

RODRIGO NOGUEIRA MARTINS

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE SENSOR ÓPTICO PARA
ADUBAÇÃO NITROGENADA À TAXA VARIADA NA CULTURA DO
MILHO PARA PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M386v
2019
Martins, Rodrigo Nogueira, 1988-
Viabilidade técnica e econômica de sensor óptico para
adubação nitrogenada à taxa variada na cultura do milho para
pequenas propriedades rurais / Rodrigo Nogueira Martins. –
Viçosa, MG, 2019.
ix, 61 f. : il. ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Clorofilômetro. 3. Estudos de
viabilidade - Aspectos econômicos. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

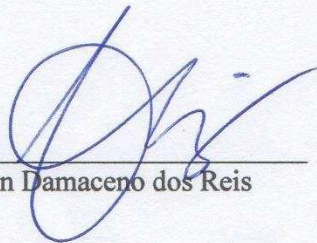
CDD 22. ed. 631.3

RODRIGO NOGUEIRA MARTINS

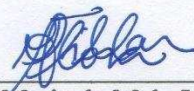
**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE SENSOR ÓPTICO PARA
ADUBAÇÃO NITROGENADA À TAXA VARIADA NA CULTURA DO
MILHO PARA PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

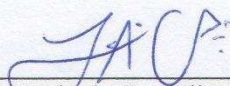
APROVADA: 21 de fevereiro de 2019.



Janderson Damaceno dos Reis



Flora Maria de Melo Villar
(Coorientadora)



Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

Aos meus pais Irene Aurora Martins e Sebastião Martins (In Memoriam), pelo exemplo de vida, incentivo, amor e confiança.

DEDICO

“A felicidade não se resume na ausência de problemas, mas sim na sua capacidade de lidar com eles. ”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela oportunidade, confiança e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Altair Dias de Moura, Flora Maria de Melo Villar e Wagner da Cunha Siqueira, pelas contribuições e orientações, sendo imprescindíveis para o desenvolvimento do trabalho.

Ao IFNMG – Campus Januária, na pessoa da professora Selma Alves Abrahão pela concessão da área experimental, conhecimentos transmitidos e amizade.

Aos membros do GEMAP - IFNMG (Grupo de estudos em máquinas e agricultura de precisão) e do laboratório de solos pela ajuda e disponibilidade na condução do experimento.

Aos colegas do laboratório de mecanização agrícola (LMA) Lucas, Samira, Guilherme, Fernando, Vinicius, Amélia, Emanuel, Marcelo e Jorge pela amizade e companheirismo.

A toda minha família, que sempre confiou e me apoiou. Em especial, aos meus irmãos pelo amor, incentivo e apoio em todas as decisões tomadas.

A minha namorada Juliana, pelo amor, carinho e apoio a mim oferecidos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste projeto.

A DEUS por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades ao longo dessa jornada.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

RODRIGO NOGUEIRA MARTINS, filho de Irene Aurora Martins e Sebastião Martins (In Memoriam), nasceu em Janaúba, Minas Gerais, no dia 24 de junho de 1988.

Em fevereiro de 2017, concluiu o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental no Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), Campus Janaúba.

Em março de 2017, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2019.

RESUMO

MARTINS, Rodrigo Nogueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Viabilidade técnica e econômica de sensor óptico para adubação nitrogenada à taxa variada na cultura do milho para pequenas propriedades rurais.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Altair Dias de Moura, Flora Maria de Melo Villar e Wagner da Cunha Siqueira.

A otimização de uso do nitrogênio (N) é, recentemente, um dos principais alvos de estudo no contexto da agricultura de precisão (AP) no Brasil. Para tal, tem-se utilizado a recomendação a taxa variada prescrita com base em sensores ópticos. O uso de sensores ópticos é vantajoso por possibilitar o ajuste de adubações com o período de maior demanda pela planta. Isso resulta em economia de N, menor impacto ambiental e até mesmo no aumento de produtividade das culturas agrícolas. Entretanto, é necessário determinar se o aumento nos rendimentos pela redução de despesas com o N, resultaria em maior rentabilidade quando comparado ao sistema convencional de adubação. Portanto, esse trabalho teve como objetivos: (1) avaliar a viabilidade técnica do clorofilômetro SPAD-502 na recomendação de uma dose econômica de N a taxa variada na cultura do milho utilizando diferentes limiares do índice de suficiência de nitrogênio (ISN); (2) determinar por meio de cenários de área e zonas de amostragem do índice SPAD, a viabilidade econômica associada ao uso dos clorofilômetros SPAD-502 e ClorofiLOG CFL1030 e do radiômetro Greenseeker para o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho usando modelos sem inclusão de risco (modelo determinístico) e com inclusão de risco (modelo probabilístico). O estudo foi conduzido em área experimental do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), Januária-MG, entre fevereiro a junho de 2018. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 5 tratamentos e 5 repetições, sendo: uma testemunha sem aplicação de N (T0); aplicação uniforme de 112 kg ha⁻¹ de N (parcela de referência), sendo a dose parcelada em 50% no estádio de quatro folhas emitidas (V4) e 50% em V8 (T1); aplicação de N a taxa variada controlada por um ISN fixo de 95% para os estádios V8, V10 e V14; (T2) e aplicação de N a taxa variada controlada por um ISN variável de 98, 95 e 93% nos mesmos estádios (T3 e T4). Inicialmente, os tratamentos a taxa variada receberam 44,8 (T2 e T3) e 33,6 kg ha⁻¹ de N em V4 (T4). As demais aplicações foram realizadas com base no valor do ISN nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente. Assim, quando o valor do ISN se apresentou abaixo do limiar proposto, os tratamentos T2 e T3 receberam 22,4 kg ha⁻¹ de N em cada estádio monitorado (V8, V10 e V14). Para o T4, aplicou-se quando

necessário 33,6, 28,00 e 16,8 kg ha⁻¹ de N nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente. Os tratamentos a taxa variada manejados pelo clorofilômetro foram mais eficientes que as doses pré-fixadas, pois consumiram em média de 21,25 a 24,00% a menos de N e apresentaram a mesma produtividade de grãos. O ISN fixo de 95% resultou em maior eficiência de uso de N quando comparado ao ISN variável nos estádios avaliados. Para a análise de viabilidade econômica do investimento associado ao uso do clorofilômetro (preço nacional e importado) foram elaborados fluxos de caixa representativos da produção de milho utilizando os três tratamentos a taxa variada definidos aqui como sistemas de adubação (S1, S2 e S3). Adicionalmente, foram realizadas simulações para determinar a viabilidade do investimento caso fossem utilizados o modelo de clorofilômetro nacional ou o radiômetro. Para tal, os fluxos de caixa foram constituídos pelas saídas com a aquisição dos equipamentos (sensor) e despesas operacionais (fertilizantes, sementes e defensivos agrícolas e mão de obra) nas etapas de preparo do solo, plantio, adubação de plantio e cobertura, amostragem do índice SPAD (tratamentos a taxa variada), aplicação de defensivos e colheita. Já as entradas foram compostas pelo milho comercializado. Além disso, para cada sistema de adubação foram simulados 8 cenários de área cultivada e amostragem com o clorofilômetro, sendo: Cenários 1, 2, 3 e 4, amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8, amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. A viabilidade econômica foi determinada por meio dos seguintes indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Razão Benefício–Custo descontado (B/C (%)), Taxa Interna de Retorno (TIR) e do payback time. Neste caso, considerou-se uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 6% ao ano e horizonte de projeto de 8 anos. A análise de risco foi realizada pela simulação de Monte Carlo. Os resultados mostraram que, independente do tipo de amostragem, o investimento no clorofilômetro SPAD-502 adquirido no mercado nacional seria economicamente viável em áreas de cultivo a partir de 7 ha. Por outro lado, a aquisição do sensor via importação já se mostra viável a partir dos 5 ha. Diferentemente, o investimento no ClorofiLOG CFL1030 ou no Greenseeker resultaria em maior viabilidade econômica a partir de 3 ha independente do tipo de amostragem.

ABSTRACT

MARTINS, Rodrigo Nogueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Technical and economic feasibility of an optical sensor for variable rate nitrogen fertilization in corn for small rural properties.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers: Altair Dias de Moura, Flora Maria de Melo Villar and Wagner da Cunha Siqueira.

The nitrogen (N) use optimization is recently one of the main targets in the context of precision agriculture (PA) studies in Brazil. Thus, it has been used recommendation of variable rate fertilization prescribed based on optical sensors readings. The use of optical sensors is advantageous because it allows the adjustment of fertilization with the period of greatest demand of the plant. This results in N savings, lower environmental impact and even higher crop yield. However, it is necessary to determine if the increase in yield, by reducing expenses with N, would result in greater profitability when compared to the conventional fertilization system. Therefore, this study aimed to: (1) evaluate the technical feasibility of the SPAD-502 chlorophyll meter for recommending an economical N dose under variable rate using different thresholds of the nitrogen sufficiency index (NSI); (2) determine by means of the SPAD index sampling zones and area scenarios, the economic feasibility associated to the use of the chlorophyll meters SPAD-502 and ClorofiLOG CFL1030, and the radiometer Greenseeker through models without including the risk (deterministic model) and including the risk (probabilistic model). The study was conducted in an experimental field from the Federal Institute of Northern Minas Gerais (IFNMG), Januária - Minas Gerais State, between February and June 2018. The experimental design was by randomized blocks with 5 treatments and 5 replicates, which were: control treatment without N application (T0); uniform application of 112 kg ha⁻¹ of N (reference treatment), with the dose being divided in 50% in the four-leaf stage (V4) and 50% in V8 (T1); N application at a variable rate controlled by a fixed NSI threshold of 95% for the V8, V10 and V14 stages (T2); and N application at a variable rate controlled by a variable NSI threshold of 98, 95 and 93% in the same stages (T3 and T4). Initially, the variable rate treatments received 44.8 (T2 and T3) and 33.6 kg ha⁻¹ of N in V4 (T4). Further applications were performed based on the NSI threshold in the V8, V10, and V14 stages, respectively. Thus, when the NSI value was below the proposed threshold, treatments T2 and T3 received 22.4 kg ha⁻¹ of N at each monitored stage (V8, V10, and V14). For T4, 33.6, 28.00 and 16.8 kg ha⁻¹ of N were applied when needed at the V8, V10, and V14 stages, respectively. The variable rate

treatments managed by the chlorophyll meter were more efficient than the reference treatment (pre-fixed doses), since they consumed on average from 21.25 to 24.00% less N and presented the same grain yield. The fixed NSI of 95% resulted in higher N use efficiency when compared to the variable NSI in the evaluated stages. In order to perform the economic feasibility analysis of the investment, associated with the use of a chlorophyll meter (with national and imported prices), representative cash flows of corn production were elaborated using the three variable rate treatments, which were defined in the present study as fertilization systems (S1, S2, and S3). Additionally, simulations were performed to determine the feasibility of the investment if the nationally manufactured chlorophyll meter or a radiometer sensor were used instead. To do so, cash flows were elaborated through the acquisition of equipments (sensor), and operational expenses (fertilizers, seeds, agricultural pesticides, and labor hour) in the stages of soil preparation, planting, planting and side-dressing fertilization, SPAD index sampling (variable rate treatments), pesticide application and harvesting. The inputs were composed of the amount of marketed corn. Besides that, for each fertilization system, 8 scenarios of cultivated area and chlorophyll meter sampling were simulated: Scenarios 1, 2, 3 and 4 with global sampling of the SPAD index mean for 1, 3, 5 and 7 ha. Scenarios 5, 6, 7 and 8 with zonal sampling (subareas), using 3, 5, 7 and 9 zones for 1, 3, 5 and 7 ha, respectively. The economic feasibility was determined by the following indexes: net present value (NPV), discounted benefit-cost ratio (B/C (%)), internal rate of return (IRR) and payback time. In this case, a minimum interest rate (MIR) of 6% per year and an 8-year project horizon was considered. The risk analysis was performed through the Monte Carlo simulation. The results showed that, regardless of the sampling type, the investment in the chlorophyll meter SPAD-502 acquired in the national market would be economically feasible in cultivation areas from 7 ha. On the other hand, the sensor acquisition via importation would be economically feasible from 5 ha. Differently, an investment in the chlorophyll meter ClorofiLOG CFL1030 or in the Greenseeker would result in greater economic feasibility in areas from 3 ha independent of the sampling type.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 REFERÊNCIAS	7
2. ARTIGO I - ADUBAÇÃO NITROGENADA A TAXA VARIADA NA CULTURA DO MILHO PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO.....	11
RESUMO	11
ABSTRACT.....	12
2.1 INTRODUÇÃO	13
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	14
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
2.4 CONCLUSÃO	23
2.5 REFERÊNCIAS	24
3. ARTIGO II - VIABILIDADE ECONÔMICA SOB CONDIÇÕES DE RISCO DE SENSORES ÓPTICOS PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA A TAXA VARIADA NO MILHO.....	27
RESUMO	27
ABSTRACT.....	28
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.2.1 Fonte de Dados	31
3.2.2 Análise de Viabilidade Econômica	33
3.2.3 Análise de Viabilidade Econômica sob Condições de Risco	36
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.3.1 Modelagem para Desenvolvimento da Análise Econômica.....	37
3.3.2 Análise de Viabilidade Econômica	39
3.3.3 Análise de Viabilidade Econômica Sob Condições de Risco	44
3.4 CONCLUSÃO	50
3.5 REFERÊNCIAS	51
4. CONCLUSÃO GERAL	55
APÊNDICES.....	56
Apêndice A.....	56
Apêndice B.....	57
Apêndice C.....	60
Apêndice D.....	61

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas tem crescido o uso ao modelo de produção agrícola intensiva, que, aliado à alta quantidade de agroquímicos utilizados, tem resultado em inúmeros impactos ambientais. Sabe-se que a evolução tecnológica tem sido crucial para vencer o desafio de aumentar a produção de alimentos de forma a suprir a demanda populacional. Contudo, mesmo com avanços em tecnologia e ganho em produção, o modelo de agricultura praticado nos últimos anos deixou de lado a questão da conservação ambiental (CLARK; TILMAN, 2017; SRIVASTAVA et al., 2016).

