINGA, E. A.; SCHAPENDONK, A. H. C. M.; ZHONG, X. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. *Annals of Botany*, v. 91, p. 893-903, 2003. PMID:12730071. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcg096>
- ZEBARTH, B. J.; DRURY, C. F.; TREMBLAY, N.; CAMBOURIS, A. N. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal Soil Science*, v. 89, p. 113-132, 2009. <http://dx.doi.org/10.4141/CJSS07102>
- ZEBARTH, B. J.; MILBURN, P. H. Spatial and temporal distribution of soil inorganic nitrogen concentration in potato hills. *Canadian Journal Soil Science*, v. 83, p. 183-195, 2003. <http://dx.doi.org/10.4141/S02-061>