Estima-se que a população global deverá ser de 9,2 bilhões de pessoas até 2050, exigindo da agricultura atual um aumento de 60% na produção de alimentos (FAO, 2016). Logo, o desafio atual é elevar a eficiência dos sistemas de produção agrícola para suprir a demanda por alimentos. No entanto, adotando um modelo de produção que seja economicamente viável e sustentável, de modo a garantir elevada produção e a preservação dos recursos naturais para gerações futuras.

Dada à diminuição de áreas não utilizadas e com potencial agrícola, atender essa demanda exigirá rendimentos cada vez maiores nas culturas. Diante disso, torna-se necessário adotar tecnologias que permitam gerenciar de modo racional o uso da água e dos insumos necessários à produção agrícola (PROST et al., 2016). Neste contexto, a agricultura de precisão (AP) tem-se apresentado como alternativa para o gerenciamento localizado nos sistemas agrícolas. A AP leva em consideração a variabilidade espacial e temporal existente tanto nos atributos do solo como na exigência nutricional das plantas, otimizando o uso dos insumos de produção.

O uso da AP tem se destacado no gerenciamento a sítio específico de insumos direcionados a nutrição de plantas, principalmente os fertilizantes a base de nitrogênio (N) que, normalmente, apresentam custo elevado e podem apresentar baixa eficiência se manejados de maneira incorreta. O manejo localizado do nitrogênio (N) é uma abordagem adotada de diversas formas dentro da AP, seja pela definição de zonas de manejo para aplicação (PERALTA et al., 2015), uso em taxa variada com base em sensores de planta (BRAGAGNOLO et al., 2016) ou por meio do processamento de imagens digitais (MARESMA et al., 2016). Essas ferramentas atuam como suporte a decisão, possibilitando que seja aplicada somente a quantidade necessária nos momentos de maior demanda pela planta.

O uso de doses de N a taxa variada, prescrita com base nas leituras de sensores ópticos, tem sido proposto em substituição à dose uniforme tradicionalmente utilizada pelos agricultores. No Brasil, ainda é muito utilizada a recomendação da dose uniforme, a qual é definida previamente a semeadura com base no conteúdo de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora, no histórico da área e na produtividade esperada (AMADO et al., 2002; COELHO et al., 2013). Entretanto, a elevada variação das condições ambientais, entre anos, leva ao questionamento quanto a real eficiência do uso destes métodos como elementos definitivos na recomendação da adubação nitrogenada. Essas variações devem-se a íntima relação dos processos de mineralização, imobilização, lixiviação e volatilização do N, principalmente, com fatores climáticos, especialmente a temperatura e a precipitação pluvial (VITTI et al., 2007).

De modo geral, essas variações tendem a reduzir a disponibilidade de N devido à diminuição da atividade microbiana e redução na velocidade de decomposição da matéria orgânica no solo. Assim, a recomendação de doses uniformes com base nestes métodos pode levar a aplicações excessivas ou deficitárias, resultando em prejuízos ambientais e econômicos, como exemplo, na cultura do milho, a qual se aproveita de 28 a 57% do N total recebido (RIMSKI-KORSAKOV et al., 2012).

O milho (*Zea mays* L.) é a segunda cultura de maior importância na produção agrícola no Brasil. Na safra 2017/18 foram cultivados cerca de 16,64 milhões de hectares, com produção de 82,2 milhões de toneladas de grãos. Estes valores representam um incremento de 52 % no total produzido, quando comparados ao ano agrícola 2007/08 (CONAB, 2018). Este aumento foi possível devido a mudanças tecnológicas recentes, tais como avanços no melhoramento genético, qualificação de adubações, principalmente a nitrogenada em semeadura e cobertura, modernização da mecanização agrícola, uso de irrigação e melhor gestão dos recursos agrícolas no campo (VIAN et al., 2016).

O N influencia diretamente na produtividade da cultura do milho, pois apresenta grande importância nos processos bioquímicos da planta, atuando como constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos e a clorofila (SANTOS et al., 2010). Dada a sua importância, o manejo racional deste nutriente torna-se necessário para aumentar a eficiência produtiva e reduzir os prejuízos (ambientais e econômicos) causados pelo seu uso indevido.

Para contornar essa limitação, o uso de sensores ópticos, para auxiliar o manejo da adubação nitrogenada a taxa variada, proporcionaria a redução de custos na produção, assim como tornaria a produção mais sustentável. A leitura destes sensores baseia-se nas propriedades ópticas das folhas, combinando valores de reflectância ou transmitância do dossel ou da folha de diferentes comprimentos de onda.

Dentre os sensores comerciais disponíveis, o clorofilômetro SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development), desenvolvido na década de 90 com o objetivo de analisar a campo o teor relativo de clorofila na folha e relacionar este valor com o estado nutricional das plantas, vem sendo muito utilizado para o manejo localizado do N em culturas agrícolas (GODOY et al., 2003; MINOLTA, 1989).

O SPAD-502 mede a intensidade da luz (650 e 940 nm) transmitida através de uma área de 2 mm por 3 mm de uma folha. O comprimento de onda de 650 nm coincide com a região espectral associada à atividade máxima de clorofila, enquanto a transmitância a 940 nm é utilizada como referência para compensar fatores como o teor de umidade e espessura da folha (HARDIN et al., 2012; HAWKINS et al., 2007). O resultado das medidas corresponde ao Índice SPAD, representado por um valor adimensional entre 1 e 100 que se correlaciona com o teor de N foliar. Essa correlação é atribuída ao fato de 50% a 70% de todo o N presente na folha estar contido na molécula de clorofila (PAN et al., 2004).

As medições do índice SPAD apresentam como vantagem adicional o fato das leituras não serem influenciadas pelo consumo de luxo de N, o qual, nessa situação, acumula-se na forma de nitrato (NO_3^-) nas plantas (ARGENTA et al., 2001; BLACKMER; SCHEPERS, 1995), ou seja, as leituras são relacionadas ao N que foi efetivamente metabolizado e que, conseqüentemente, determinará o potencial produtivo da cultura. No Brasil, o clorofilômetro SPAD-502 tem sido utilizado na avaliação do estado nutricional de N em milho (ARGENTA et al., 2003; BRAGAGNOLO et al., 2016; SEGATTO et al., 2017).

Definir a dose exata de N é uma meta difícil de ser alcançada e, a cada dia, torna-se mais importante, pelo fato de o N ser altamente requerido pela cultura, apresentar custo elevado e possuir alto potencial poluidor (HURTADO et al., 2011). Por outro lado, o emprego de subdoses de N restringe a produtividade do milho (HAWKINS et al., 2007). Em princípio, a maior eficiência pode ser alcançada por meio da sincronização entre as adubações e o período de maior demanda pela planta.

Para definição da dose a ser aplicada, o instituto americano Potash & Phosphate, (PPI) publicou uma metodologia para recomendação de N a taxa variada baseando-se em leituras de clorofila de uma parcela de referência para as culturas do milho e trigo. Nesta metodologia calcula-se o índice de suficiência de N (ISN). Quando este for menor que 95%, recomenda-se a aplicação de N, praticando a chamada “adubação quando necessária” com o objetivo de otimizar o uso de N em cobertura (BARBOSA FILHO et al., 2008; FRANCIS; PIEKIELEK, 1999).

Desta forma, é possível trabalhar com o ISN em que leituras inferiores a, por exemplo, 95% do valor obtido nas parcelas de referência indicariam uma situação de deficiência nutricional (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; VARVEL et al., 1997) e de necessidade de aplicação de N em cobertura. Todavia, respostas controversas frente ao uso do clorofilômetro e do percentual do ISN a ser utilizado têm sido relatadas em outros estudos.

Godoy et al. (2003) avaliaram a adubação nitrogenada a taxa variada na cultura do milho utilizando a metodologia do PPI com limiar do ISN de 0,95 para quatro estádios de desenvolvimento da planta. Os resultados obtidos levaram a conclusão que a utilização do ISN de 0,95 não representa a melhor opção para obtenção do máximo potencial produtivo da cultura. No experimento, a produtividade mais alta foi atingida pelas plantas que apresentaram um $ISN \geq 0,95$ no estágio de sete folhas totalmente expandidas (V7) e mantiveram o $ISN \geq 0,90$ até o enchimento dos grãos.

Segundo Varvel et al. (1997) se o ISN for $\leq 0,90$ no estágio V8, a produtividade máxima não será alcançada com as aplicações de N em cobertura, pois o N aplicado inicialmente não seria suficiente para o ótimo crescimento e o potencial de produção já estaria afetado. Assim, um limite de 0,90 poderia ser considerado a partir do estágio V8. Devido à variação do índice SPAD com o ciclo da cultura do milho, pode-se sugerir que sejam adotados diferentes valores de ISN limite no ciclo, buscando um manejo mais eficiente do N e, conseqüentemente, viabilizando em termos financeiros o uso do SPAD no manejo da adubação.

De fato, um dos fatores que mais afetam a economicidade das culturas agrícolas são os custos com adubação e, particularmente, na cultura do milho, a adubação nitrogenada. Por isto, deve-se garantir uma eficiência ótima, principalmente do ponto de vista econômico, na utilização deste insumo. Uma das formas de otimizar economicamente a utilização de um insumo específico é determinar sua dose ótima econômica (ESPERANCINI et al., 2015). Raj et al. (1997) afirmaram que a dose mais

econômica define a quantidade de fertilizante ou nutriente a aplicar para a obtenção do máximo lucro por área.

Determinar a dose ótima econômica é uma informação importante, mas não suficiente, pois, é necessário saber qual o ganho econômico que a adubação pode proporcionar. Os incrementos de produção diminuem com o aumento das doses, o mesmo acontece com a eficiência de uso do fertilizante. A produtividade ótima econômica se dá num ponto diferente da produtividade física máxima (ESPERANCINI et al., 2015).

Na agricultura, a produtividade física máxima representa um objetivo a ser atingido, sendo este obtido por constantes avanços tecnológicos. Diferentemente, a produtividade ótima econômica é derivada da análise econômica dos resultados da produtividade física máxima, a qual se representa por adições inferiores de insumos, mas que resultam em maior retorno financeiro (OLIVEIRA, 2016).

Deve-se ressaltar que entre a produtividade máxima técnica e a produtividade ótima econômica, diversos fatores devem ser levados em consideração, tais como: produtividade esperada, histórico da área, características do solo, teor de matéria orgânica (M.O), condições climáticas, sistema de manejo utilizado, cultura antecessora, preço de mercado do fertilizante e do milho. Esses fatores visam reduzir as perdas, aumentar o aproveitamento do N, a produtividade e a qualidade de grãos e, conseqüentemente, a lucratividade do produtor com menor risco para o meio ambiente, conceito imprescindível na “agricultura sustentável”.

No entanto, alguns estudos relatam que a principal vantagem dos sensores ópticos e tecnologias para o manejo da adubação nitrogenada ocorre pelo menor consumo de fertilizantes e, conseqüentemente, menor impacto ambiental, ao invés do aumento de produtividade das culturas agrícolas (BIERMACHER et al., 2008; CAO et al., 2017). Por outro lado, nota-se a ausência de estudos acerca da viabilidade econômica e da incerteza associada ao uso de tais sensores, visto que o custo de aquisição é relativamente alto.

Alguns estudos avaliaram os benefícios ambientais e econômicos com a aplicação localizada de insumos (LINK et al., 2006; PAMPOLINO et al., 2007), a rentabilidade de um sensor óptico para aplicação de N a taxa variada (BIERMACHER et al., 2008) e os benefícios econômicos do uso de sistemas de suporte a decisão para programar aplicações de fungicidas para controle de doenças na cultura da batata (LIU et al., 2017). Shockley et al. (2011), avaliaram em estudo ao nível de fazenda a

viabilidade econômica da adoção de sistemas de piloto automático em máquinas agrícolas para produção de milho e soja. Os resultados mostraram que a economia de insumos gerada pela redução na área total sobreposta no campo pelas máquinas é maior que o custo anual de aquisição da tecnologia. Como resultado, todos os três sistemas avaliados mostraram-se lucrativos com período de retorno máximo de 4,5 anos e área de cultivo máxima de 630 hectares. Os resultados obtidos demonstram o potencial desta tecnologia para aumentar os ganhos financeiros, reduzir o risco e permitir ajustes para a otimização das operações mecanizadas no campo.

Entretanto, nenhum desses estudos considerou a incerteza no investimento em tecnologias relacionadas a AP para áreas de pequeno porte. Muito menos, consideraram os aspectos temporais da variabilidade de preços do produto final, dos insumos e da produtividade da cultura de maneira conjunta. Portanto, no presente estudo propõe-se uma metodologia utilizando o clorofilômetro SPAD-502, para aplicação de dose econômica de N a taxa variada buscando identificar a área de produção que permita viabilizar de maneira técnica e econômica o seu uso como ferramenta para o manejo a sítio-específico da adubação nitrogenada.

Desta forma, espera-se com os resultados desse trabalho apresentar uma alternativa viável e de maior eficiência de adubação em relação ao sistema convencional (doses pré-fixadas), de modo a aumentar a eficiência de uso do N (i.e., menor consumo de N e menor impacto ambiental) e, possivelmente, a produtividade pela cultura. Além disso, espera-se mostrar que o uso de sensores como o clorofilômetro, associado a técnica de adubação a taxa variada, pode ser economicamente viável para áreas de pequeno porte, cujo nível de adoção de tecnologias relacionadas a agricultura de precisão no Brasil mostra-se, em sua maioria, muito baixo ou inexistente.

Esta dissertação foi estruturada em dois artigos. O artigo 1 teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica do SPAD-502 na recomendação de dose econômica de N a taxa variada utilizando diferentes limiares do ISN. O artigo 2 teve como objetivo determinar por meio de cenários de área e zonas de amostragem do índice SPAD, a viabilidade econômica associada ao uso dos clorofilômetros SPAD-502 e ClorofiLOG CFL1030 e do radiômetro Greenseeker na cultura do milho usando modelos sem inclusão de risco (modelo determinístico) e com inclusão de risco (modelo probabilístico).

1.1 REFERÊNCIAS

- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recommendation of nitrogen fertilization for no-till corn in RS and SC, adapted to the use of soil cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 26, p. 241–248, 2002.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G. Teor de clorofila na folha como indicador do nível de N em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 715- 722, 2001.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L. STRIEDER, M. L.; SUHRE, E.; EICHMANN, L. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.1, p.109-119, 2003.
- BARBOSA FILHO, M. P.; COBUCCI, T.; FAGERIA, N. K.; MENDES, P. N. Determinação da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura no feijoeiro irrigado com auxílio do clorofilômetro portátil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n.7, p.1843-1848, 2008.
- BIERMACHER, J. T.; EPPLIN, F. M.; BRORSEN, B. W.; SOLIE, J. B.; RAUN, W. R. Economic feasibility of site-specific optical sensing for managing nitrogen fertilizer for growing wheat. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 3, p. 213-230. 2009.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 10, p.1791-1800, 1994.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor N status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, v. 8, n.1, p. 56–60. 1995.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p.103-111, 2016.
- CAO, Q.; MIAO, Y.; LI, F.; GAO, X.; LIU, B.; LU, D.; CHEN, X. Developing a new Crop Circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 2-18. 2017.

CLARK, M.; TILMAN, D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. **Environmental Research Letters**. v. 12, n. 6, pp 01-11, 2017.

COELHO, F. S.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; BRAUN, H.; DA SILVA, I. R. Valor e predição do nível crítico de índices para avaliar o estado nitrogenado da batateira. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p115-122. 2013

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: décimo primeiro levantamento. Agosto 2018. v.5, safra 2017/18, n. 11.** Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra-graos> > Acesso em: 09 ago. 2018.

ESPERANCINI, M. S. T.; AFONSO, P. F. N.; GAVA, G. J. C.; VILLAS BOAS, R. L. Dose ótima econômica de nitrogênio em cana-de-açúcar aplicada via fertirrigação por gotejamento. **Irriga**, v.1, n. 1, p.28-39, 2015.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Save and grow in practice: maize, rice, wheat. **A Guide to Sustainable Cereal Production**. Roma, 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4009e.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

FRANCIS, D. D.; PIEKIELEK, W. P. **Assessing Crop Nitrogen Needs with Chlorophyll Meters**. SSMG-12, p. 1-4, 1999.

GODOY, L. J. G.; VILLAS BOAS, R. L.; GRASSI FILHO, H. Adubação nitrogenada na cultura do milho baseada na medida do clorofilômetro e no índice de suficiência em nitrogênio (ISN). **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 373-380, 2003.

HARDIN, J. A.; SMITH, M. W.; WECKLER, P. R.; CHEARY, B. S. In situ measurement of pecan leaf nitrogen concentration using a chlorophyll meter and vis-near infrared multispectral camera. **Hortscience**, Alexandria, v. 47, n. 7, p. 955-960, 2012.

HAWKINS, J. A.; SAWYER, J. E.; BARKER, D. W.; LUNDEVALL, J. P. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 4, p. 1034–1040. 2007.

HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V.; SILVA, C. A.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em

cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, v.41, n. 6, p.1011-1017, 2011.

LINK, J.; GRAEFF, S.; BATCHELOR, W. D.; CLAUPEIN, W. Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. **Agricultural Systems**, v. 91, n.1, p.135–153. 2006.

LIU, Y.; LANGEMEIER, M. R.; SMALL, I. M.; JOSEPH, L.; FRY, W. E. Risk management strategies using precision agriculture technology to manage potato late blight. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p.562-575. 2017.

MARESMA, Á.; ARIZA, M.; MARTÍNEZ, E.; LLOVERAS, J.; MARTÍNEZ CASASNOVAS, J. A. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 973-988. 2016.

MINOLTA CAMERA Co. Ltd. **Chlorophyll meter SPAD-502 Instructional Manual**. Minolta, Osaka, Japan. 1989, 22p.

OLIVEIRA, G. Q. **Fertirrigação nitrogenada com gotejamento na cultura da berinjela**. Tese (Doutorado em agronomia) – Departamento de agronomia. Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 68p. 2016.

PAMPOLINO, M. F.; MANGUIAT, I. J.; RAMANATHAN, S.; GINES, H. C.; TAN, P. S.; CHI, T. T. N.; RAJENDRAN, R.; BURESH, R.J. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems. **Agricultural Systems**, v. 93, p. 1–24. 2007.

PAN, Y.; HOM, J.; JENKINS, J.; BIRDSEY, R. Importance of foliar nitrogen concentration to predict forest productivity in the mid-Atlantic region. **Forest Science**, v. 50, n. 3, p. 279–289, 2004.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; CASTRO FRANCO, M.; CÓRDOBA, M.; BULLOCK, D. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 110, p. 103-113, 2015.

PROST, L.; BERTHET, E. T.; CERF, M.; JEUFFROY, M. H.; LABATUT, J.; MEYNARD, J. M. Innovative design for agriculture in the move towards

sustainability: scientific challenges. **Research in Engineering Design**. v. 28, n. 1, p.119-129, 2017.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. N. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RIMSKI-KORSAKOV, H.; RUBIO, G.; LAVADO, R. S. Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 93, p. 253–263, 2012.

SANTOS, M. M.; GALVÃO, J. C. C.; SILVA, I. R.; MIRANDA, G. V.; FINGER, F. L. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1185-1194, 2010.

SHOCKLEY, J. M.; DILLON, C. R.; STOMBAUGH, T. S. A whole farm analysis of the influence of auto-steer navigation on net returns, risk, and production practices. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 43, n. 1, p.57-75. 2011.

SEGATTO, C.; CONTE, R.; LAJÚS, C. R.; DA LUZ, G. L. Relação da leitura do clorofilômetro com o rendimento da cultura do milho em diferentes níveis de suprimimento de nitrogênio. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 16, n. 2, p. 253-259, 2017.

SRIVASTAVA, P.; SINGH, R.; TRIPATHI, S.; RAGHUBANSHI. Na urgent need for Sustainable thinking in agriculture – An Indian scenario. **Ecological Indicators**, v. 67, n. 1, p. 611-622, 2016.

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, n. 20, p. 1233–1239, 1997.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D H.; DAMIAN, J. D.; BREDEMEIER, C. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 464- 471, 2016.

VITTI, A. C.; TRIVELINII, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 491-498. 2007.

2. ARTIGO I - ADUBAÇÃO NITROGENADA A TAXA VARIADA NA CULTURA DO MILHO PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO

RESUMO

O nitrogênio (N) desempenha papel fundamental na otimização entre a produtividade de grãos e o rendimento econômico da cultura do milho. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar a viabilidade técnica de um clorofilômetro portátil na recomendação de dose econômica de N a taxa variada utilizando diferentes limiares do índice de suficiência de nitrogênio (ISN). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 5 tratamentos e 5 repetições, sendo: T0: sem aplicação de N; T1: 112 kg ha⁻¹ de N (dose pré-fixada), sendo 50% (56,00 kg) no estágio de quatro folhas emitidas (V4) e 50% em V8; T2: 44,8 kg ha⁻¹ de N em V4 + 22,4 kg ha⁻¹ de N a taxa variada com base no ISN (< 95%) nos estádios V8, V10 e V14; T3: 44,8 kg ha⁻¹ de N em V4 + 22,4 kg ha⁻¹ de N a taxa variada com base no ISN (< 98, 95 e 93%) nos mesmos estádios; e T4: 33,6 kg ha⁻¹ de N em V4 + 33,6, 28,0 e 16,8 kg ha⁻¹ de N conforme o ISN (< 98, 95 e 93%) em V8, V10 e V14, respectivamente. Os tratamentos a taxa variada foram mais eficientes que a dose pré-fixada, pois consumiram menor quantidade de N e apresentaram a mesma produtividade de grãos. O ISN fixo de 95% apresentou maior eficiência de uso de N quando comparado ao ISN variável nos estádios avaliados.

Palavras-chave: agricultura de precisão, clorofilômetro, gerenciamento sítio-específico, *Zea mays* L.

NITROGEN VARIABLE RATE FERTILIZATION IN CORN CROP PRESCRIBED BY OPTICAL SENSOR

ABSTRACT

Nitrogen (N) plays a key role in the optimization between corn grain yield and its economic return. Based on that, this study aimed to evaluate the technical feasibility of a portable chlorophyll meter for recommending an economic dose of N under variable rate using different threshold values of the nitrogen sufficiency index (NSI). The experimental design was a randomized block with 5 treatments and 5 replicates, which were: T0: without N application; T1: 112 kg ha⁻¹ of N (pre-fixed doses), with 50% (56.00 kg) applied in the four expanded leaves stage (V4) and 50% in the V8 stage; T2: 44.8 kg ha⁻¹ of N in V4 + 22.4 kg ha⁻¹ of N through variable rate based on NSI (< 95%) in the stages V8, V10 and V14; T3: 44.8 kg ha⁻¹ of N in V4 + 22.4 kg ha⁻¹ of N through variable rate based on NSI (< 98, 95 and 93%) in the same stages; and T4: 33.6 kg ha⁻¹ of N in V4 + 33.6, 28.0 and 16.8 kg ha⁻¹ of N according to NSI (< 98, 95 e 93%) in V8, V10 and V14, respectively. Variable rate treatments were more efficient than the pre-fixed dose, as they consumed less N and resulted in the same grain yield. Furthermore, the NSI fixed of 95% resulted in higher N use efficiency when compared to the variable NSI over the evaluated stages.

Key words: chlorophyll meter, precision agriculture, site-specific management, *Zea mays* L.

2.1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o segundo cereal mais produzido no Brasil. Na safra 2017/18 foram produzidas 82,2 milhões de toneladas de grãos. Esse valor representa um incremento de 52% na produção final, quando comparados ao ano agrícola 2007/08 (CONAB, 2018). Esse aumento é atribuído a avanços tecnológicos no melhoramento genético de híbridos, qualificação de adubações, principalmente a nitrogenada em semeadura e cobertura, mecanização agrícola e melhor gestão dos recursos agrícolas no campo (VIAN et al., 2016).

O nitrogênio (N) desempenha papel fundamental na otimização entre a produtividade de grãos e o rendimento econômico da cultura. Dessa forma, definir uma dose de máxima eficiência econômica para aplicação nos estádios de maior demanda pela cultura é um desafio e, a cada dia, torna-se mais importante, pois o uso de subdoses inibe o crescimento da planta e dos componentes de produção. Por outro lado, as superdoses resultam em baixa eficiência de uso e poluição ambiental (ZHU et al., 2016).

Neste contexto, a aplicação em taxa variada tem-se apresentado como alternativa para o gerenciamento a sítio específico de insumos direcionados a nutrição de plantas. O uso de doses de N em taxa variada tem sido prescrito com base em leituras de sensores ópticos como o clorofilômetro SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development - Minolta Corporation, Japan). O SPAD-502 emite luz em dois comprimentos de onda (λ), 650 nm (vermelho) e 940 nm (infravermelho), e indica o teor relativo de clorofila definido como índice SPAD (SCHLICHTING et al., 2015).

Para definição da dose a ser aplicada, o instituto americano Potash & Phosphate (PPI), possui uma metodologia para recomendação de N em taxa variada baseando-se em leituras do teor relativo de clorofila de uma parcela de referência para as culturas do milho e trigo (FRANCIS; PIEKIELEK, 1999). Nesta metodologia calcula-se o índice de suficiência de N (ISN). Para tal, aplica-se uma dose máxima de N na parcela de referência. Se o índice SPAD das demais parcelas for inferior a 95% do valor de referência, realiza-se a aplicação de N. Para tal, a dose é definida por meio de uma equação em que são considerados a produtividade desejada, teor de esterco no solo, estágio vegetativo e índice SPAD da parcela de referência (FRANCIS; PIEKIELEK, 1999).

Diferentemente, no método tradicional a recomendação é realizada previamente a semeadura com base no conteúdo de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora, histórico da área e produtividade desejada (AMADO et al., 2002; COELHO et al., 2013). Neste método aplica-se parte da dose total na semeadura e o restante em cobertura, contudo, sem considerar a variabilidade espacial e temporal do requerimento de N pela cultura. Buscando aumentar a eficiência de uso do N, o método do PPI mostra-se como uma alternativa vantajosa frente a recomendação tradicional em doses pré-fixadas, visto que possibilita ajustar a necessidade de aplicação aos momentos de maior demanda da cultura.

Todavia, respostas controversas frente ao uso do clorofilômetro e do limiar do ISN a ser utilizado para tomada de decisão na cultura do milho foram reportadas em outros estudos (GODOY et al., 2003; HURTADO et al., 2011; VARVEL et al., 1997). Assim, objetivou-se com o presente estudo avaliar a viabilidade técnica do clorofilômetro SPAD-502 na recomendação de dose econômica de N a taxa variada utilizando diferentes limiares do ISN.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área experimental no Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - IFNMG, em Januária-MG (15° 28' 55" S; 44° 22' 41" O; 474 m) no período de fevereiro a junho de 2018. O clima da região é do tipo Aw (tropical úmido, com inverno seco e verão chuvoso) de acordo com a classificação de Köppen, precipitação média anual de 900 mm, umidade relativa média 60% e temperatura média anual de 27 °C. O solo predominante é o Neossolo Quartzarênico, com relevo caracterizado como plano.

No experimento foi utilizado o híbrido simples de milho DKB310 PRO2 de ciclo semiprecoce. As sementes foram previamente tratadas com inseticida Imidacloprido + Thiodicarb, nas doses de 30 g ingrediente ativo (i.a) e 90 g i.a, respectivamente, e do regulador de crescimento Stimulate na dose de 120 g i.a para 60000 sementes. O controle de plantas daninhas e pragas em pós-emergência foi realizado aos 15 dias após emergência (DAE, estágio V4), utilizando-se o herbicida glifosato na dose de 1440 g ha⁻¹ i.a e o inseticida clorpirifós na dose de 288 g ha⁻¹ i.a.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com cinco tratamentos (sistema de manejo das doses de N em cobertura, na forma de ureia) e cinco repetições. Os tratamentos foram: T0 - testemunha, sem aplicação de N; T1

(parcela de referência) - aplicação de 112 kg ha⁻¹ de N, sendo 56 kg ha⁻¹ de N (50%) no estádio V4 e 56 kg ha⁻¹ de N no estádio V8; T2 - aplicação de 44,8 kg ha⁻¹ de N no estádio V4 e aplicação de 22,4 kg ha⁻¹ de N a taxa variada quando o valor do ISN < 95% nos estádios V8, V10 e V14; T3 - aplicação de 44,8 kg ha⁻¹ de N no estádio V4 e aplicação de 22,4 kg ha⁻¹ de N a taxa variada quando os valores do ISN < 98, 95 e 93% nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente e, T4 - aplicação de 33,6 kg ha⁻¹ de N no estádio V4 e aplicação de 33,6, 28,0 e 16,8 kg ha⁻¹ de N a taxa variada quando os valores do ISN < 98, 95 e 93% nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente.

Na etapa anterior a semeadura, a fertilidade de cada bloco foi analisada e corrigida, com exceção do N, conforme recomendado por Alvarez (1999). Para tal, foram aplicados 80 kg ha⁻¹ (blocos 1 e 5) e 90 kg ha⁻¹ (blocos 2, 3 e 4) de cloreto de potássio (58% de K) e 70 kg ha⁻¹ (todos os blocos) de superfosfato simples (18% de P₂O₅). A semeadura foi realizada manualmente em 09/02/2018 na densidade de cinco plantas por metro (62500 sementes ha⁻¹). Cada parcela foi composta por cinco linhas espaçadas em 0,8 m entre si e com 6 m de comprimento, totalizando 19,2 m² de área (6,0 x 3,2 m). A área útil foi de 9 m², sendo representada pelas três linhas centrais, tendo-se desprezado 0,5 m de cada extremidade da linha.

A dose total de cobertura na parcela de referência e a máxima que poderia ser aplicada nos tratamentos a taxa variada foi de 112 kg ha⁻¹ de N, correspondente à dose de máxima eficiência econômica - MEE (SILVA et al., 2016). A dose de MEE foi obtida igualando-se a primeira derivada da equação de resposta da produção do milho, em função de doses de N ($y = -0,1469x^2 + 39,354x + 3884,8$), à relação entre o preço médio do N contido na ureia e o preço do milho (R\$/kg: R\$/kg). Para determinar a dose de MEE foram utilizados dados de experimento realizado em condições similares de campo por Andrade et al. (2014). A relação média de preço (kg de ureia/kg de milho) foi 6,43, referente ao preço do N na forma de ureia, de R\$ 2,70 kg⁻¹, e o preço do milho, de R\$ 0,42 kg⁻¹, em janeiro de 2018 no comércio local.

Para o cálculo do ISN de cada parcela, Equação 1 (FRANCIS; PIEKIELEK, 1999), foram realizadas leituras do índice SPAD em 30 folhas de diferentes plantas, em amostragem aleatória, nos estádios de V2 a VT (pendoamento) com o clorofilômetro SPAD-502 (Konica, Minolta). No entanto, para fins de adubação, o ISN foi calculado somente nos estádios V8, V10 e V14. Ademais, a leitura do índice SPAD foi realizada desconsiderando-se a nervura central e as margens no terço médio da última folha emitida.

$$ISN = \frac{IS_{ptv}}{IS_{pr}} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que,

ISN - índice de suficiência de nitrogênio;

IS_{ptv} - índice SPAD na parcela com aplicação a taxa variada; e

IS_{pr} - índice SPAD na parcela de referência.

No terço médio das mesmas folhas utilizadas para leituras do índice SPAD foram coletados discos (0,7 cm de diâmetro), por meio de um vazador circular, para a análise do teor de nitrogênio total foliar (N foliar), pelo método de Kjeldahl. O material coletado foi identificado e depois acondicionado em sacos de papel para secagem e posterior análise, em que subamostras de 0,2 g de tecido vegetal passaram por processos de digestão, destilação e titulação.

Aos 120 DAE realizou-se manualmente a colheita das espigas em toda a área útil da parcela (9 m²). As espigas foram trilhadas mecanicamente e os grãos pesados. Para o cálculo da produtividade em kg ha⁻¹, a massa de grãos de cada parcela foi corrigida para a umidade de 13%.

Após a colheita, determinou-se em seis espigas, selecionadas de forma aleatória em cada parcela, as seguintes características: comprimento da espiga (CE), sendo medida a distância entre o primeiro e o último grão da linha mais longa com auxílio de uma régua; diâmetro da espiga (DE), obtido na parte mediana da espiga com o auxílio de um paquímetro; número de fileiras de grãos (NF) pela contagem manual das fileiras; número de grãos por fileira (NGF), obtido pela contagem do número de grãos em uma fileira; massa de 100 grãos (P100), sendo pesadas três amostras de 100 grãos por parcela e a massa ajustada para a umidade de 13%.

Os valores das leituras do índice SPAD e do N foliar nos estádios V8, V10 e V14 foram submetidos à análise de correlação linear simples para validação do clorofilômetro como indicador da necessidade de N pela cultura. Os resultados da produtividade dos grãos, CE, DE, NFG, NGF e massa de 100 grãos foram submetidos à análise de variância e teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software Rstudio (R CORE TEAM, 2018).

Avaliou-se a eficiência de uso do N (EUN) para todos os tratamentos utilizando-se a Equação 2.

$$EUN = \frac{Y_f - Y_0}{Q_f} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que,

EUN – Eficiência de uso do nitrogênio, kg kg^{-1} ;

Y_f – Produção com aplicação de N, kg;

Y_0 – Produção sem aplicação de N, kg; e

Q_f – Quantidade de N aplicado, kg.

Ademais, o milho foi cultivado sob regime de irrigação por meio do sistema de aspersão convencional. A lâmina d'água aplicada foi ajustada a partir da estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}) e do coeficiente de cultura (K_c) com base em dados climáticos da estação local. A estimativa da E_{To} foi realizada pelo método de Penman-Monteith, mantendo-se a umidade do solo próxima à capacidade de campo.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias do índice SPAD, do N foliar e do índice de suficiência de nitrogênio (ISN) são apresentados na Figura 1. O índice SPAD, com exceção do tratamento T0, apresentou tendência de leituras crescentes até o estágio V8 (28 DAE) e após este período decresceu até a última leitura no estágio VT aos 56 DAE (Figura 1a). Essa redução pode estar associada a maior demanda de N a partir do estágio V8, pois nessa fase a planta inicia a definição dos componentes da espiga (e.g., número de fileiras, comprimento, grãos por fileira) (RITCHIE et al., 1993).

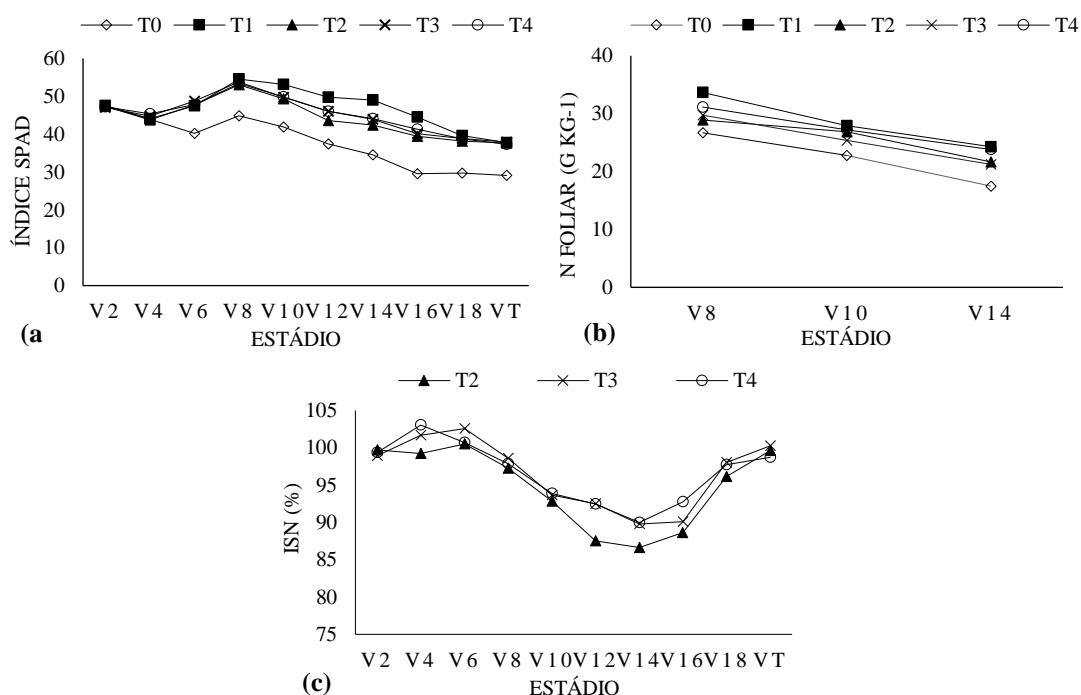


Figura 1. Valores médios do Índice SPAD (a), N foliar (b) e Índice de suficiência de nitrogênio (ISN) (c) do milho DKB310 PRO2 em Januária, MG, 2018.

Além disso, o uso da irrigação no presente estudo possivelmente influenciou essa redução, visto que a mesma proporciona à cultura melhores condições de desenvolvimento, o que resulta em maior demanda de nutrientes (SANTOS ALMEIDA et al., 2017), que pode não ter sido suprida pelas doses aplicadas após o estágio V8. Ademais, é possível que tenha ocorrido um esgotamento do N disponível no solo e conseqüentemente a redução da intensidade da cor verde das folhas.

O N foliar apresentou comportamento semelhante, pois decresceu para todos os tratamentos nos três estádios avaliados (V8, V10 e V14) (Figura 1b). Neste caso, com exceção do tratamento T0, apenas em V8 as médias do N foliar foram consideradas dentro do limiar adequado de 27,5 a 32,5 g kg⁻¹ de N (MALAVOLTA et al., 1997). Para o índice SPAD, somente em V8 foram observadas médias acima de 52,1, valor definido como ideal para o estágio de seis a sete folhas expandidas (ARGENTA et al., 2001). Para os estádios dez a onze folhas expandidas e no espigamento, os mesmos autores definiram como limites adequados, os valores de 55,3 e 58 unidades do índice SPAD que também não foram observados no presente estudo.

Com relação ao ISN, observou-se que este manteve-se acima dos limiares propostos até o estágio V8. Após o estágio V8, o ISN decresceu indicando a necessidade de aplicação de N até o estágio V14 (45 DAE). A redução nos valores do ISN é atribuída a aplicação da segunda dose no tratamento T1 no estágio V8 (56 kg ha⁻¹ de N) que provocou maior diferença entre os demais tratamentos. Em seguida, observou-se um aumento do ISN do estágio V16 até o VT (Figura 1c). Possivelmente esse aumento foi ocasionado pelas adubações nos estádios V10 e V14 (T2, T3 e T4) que atenuaram a redução das médias do índice SPAD até o pendoamento.

De modo geral, era de se esperar que a cultura apresentasse aumento nas médias do N foliar e do índice SPAD ao longo do ciclo, pois a remobilização do N ocorre das folhas em senescência para as mais novas, ou seja, aquelas que foram utilizadas para a leitura do índice SPAD. Contudo, o comportamento observado diferiu daquele reportado por outros autores (HURTADO et al., 2010) que relataram leituras crescentes até o pré-florescimento (V14 a V16). Entretanto, deve-se ressaltar que estes autores utilizaram doses de 100 kg ha⁻¹ de N em aplicação única e 500 kg ha⁻¹ de N parcelados em sete aplicações, ou seja, bem superiores as doses aplicadas nos estádios avaliados no presente trabalho.

A análise de correlação simples mostrou que, em todos os estádios avaliados, as leituras do índice SPAD correlacionaram-se positivamente com o N foliar. A

correlação entre o índice SPAD e o N foliar no estágio V8 apresentou uma tendência de ser menor em relação aos estádios mais avançados (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficiente de correlação do índice SPAD com o teor de Nitrogênio foliar (N) no milho DKB310 PRO2 em Januária, MG, 2018

Variáveis	N V ₈	N V ₁₀	N V ₁₄
SPAD V ₈	0,4861*	-	-
SPAD V ₁₀	-	0,6790**	-
SPAD V ₁₄	-	-	0,7292**

* e ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Comportamento semelhante tem sido evidenciado por outros autores, tanto para o milho (GRUZSKA et al., 2017; HURTADO et al., 2010; RAMBO et al., 2011) como para o feijoeiro (SANT'ANA et al., 2010) e cafeeiro (GODOY et al., 2008). Na cultura do milho esse comportamento é atribuído a possibilidade de o N em estádios iniciais não estar atuando na formação de moléculas de clorofila, mas sim na composição de outras estruturas da planta (ARGENTA et al., 2001).

Além disso, possivelmente a maior presença de nitrato em estádios de menor demanda nutricional influenciou na relação do índice SPAD com o N foliar. Isso se dá pelo fato do nitrato não estar associado a molécula da clorofila e também não ser levado em consideração nas medições do índice SPAD (SEGATTO et al., 2017). Dessa forma, as leituras do clorofilômetro em estádios iniciais tendem a apresentar precisão reduzida. Assim, os resultados obtidos no presente estudo e aqueles reportados por Varvel et al. (1997) e Argenta et al. (2001) sugerem que o clorofilômetro deve ser utilizado para detecção da necessidade de N em estádios a partir do V8.

Com relação aos componentes de produção, observou-se que, com exceção do número de fileiras (NF), todos os demais apresentaram efeito positivo da aplicação do N em relação ao T0 (Tabela 2). Para o comprimento da espiga (CE), parâmetro determinante para uma maior produtividade de grãos, todos os tratamentos apresentaram diferença em relação ao T0, sendo que o T1 e T2 não apresentaram diferença estatística entre si e apresentaram as maiores médias.

Tabela 2. Médias do comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga (DE), número de grãos por fileira (NGF), massa de 100 grãos (P100), e produtividade de grãos (PG) do milho DKB310 PRO2 em Januária, MG, 2018

Tratamento	CE cm	DE mm	NGF -	P100 g	PG kg ha ⁻¹
T1	19,55 ^a	49,94 ^a	37,73 ^a	19,87 ^a	7074,24 ^a
T2	19,48 ^a	49,18 ^{ab}	37,60 ^{ab}	20,09 ^a	7035,74 ^a
T3	18,46 ^{ab}	49,22 ^{ab}	35,76 ^{ab}	20,32 ^a	6762,81 ^a
T4	18,85 ^{ab}	49,11 ^{ab}	36,00 ^{ab}	19,28 ^{ab}	6722,75 ^a
T0	17,28 ^b	46,97 ^b	33,50 ^b	17,12 ^b	3906,91 ^b

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

O diâmetro da espiga (DE) e o número de grãos por fileira (NGF) apresentaram resposta semelhante, destacando-se o T1 que apresentou as maiores médias. Os tratamentos T2, T3 e T4 apesar de apresentarem médias estatisticamente iguais ao T1, não se diferenciaram do T0. Silva et al. (2014) ao utilizarem doses econômicas de N e P₂O₅ na cultura do milho, observaram influência positiva no DE entre os tratamentos avaliados. Entretanto, para o NF estes autores não observaram diferença estatística entre os tratamentos, resultado semelhante ao obtido no presente trabalho. A ausência de diferenças no NF pode estar associada a características genéticas do híbrido utilizado (VALDERRAMA et al., 2011). Com relação ao NGF, Sichoeki et al. (2014) reportaram efeito positivo neste parâmetro quando aplicadas doses de até 150 kg ha⁻¹ de N.

A massa de 100 grãos (P100) foi acrescida pela aplicação do N, sendo que os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram as maiores médias. O tratamento T4 não diferiu do T0, embora tenha apresentado média estatisticamente igual aos demais. Essa resposta possivelmente está relacionada a maior disponibilidade de N no período de enchimento dos grãos, principalmente, nos tratamentos T2 e T3 que poderiam receber até 20% da dose total de cobertura no estádio V14, enquanto para o T4 esse valor seria de até 15% no mesmo estádio. De modo geral, em relação a aplicação em doses fixas (tratamento referência), os tratamentos a taxa variada não influenciaram no rendimento dos parâmetros de produção.

A produtividade de grãos (PG) dos tratamentos a taxa variada não diferiu estatisticamente do tratamento em doses fixas pré-estabelecidas (T1), entretanto, todos foram superiores ao T0. Esse resultado mostra que o uso do clorofilômetro associado a adubação a taxa variada foi eficaz em recomendar a aplicação de N nos momentos de maior demanda da planta. Além disso, deve-se ressaltar o ganho econômico e a

redução de eventuais perdas de N destes tratamentos quando comparados ao T1, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Dose inicial de N aplicado em cobertura (V4), número de parcelas tratadas durante o experimento, N total aplicado, incremento da produtividade e eficiência de uso do N (EUN) para o milho DKB310 PRO2 em Januária, MG, 2018

Tratamento	N inicial (V4) (kg ha ⁻¹)	Número de Parcelas Tratadas			N Total (kg ha ⁻¹)	Incremento (kg ha ⁻¹)	EUN (kg kg ⁻¹)
		V8	V10	V14			
T1	56,00	5	-	-	112,00	3167,33	28,28
T2	44,80	1	4	4	85,12	3128,83	36,76
T3	44,80	2	3	5	89,60	2855,90	31,87
T4	33,60	2	3	3	88,20	2815,84	31,92
T0	0,00	-	-	-	-	-	-

EUN: Eficiência de uso do nitrogênio.

No estágio V8, o T2 apresentou o menor número de parcelas tratadas. Esse resultado possivelmente ocorreu pela menor exigência da cultura nesse estágio e pelo ISN com limiar de 95%. Com relação ao T3 e T4, observou-se que o ISN de 98% resultou em maior número de parcelas a serem tratadas, mesmo quando aplicando as doses iniciais de 44,80 kg ha⁻¹ de N (T3) e 33,60 kg ha⁻¹ de N (T4) no estágio V4.

Para o estágio V10 todos os tratamentos a taxa variada tinham como limiar o ISN de 95%, entretanto, o T2 apresentou o maior número de parcelas deficientes. Essa maior deficiência no T2 pode estar associada a menor exigência do ISN no estágio V8. Com relação ao estágio V14, observa-se que o número de parcelas deficientes em N foi maior em comparação aos estádios V8 e V10. Esse comportamento pode estar associado as condições edafoclimáticas durante o experimento e as doses aplicadas a partir do estágio V8 que não foram capazes de reverter a redução do índice SPAD e do N foliar ao longo do ciclo da cultura.

Independentemente, ao final do ciclo, os tratamentos a taxa variada foram mais eficientes e não apresentaram deficiência de N em relação ao T1, pois resultaram em menor consumo de N (kg ha⁻¹) e produtividade estatisticamente iguais. O T2, monitorado com ISN fixo de 95% ao longo de todos os estádios avaliados, consumiu 24% a menos de N em relação ao T1. Esse resultado é melhor compreendido ao analisar a eficiência de uso do nitrogênio (EUN). O T2 apresentou maior EUN em relação ao T1 (referência) e ao T3 e T4, que foram monitorados com ISN variável ao longo do desenvolvimento da cultura. Desta forma, o uso do ISN variável não foi a

melhor opção para monitorar a necessidade de aplicação de N ao utilizar uma dose econômica.

Esses resultados contrariam as afirmações de estudos anteriores de que um ISN variável ao longo da cultura seria a melhor opção devido à alta variação do índice SPAD entre os estádios monitorados (GODOY et al., 2003; HURTADO et al., 2011; VARVEL et al., 1997). No entanto, deve-se ressaltar que nestes estudos o clorofilômetro foi usado para monitorar e corrigir a deficiência de N de modo a não afetar o máximo potencial produtivo da cultura. Diferentemente, no presente estudo utilizou-se o clorofilômetro para refinar a aplicação de uma dose ótima econômica com finalidade de proporcionar a melhor relação entre a quantidade de adubo utilizado com a produtividade de grãos (e.g., retorno econômico).

Assim, para condições de maior disponibilidade de N, o ISN fixo de 95% não seria o mais recomendado, pois a sua menor exigência possivelmente não detectaria a necessidade de aplicação em estádios de menor demanda. Nos trabalhos mencionados acima, essa condição resultou em deficiência nos estádios após o V8 e, conseqüentemente, reduziu o potencial produtivo da cultura. Para o presente estudo, tanto o ISN fixo como o variável detectaram a necessidade de aplicação de N. No entanto, o uso de uma dose econômica associada ao ISN de menor exigência resultou em maior EUN para o tratamento T2.

Em síntese, os resultados mostram que o uso de sensores ópticos associados a técnicas de agricultura de precisão apresenta vantagens em relação ao sistema convencional de adubação utilizado. Essa vantagem dá-se pela possibilidade de ajustar a necessidade de aplicação com o estado nutricional da planta (BRAGAGNOLO et al., 2016). Além disso, a aplicação de N em taxa variada foi uma estratégia eficiente do ponto de vista econômico e ambiental, pois reduziu o consumo de N e os riscos associados a aplicação excessiva desse nutriente.

2.4 CONCLUSÃO

- A recomendação da adubação nitrogenada a taxa variada para a cultura do milho pelo clorofilômetro SPAD-502 resultou em maior eficiência de uso de N quando utilizado um limiar fixo do ISN (95%) nos estádios monitorados;
- Os tratamentos a taxa variada foram mais eficientes que o método convencional, pois consumiram menor quantidade de N e apresentaram a mesma produtividade de grãos.

2.5 REFERÊNCIAS

ALVAREZ V. V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. 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: p. 43-60, 1999.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recommendation of nitrogen fertilization for no-till corn in RS and SC, adapted to the use of soil cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 26, n. 1, p. 241–248, 2002.

ANDRADE, F. R.; PETTER, F. A.; NÓBREGA, J. C. A.; PACHECO, L. P.; ZUFFO, A. M. Desempenho agronômico do milho a doses e épocas de aplicação de nitrogênio no Cerrado piauiense. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 4, p. 358-366. 2014.

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, n. 2, p. 158-167, 2001.

BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p. 103-111. 2016.

COELHO, F. S.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; BRAUN, H.; DA SILVA, I. R. Valor e predição do nível crítico de índices para avaliar o estado nitrogenado da batateira. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 115-122. 2013

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: décimo primeiro levantamento. Agosto 2018. v.5, safra 2017/18, n. 11**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 09 ago. 2018.

FRANCIS, D. D.; PIEKIELEK, W. P. **Assessing Crop Nitrogen Needs with Chlorophyll Meters**. SSMG-12, p. 1-4, 1999.

GODOY, L. J. G.; SANTOS, T. S.; VILLAS BOAS, R. L.; JÚNIOR, J. B. L. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, n. 1, p. 217-226, 2008.

GODOY, L. J. G.; VILLAS BÔAS, R. L.; GRASSI FILHO, H. Adubação nitrogenada na cultura do milho baseada na medida do clorofilômetro e no índice de suficiência em nitrogênio (ISN). **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.25, n. 2, p. 373-380, 2003.

GRUZSKA, M.; OHSE, S.; PEREIRA, A. B. Chlorophyll relative index for diagnosing nitrogen status in corn hybrids. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 27, p. 2273-2282. 2017.

HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V.; SILVA, C. A.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, v. 41, n. 6, p. 1011-1017. 2011.

HURTADO, S. M. C.; SILVA, C. A.; RESENDE, A. V.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S.; HIGASHIKAWA, F. S. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 688-697, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F.; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A.; SANGOI, L.; VIEIRA, V. M. Índices nutricionais de N e produtividade de milho em diferentes níveis de manejo e de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.4, p. 390-397. 2011.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26p.

SANT'ANA, E. V. P.; SANTOS, A. B.; SILVEIRA, P. M. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 491-496, 2010.

SANTOS ALMEIDA, A. C.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; DE OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; BISCARO, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água

em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448 - 1457. 2017.

SCHLICHTING, A. F.; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, M. C.; PIETROSOUZA, W.; SILVA, T. J. A.; FARIAS, L. N. Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p. 1148-1151, 2015.

SEGATTO, C.; CONTE, R.; LAJÚS, C. R.; DA LUZ, G. L. Relação da leitura do clorofilômetro com o rendimento da cultura do milho em diferentes níveis de suprimento de nitrogênio. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 16, n. 2, p. 253-259, 2017.

SICHOCKI, D.; GOTT, R. M.; FUGA, C. A. G.; AQUINO, L. A.; RUAS, R. A. A.; NUNES, P. H. M. P. Resposta do milho safrinha a doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 48-58. 2014.

SILVA, G. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; SILVA, P. S. L.; DIÓGENES, T. B. A.; SILVA, A. R.C. Doses de nitrogênio e fósforo para produção econômica de milho na Chapada do Apodi RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 18, n. 12, p. 1247-1254. 2014.

SILVA, S.; COSTA, C. T. S.; NASCIMENTO, R.; TEODORO, L.; CANTARELLI, A. L. D.; SOARES, M. A. S. Épocas de plantio e dose econômica de nitrogênio para o milho cultivado nos Tabuleiros Costeiros Alagoanos. **Revista Agro@ambiente Online**, v. 10, n. 2, p. 114-122. 2016.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M.; MINHOTO, M. C. T. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, p. 254-263, 2011.

VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. (1997) Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 20, p. 1233–1239, 1997.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D H.; DAMIAN, J. D.; BREDEMEIER, C. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 464- 471, 2016.

ZHU, S.; VIVANCO, J. M.; MANTER, D. K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation: the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize. **Applied Soil Ecology**, v. 107, n. 1, p. 324–333. 2016.

3. ARTIGO II - VIABILIDADE ECONÔMICA SOB CONDIÇÕES DE RISCO DE SENSORES ÓPTICOS PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA A TAXA VARIADA NO MILHO

RESUMO

Este trabalho objetivou determinar por meio de cenários de área cultivada e zonas de amostragem do índice SPAD, a viabilidade econômica associada ao uso de dois clorofilômetros (fabricação nacional e importado) e um radiômetro de medição do dossel da vegetação para o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho usando modelos sem inclusão de risco (modelo determinístico) e com inclusão de risco (modelo probabilístico). Para tal, foram elaborados fluxos de caixa representativos da produção de milho utilizando três sistemas de adubação a taxa variada com base em diferentes índices de suficiência de nitrogênio. Para cada sistema foram simulados 8 cenários de área cultivada e amostragem do sensor. Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. A viabilidade dos sensores foi determinada por diferentes indicadores como a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL) considerando uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 6% ao ano e horizonte de projeto de 8 anos. O risco foi determinado pela simulação de Monte Carlo. O resultado mostrou que, independente do tipo de amostragem, o clorofilômetro SPAD-502 seria economicamente viável quando adquirido no mercado nacional ou via importação em áreas de cultivo a partir de 7 ou 5 ha. Por outro lado, o ClorofiLOG CFL1030 e o Greenseeker poderiam resultar em maior viabilidade econômica em áreas a partir de 3 ha.

Palavras-Chave: clorofilômetro, gerenciamento sítio-específico, viabilidade econômica e risco, *Zea mays* L.

ECONOMIC FEASIBILITY UNDER RISK CONDITIONS OF OPTICAL SENSORS FOR VARIABLE RATE NITROGEN FERTILIZATION IN CORN

ABSTRACT

This work aimed to determine through scenarios of the SPAD index sampling zones and corn cultivated area, the economic feasibility associated with the use of two chlorophyll meter (nationally manufactured and imported) and a radiometer of crop canopy reading for nitrogen fertilization management in corn using models without including the risk (deterministic model) and including the risk (probabilistic model). To do so, representative cash flows from corn production using three variable rate fertilization systems based on different nitrogen sufficiency indexes were elaborated. Thus, for each system, 8 scenarios of cultivated area and sensor sampling zones were simulated: Scenarios 1, 2, 3 and 4: Global sampling of the SPAD index average for the 1, 3, 5 and 7 ha area; Scenarios 5, 6, 7 and 8: SPAD index sampling divided into zones (subareas), using 3, 5, 7 and 9 zones for 1, 3, 5 and 7 ha, respectively. The economic feasibility of the sensors was determined using different economic indicators such as the internal rate of return (IRR) and the net present value (NPV), considering a minimum interest rate (MIR) of 6% per year and an 8-year project horizon. The risk was accessed by the Monte Carlo simulation. Results showed that, regardless of the sampling type, the chlorophyll meter SPAD-502 would be economically feasible when acquired in the national market or via importation in cultivation areas from 7 or 5 ha. Differently, the ClorofiLOG CFL1030 and the Greenseeker could result in greater economic feasibility in areas from 3 ha.

Keywords: chlorophyll meter, risk and economic feasibility, site-specific management, *Zea mays* L.

3.1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) envolve o desenvolvimento e adoção de técnicas para melhorar o manejo de sistemas agrícolas. Em essência, a AP consiste na combinação da aplicação de insumos e práticas agronômicas com as exigências do solo e das culturas agrícolas, uma vez que estas variam no espaço e no tempo no campo (WHELAN; MCBRATNEY, 2000). Isso pode resultar em efeitos como maior competitividade no mercado, devido a otimização do uso de insumos, redução de custos de produção e eventualmente maior produtividade, permitindo ao produtor oferecer o produto no mercado a um preço mais competitivo (BAIO et al., 2017).

As vantagens da adoção da AP podem impactar diretamente nos benefícios sociais (aumento de empregos) e econômicos (aumento de renda) da economia brasileira (COSTA; GUILHOTO, 2013). Entretanto, os efeitos benéficos da AP são mais restritos a grandes áreas de cultivo, normalmente gerenciadas por grandes empresas ligadas a produção agrícola (BORGHI et al., 2016). Diferentemente, para áreas de menor porte, observa-se a ausência de estudos relativos à adoção ou ao investimento em tecnologias da AP.

Apesar do grande potencial, a produtividade do milho em grão no Brasil (4890 kg ha⁻¹ na safra 2017/2018) mostra-se muito inferior à dos EUA (11380 kg ha⁻¹) (CONAB, 2018; USDA, 2018). Essa baixa produtividade possivelmente é reflexo da ocorrência de estresses bióticos e abióticos e, principalmente, da baixa eficiência no manejo das adubações de base e em cobertura, sendo principalmente a nitrogenada e na adoção de tecnologias por pequenos e médios agricultores.

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura do milho e influencia diretamente na produtividade, pois atua diretamente nos processos bioquímicos da planta. Apesar da importância para o crescimento das plantas, por ser constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos e da clorofila (SANTOS et al., 2010), o uso excessivo de N onera o processo produtivo e impacta negativamente o meio ambiente. Assim, um desequilíbrio entre o suprimento de N e a demanda nutricional da planta resulta em perdas econômicas e baixa eficiência de uso do N (EUN) (ALI et al., 2017).

A otimização de uso do N é, recentemente, um dos principais alvos de estudo no contexto da AP no Brasil. Neste sentido, o manejo da adubação nitrogenada em taxa variada por meio de sensores ópticos tem proporcionado a redução de custos no

processo produtivo, assim como tornado a produção mais sustentável pela maior EUN (SHAVER et al., 2017). Isso se dá pela possibilidade de sincronizar as aplicações com o período de maior demanda pela planta (i.e., as aplicações são distribuídas durante a fase de crescimento em quantidades menores, conforme a necessidade da planta) (AMADO et al., 2017; BRAGAGNOLO et al., 2013).

O clorofilômetro SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development), desenvolvido pela Minolta (Osaka, Japão), tem sido largamente recomendado para gerenciar a aplicação de N em taxa variada para culturas como o milho (ZHAO et al., 2018), feijão (SILVEIRA; GONZAGA, 2017) e o arroz (YUAN et al., 2016). O SPAD-502 possui diodos que emitem luz a 650 nm (vermelho) e a 940 nm (infravermelho). A luz em 650 nm situa-se próxima da região associada a atividade da clorofila (645 e 663 nm), enquanto o comprimento de 940 nm é utilizado para compensar o teor de umidade e espessura da folha (HARDIN et al., 2012; HAWKINS et al., 2007). O valor resultante é proporcional ao teor relativo de clorofila definido como índice SPAD (SCHLICHTING et al., 2015).

Outro exemplo de clorofilômetro é o ClorofiLOG CFL1030 (FALKER, 2008), modelo nacional desenvolvido pela Falker. Esse sensor emite luz em três comprimentos de onda em 635 e 660 nm (vermelho) e 880 nm (infravermelho), e indica o índice de clorofila de Falker. Além disso, têm-se o radiômetro Greenseeker, desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA), na década de 1990 (NTECH INDUSTRIES, 2008). Esse sensor utiliza diodos de emissão de radiação, nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo. A radiação é emitida sobre o dossel das plantas, para a determinação da reflectância nesses comprimentos de onda, fornecendo o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (BREDEMEIER et al., 2013; BAZAME, 2018).

Diversos estudos relatam que a maior vantagem dos sensores ópticos e tecnologias para manejo a sítio específico de N ocorre pela economia de fertilizantes e menor impacto ambiental, ao invés do aumento de produtividade (BIERMACHER et al., 2008; CAO et al., 2017). Por outro lado, nota-se a ausência de estudos acerca da viabilidade econômica e da incerteza associada ao uso de tais sensores, visto que o custo de aquisição é relativamente alto.

Alguns estudos avaliaram os benefícios ambientais e econômicos com a aplicação localizada de insumos (LINK et al., 2006; PAMPOLINO et al., 2007), a rentabilidade de um sensor óptico para aplicação de N a taxa variada (BIERMACHER

et al., 2008) e o uso de máquinas com tecnologia para gerenciamento a sítio específico associadas a diferentes classes de zonas de manejo para tomada de decisões (TOZER, 2009). Entretanto, nenhum desses estudos considerou a incerteza no investimento em tecnologias relacionadas a AP para áreas de pequeno porte. Muito menos, consideraram os aspectos temporais da variabilidade de preços do produto final, dos insumos e da produtividade da cultura de maneira conjunta.

Portanto, objetivou-se com o presente estudo determinar, por meio de cenários de área e zonas de amostragem do índice SPAD, a viabilidade econômica associada ao uso dos clorofilômetros SPAD-502 e ClorofiLOG CFL1030 e do radiômetro Greenseeker para o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho usando modelos sem inclusão de risco (determinístico) e com inclusão de risco (modelo probabilístico).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Fonte de Dados

A base de dados utilizada nesse estudo foi obtida do experimento em campo utilizando o milho DKB310 PRO2, realizado em Januária, região norte de Minas Gerais (15° 28' 55" S; 44° 22' 41" O; 474 m) no período de fevereiro a junho de 2018. Em campo, avaliou-se a viabilidade técnica de uso da adubação a taxa variada com base em leituras do clorofilômetro SPAD-502 em relação a adubação convencional em doses pré-fixadas.

A adubação a taxa variada foi realizada com base em diferentes limiares do índice de suficiência de nitrogênio (ISN) (FRANCIS; PIEKIELEK, 1999). A dose total de N em cobertura utilizada foi de 112 kg ha⁻¹. No tratamento 1 (referência), a aplicação foi dividida em 50% da dose no estágio de quatro folhas totalmente expandidas (V4) e 50% em V8. Os tratamentos a taxa variada foram organizados da seguinte maneira: Tratamento 2 com ISN fixo de 95% monitorado nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente; Tratamento 3 e 4 com ISN variável de 98, 95 e 93% monitorados nos mesmos estádios do T2.

Inicialmente, os tratamentos a taxa variada receberam 44,8 kg ha⁻¹ de N (T2 e T3) e 33,6 kg ha⁻¹ de N (T4) no estágio V4. As demais aplicações foram realizadas com base no valor do ISN nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente. Assim, quando o valor do ISN se apresentou abaixo do limiar proposto, os tratamentos T2 e T3 receberam 22,4 kg ha⁻¹ de N em cada estágio monitorado (V8, V10 e V14). Para o

T4, aplicou-se, quando necessário, 33,6 kg ha⁻¹ no estádio V8, 28 kg ha⁻¹ no estádio V10 e 16,8 kg ha⁻¹ de N no estádio V14.

Adicionalmente, no momento de leitura do índice SPAD nos estádios V8, V10 e V14, também foram realizadas leituras com o clorofilômetro ClorofiLOG CFL1030. Para o Greenseeker, considerou-se que as leituras apresentariam resultado similar aos valores observados nos clorofilômetros. As leituras foram realizadas para fins de comparação na tomada de decisão de adubação e posterior comparação da viabilidade econômica caso fossem utilizados qualquer um dos clorofilômetros e até mesmo o Greenseeker. No entanto, vale ressaltar que a tomada de decisão para fins de adubação foi realizada somente com base nas leituras do SPAD-502.

Por fim, aos 120 dias após a emergência das plantas realizou-se a colheita das espigas na área experimental. A produtividade média de grãos foi de 117,90, 117,26, 112,11 e 112,04 sacas ha⁻¹ para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 respectivamente. Com relação ao total de ureia (44% de N) utilizada em cobertura, os tratamentos consumiram em média 254,45, 193,45, 203,64 e 200,45 kg ha⁻¹ de ureia para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente.

Para a análise econômica, com exceção dos sensores, todos os demais preços utilizados foram coletados na própria região, para refletir o real potencial econômico da alternativa testada. O preço de comercialização da saca do milho (US\$ sc 60 kg) baseou-se no preço médio local dos últimos quatro anos (2014, 2015, 2016 e 2017) acrescido do ano vigente até o mês de setembro (2018). A série de dados foi corrigida com base nos valores estabelecidos pela Central de Abastecimento do Estado de Minas Gerais (CEASAMINAS).

O cálculo do custo de mão de obra por hora trabalhada (US\$ h⁻¹) foi realizado com base no salário mínimo do ano vigente (2018) e pelo tempo despendido nas operações realizadas em campo durante o cultivo. Para o cálculo das despesas de mão de obra com o Greenseeker foi considerado o mesmo tempo de amostragem dos clorofilômetros. Além disso, considerou-se como taxa de câmbio o valor médio da cotação do dólar no período de 01/2014 a 09/2018 (1 dólar = R\$ 3,17).

Por fim, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) utilizada foi de 6,0% ao ano (a.a), tendo como referência básica a taxa anual da caderneta de poupança. A TMA é a melhor taxa de capital com baixo grau de risco. Em outras palavras, é o que aconteceria se o valor do investimento no SPAD-502 fosse aplicado em um banco para obtenção da receita de juros.

3.2.2 Análise de Viabilidade Econômica

Uma vez que o foco central desse trabalho foi comparar as situações de adoção e não adoção do SPAD-502, desenvolveu-se uma análise da viabilidade econômica do investimento na aquisição do clorofilômetro em duas condições de preço, sendo a aquisição no mercado nacional ou via importação. Em outras palavras, avaliou-se o adicional de investimento, despesas, receitas e economia de despesas que ocorreram em função da adoção do sensor óptico e procedimentos relativos a adubação convencional.

Para tal, os fluxos de caixa foram constituídos pelas saídas com o investimento no primeiro ano com a aquisição dos equipamentos (sensor) e despesas operacionais (fertilizantes, sementes e defensivos agrícolas e mão de obra) nas etapas de preparo do solo, plantio, adubação de plantio e cobertura, amostragem do índice SPAD (tratamentos a taxa variada), aplicação de defensivos e colheita. Já as entradas foram compostas pelo milho comercializado.

O horizonte de tempo do projeto foi definido com base no pressuposto de uma rápida taxa de obsolescência e deterioração do equipamento eletrônico conforme sugerido por Biermacher et al. (2008). Entretanto, devido a ausência de atualizações de software e/ou hardware nos clorofilômetros e no Greenseeker considerou-se como horizonte de projeto, o período 8 anos ao invés de 5 anos, utilizado pelos autores mencionados acima. De início, a viabilidade financeira do projeto foi analisada para a área equivalente a 1 hectare. Entretanto, caso o investimento não apresentasse viabilidade, seria determinada a área mínima (hectares) para que o uso de cada sensor se tornasse viável.

Neste caso, foram criados cenários com dois tipos de amostragens do índice SPAD no campo, sendo: amostragem global, ou seja, amostragem única em toda a área cultivada; e amostragem em zonas (subáreas) ao longo da área plantada. O tempo de amostragem foi determinado em campo nos estádios V8, V10 e V14, respectivamente. Em seguida, foi realizado o ajuste dos resultados para cada cenário de acordo com o tipo de amostragem. A constituição do fluxo de caixa referente a cada cenário foi semelhante ao procedimento para 1 hectare, no entanto, as entradas e saídas foram ajustadas a sua respectiva área.

Os cenários foram estabelecidos da seguinte maneira: Amostragem global da média do índice SPAD, o qual foi obtido em 30 plantas escolhidas aleatoriamente na

área experimental e extrapolados para a área de 1, 3, 5 e 7 ha, correspondentes aos cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente; amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para os cenários 5, 6, 7 e 8, respectivamente. A área simulada para os cenários de 5 a 8 foi a mesma dos cenários de 1 a 4.

Após a elaboração dos fluxos de caixa, determinou-se a viabilidade econômica de uso dos três sensores na cultura do milho somente para os três tratamentos a taxa variada, sendo os percentuais do ISN destes definidos aqui como sistemas de adubação 1 (T2), 2 (T3) e 3 (T4). Para tal, foram determinados os seguintes indicadores:

a) Valor Presente Líquido (VPL). O critério de decisão consistiu em aceitá-lo se o $VPL > 0$, rejeitá-lo se $VPL < 0$ e na condição de igualdade considera-se economicamente indiferente. O VPL foi obtido por meio da Equação 1 (REZENDE; OLIVEIRA, 2013).

$$VPL = -I + \sum_{j=0}^n \frac{R_j - C_j}{(1+i)^j} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que,

R_j - receitas do período j ;

C_j - custos do período j ;

i - taxa de desconto (TMA, 6% a.a.);

I - investimento inicial.

b) A Razão Benefício-Custo Descontado (B/C (%)) representa a relação do quanto se espera ganhar para cada unidade de capital investido no projeto, considerando todo o horizonte de investimento do projeto. Assim, se a razão B/C (%) > 1 o investimento é economicamente viável, caso a B/C (%) < 1 é inviável e, na condição de igualdade considera-se como economicamente indiferente (REZENDE; OLIVEIRA, 2013). Este indicador foi determinado por meio da Equação 2 que usa o fluxo de caixa descontado pela TMA.

$$B/C (\%) = \frac{\sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j}} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que,

R_j - receitas do período j ;

C_j - custos do período j ;

i - taxa de desconto, TMA;

n - duração do projeto, anos.

c) A rentabilidade do investimento foi avaliada pela Taxa Interna de Retorno (TIR). Assim, o investimento é considerado economicamente viável quando $TIR > TMA$, se $TIR < TMA$ é inviável e, na condição de igualdade torna-se indiferente. A TIR foi obtida por meio da Equação 3 (REZENDE; OLIVEIRA, 2013).

$$0 = -I + \sum_{j=0}^n \frac{R_j - C_j}{(1+TIR)^j} \quad \text{Eq. (3)}$$

em que,

R_j - receitas do período j ;

C_j - custos do período j ;

I - investimento inicial;

TIR - taxa interna de retorno.

d) Para estimativa do risco do projeto baseado no tempo para retorno do investimento foi utilizado o Payback time descontado. Neste caso, determinou-se o período necessário para recuperar o investimento. A utilidade do payback time descontado é mostrar a liquidez do projeto, ou seja, quanto mais rápido o investimento inicial é compensado (quanto menor for o payback time), maior a liquidez do projeto. O payback time foi obtido pela Equação 4 (REZENDE; OLIVEIRA, 2013).

$$FCC(t) = -I + \sum_{j=1}^t \frac{(R_j - C_j)}{(1+i)^j} \quad 1 \leq t \leq n \quad \text{Eq. (4)}$$

em que,

FCC (t) - fluxo de caixa descontado para o valor presente cumulativo até o instante t ;

I - investimento inicial (em módulo);

R_j - receita proveniente do ano j ;

C_j - custo proveniente do ano j ;

i - taxa de desconto, TMA; e

j - índice genérico que representa os períodos $j = 1$ a t .

Por fim, foi realizada uma análise comparativa para determinar qual seria a viabilidade do investimento no ClorofiLOG CFL1030 ou no Greenseeker para os cenários propostos acima. A análise de comparação entre os sensores justifica-se pela ausência de diferenças na tomada de decisão para fins de adubação do SPAD-502 e do ClorofiLOG CFL1030 observada durante a amostragem nos estádios V8, V10 e V14. Ademais, a ausência de diferenças entre a leitura dos sensores corrobora com os

resultados obtidos por Schlichting et al. (2015), em estudo na qual avaliaram a eficiência dos clorofilômetros SPAD-502 e do ClorofiLOG CFL1030 na determinação direta do teor de clorofila com a concentração de nitrogênio na cultura do trigo. Em outro estudo, Bazame (2018) avaliou a eficiência do SPAD-502 e do Greenseeker na adubação a taxa variada em pastagens de *Urochloa brizantha* cv. Xaraés. Os resultados mostraram que não houveram diferenças significativas na produtividade da pastagem entre os tratamentos manejados pelo SPAD-502 e pelo Greenseeker.

3.2.3 Análise de Viabilidade Econômica sob Condições de Risco

Para avaliar o risco envolvido em cada proposta de investimento de aquisição do sensor para o manejo da adubação na cultura do milho, utilizou-se a técnica de simulação Monte Carlo por meio do software Microsoft Excel (REDMOND, WA, USA) e do add-In @Risk, versão 7.5 (PALISADE, 2018). Para tal, foram consideradas como variáveis de entrada (input): o preço do milho (US\$ sc 60 kg⁻¹); mão de obra (US\$ h⁻¹); quantidade de ureia utilizada (kg ha⁻¹); e a produtividade de grãos (sc ha⁻¹). As demais variáveis (fertilizantes, com exceção da ureia, sementes e defensivos agrícolas), cuja quantidade foi fixa independente do sistema de adubação, foram inseridas com preço fixo na simulação. Neste caso, a quantidade foi ajustada de acordo com a área de cultivo referente a cada cenário proposto.

O preço do milho foi definido pela série de preços de janeiro de 2014 a setembro de 2018. Para o custo de mão de obra, definiu-se o custo por hora trabalhada pela série histórica do salário mínimo no mesmo período. Em seguida, ambas as séries de dados foram convertidas em dólar (US\$) com taxa cambial referente a média de cada mês da série de dados. Por fim, os dados do preço do milho e custo de mão de obra foram ajustados a distribuição tipo histograma no @risk.

Para as demais variáveis, definiu-se a distribuição triangular, a qual representa uma estratégia para incorporação de risco em variáveis que apresentam usualmente ausência de séries históricas de dados. Esta distribuição tem como parâmetros de entrada o valor mínimo, o valor modal (mais provável) ou o valor médio da variável em estudo e o valor máximo. Como já citado, o uso da distribuição triangular representa uma alternativa quando não se tem acesso a dados históricos suficientes sobre determinada variável (BAITELLE et al., 2018).

A distribuição triangular foi utilizada para incorporar risco nas variáveis de produtividade e quantidade de ureia utilizadas referentes as 15 parcelas experimentais

dos 3 sistemas de adubação. Essa decisão foi tomada visando a melhor representatividade na distribuição triangular, permitindo a análise conjunta dos três sistemas de adubação e a redução do número de cenários a serem comparados. Assim, para a produtividade de grãos foram utilizados os seguintes valores: 72,14, 114,01 e 139,77 sc ha⁻¹, os quais corresponderam aos valores mínimo, médio e máximo, respectivamente. Para a quantidade de ureia utilizada os valores foram: 114,55, 203,64 e 254,55 kg ha⁻¹ correspondentes aos valores mínimo, modal e máximo, respectivamente.

Além disso, no ajuste do modelo de simulação, foi inserida a correlação de Pearson entre a produtividade e o total de ureia utilizada ($r= 0,5490$) de modo a evitar resultados incoerentes (i.e., situações de alta produtividade com maior quantidade de ureia economizada e / ou menor quantidade utilizada). Por fim, a simulação foi realizada utilizando o método de amostragem do quadrado hipercúbico e 50000 iterações foram necessárias para atingir as exigências de convergência de amostragem do software @risk.

A variável de análise ou saída (output) utilizada foi o VPL. A TIR não foi utilizada, pois no processo de simulação muitos resultados para este indicador apresentaram erro. Estes erros ocorrem quando os valores das variáveis de entrada (input variables) resultam em valores negativos durante todo o período do investimento (8 anos), situação em que não é possível obter uma estimativa para a TIR (MENDONÇA et al., 2009).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Modelagem para Desenvolvimento da Análise Econômica

Na Tabela 1 são apresentadas as despesas referentes à produção de 1 hectare de milho por meio dos três sistemas de adubação a taxa variada manejados pelo SPAD-502 (preço nacional) e pelo sistema convencional. Os sistemas S1, S2 e S3 produziram em média 117,26, 112,11 e 112,04 sacas ha⁻¹. Além disso, os mesmos consumiram em média 61,00, 50,81 e 54,00 kg ha⁻¹ de ureia a menos em relação ao sistema convencional. Por outro lado, os mesmos apresentaram maior despesa em relação ao sistema convencional. Esse adicional de despesa decorre de despesas com a mão de obra para amostragem do índice SPAD e adubações adicionais, uma vez que nos sistemas de adubação a taxa variada foram realizadas adubações nos estádios V4, V8, V10 e V14.

Tabela 1. Despesas de produção por hectare do milho com manejo da adubação nitrogenada pelo clorofilômetro SPAD-502 (agricultura de precisão) e pela agricultura convencional em Januária, MG, 2018

Itens	Agricultura de Precisão						Agricultura Convencional		
		S1		S2		S3			
Produto	Un	Quantidade	Despesa (US\$)	Quantidade	Despesa (US\$)	Quantidade	Despesa (US\$)	Quantidade	Despesa (US\$)
SPAD-502	-	1	6527,72	1	6527,72	1	6527,72	-	-
Fertilizantes									
Ureia*	kg	238,90	150,73	249,09	157,15	245,90	155,14	300,00	189,27
KCl	kg	155,20	96,94	155,20	96,22	155,20	96,22	155,20	96,22
P2O5	kg	388,90	147,22	388,90	147,78	388,90	147,78	388,90	147,78
Herbicida									
Round up	L	3,00	19,86	3,00	19,86	3,00	19,86	3,00	19,86
Inseticida									
Capataz BR	L	1,00	13,25	1,00	13,25	1,00	13,25	1,00	13,25
Sementes									
DKB310PRO2	sc	1,00	181,39	1,00	181,39	1,00	181,39	1,00	181,39
Cropstar	L	0,20	14,83	0,20	14,83	0,20	14,83	0,20	14,83
Stimulate	L	0,25	10,65	0,25	10,65	0,25	10,65	0,20	10,65
Mão de obra									
Preparo do solo	hora	71,88	170,54	71,88	170,54	71,88	170,54	71,88	170,54
Adubação e plantio	hora	52,08	123,57	52,08	123,57	52,08	123,57	52,08	123,57
Herbicida (aplicação)	hora	19,38	45,98	19,38	45,98	19,38	45,98	19,38	45,98
Inseticida (aplicação)	hora	21,46	50,92	21,46	50,92	21,46	50,92	21,46	50,92
Amostragem (SPAD)	hora	7,14	16,93	7,14	16,93	7,14	16,93	-	-
Adubação de cobertura	hora	104,17	247,17	104,17	247,17	104,17	247,17	62,50	148,12
Despesa Total			7891,68		7898,11		7896,09		1212,38

* Todos os tratamentos receberam no plantio uma dose de 20,00 kg ha⁻¹ de N (45,45 kg de ureia); KCL: Cloreto de potássio; P2O5: Superfosfato simples. Un: Unidade; Sc: Saca; S1, S2 e S3 são respectivamente os tratamentos a taxa variada 2, 3 e 4.

3.3.2 Análise de Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica sem risco é um procedimento de análise determinística. Neste caso, as entradas e saídas associadas ao fluxo de caixa são consideradas como fixas e não passíveis de mudança ao longo do tempo. Entretanto, apesar da sua praticidade, o método não permite ao tomador de decisão conhecer a probabilidade de risco de insucesso do investimento caso as variáveis de entrada não se mantenham como projetadas. Os resultados da análise de viabilidade econômica com inclusão do risco serão discutidos na próxima seção.

O resultado dos indicadores de viabilidade econômica obtidos com a opção de investimento no SPAD-502 com preço nacional (US\$ 6527,72) para os sistemas S1, S2 e S3 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Índices de viabilidade econômica de uso do clorofilômetro SPAD-502 com preço nacional para o manejo da adubação nitrogenada com os sistemas S1, S2 e S3 na cultura do milho em Januária, MG, 2018

Cenários	Índices de Viabilidade Econômica				
	VPL (US\$)	B/C	TIR (%)	Payback (anos)	
S1	1	-5385,78	0,175	-24,84	> 8*
	2	-3101,91	0,525	-7,96	> 8
	3	-818,03	0,875	2,73	> 8
	4	1465,84	1,225	11,41	6,23
	5	-5437,50	0,167	-25,43	> 8
	6	-3628,17	0,444	-10,97	> 8
	7	-1936,08	0,703	-2,14	> 8
	8	-573,20	0,912	3,73	> 8
S2	1	-5798,67	0,112	-30,23	> 8
	2	-4340,56	0,335	-15,64	> 8
	3	-2882,45	0,558	-6,79	> 8
	4	-1424,34	0,782	0,16	> 8
	5	-5850,39	0,104	-31,05	> 8
	6	-4866,82	0,254	-19,77	> 8
	7	-4000,50	0,387	-13,31	> 8
	8	-3463,38	0,469	-10,00	> 8
S3	1	-5844,37	0,105	-30,96	> 8
	2	-4477,66	0,314	-16,65	> 8
	3	-3110,95	0,523	-8,01	> 8
	4	-1744,24	0,733	-1,26	> 8
	5	-5869,09	0,097	-31,82	> 8
	6	-5003,92	0,233	-20,99	> 8
	7	-4229,00	0,352	-14,85	> 8
	8	-3783,28	0,420	-11,92	> 8

VPL: Valor presente líquido; B/C: razão benefício–custo descontado; TIR: Taxa interna de retorno; Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. Sistemas S1, S2 e S3 referem-se aos tratamentos a taxa variada T2, T3 e T4. *Cenários em que o investimento não se pagaria no horizonte de projeto de 8 anos com a TMA de 6% a.a.

Os resultados mostram que, para o horizonte de 8 anos utilizando a TMA de 6% a.a, a opção inicial de investimento no SPAD-502 apresentou viabilidade econômica somente para o cenário 4 (amostragem global em 7 ha) do sistema S1, visto que a TIR > TMA, razão B/C (%) > 1 e o payback time foi de 6,23 anos. Diferentemente, a segunda opção de investimento no SPAD-502 com o custo de importação (US\$ 4853,35), mostrou que, o cenário 3 (amostragem global em 5 ha) no sistema S1 e os cenários 4 (sistemas S1 e S2) e 8 (amostragem em 9 zonas em 7 ha) seriam economicamente viáveis conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3. Índices de viabilidade econômica de uso do clorofilômetro SPAD-502 adquirido via importação para o manejo da adubação nitrogenada com os sistemas S1, S2 e S3 na cultura do milho em Januária, MG, 2018

Cenários	Índices de Viabilidade Econômica				
	VPL (US\$)	B/C	TIR (%)	Payback (anos)	
S1	1	-3711,41	0,235	-20,88	> 8*
	2	-1427,54	0,706	-2,06	> 8
	3	856,34	1,176	10,29	6,54
	4	3140,21	1,647	20,59	4,41
	5	-3763,13	0,225	-21,52	> 8
	6	-1953,80	0,597	-5,48	> 8
	7	-261,71	0,946	4,62	> 8
	8	1101,17	1,227	11,47	6,22
S2	1	-4124,30	0,150	-26,74	> 8
	2	-2666,19	0,451	-10,72	> 8
	3	-1208,08	0,751	-0,73	> 8
	4	250,03	1,052	7,29	7,52
	5	-4176,02	0,140	-27,63	> 8
	6	-3192,45	0,342	-15,31	> 8
	7	-2326,13	0,521	-8,11	> 8
	8	-1789,01	0,631	-4,37	> 8
S3	1	-4170,00	0,141	-27,53	> 8
	2	-2803,29	0,422	-11,84	> 8
	3	-1436,58	0,704	-2,12	> 8
	4	-69,87	0,986	5,64	> 8
	5	-4221,72	0,130	-28,46	> 8
	6	-3329,55	0,314	-16,65	> 8
	7	-2554,63	0,474	-9,84	> 8
	8	-2108,91	0,565	-6,55	> 8

VPL: Valor presente líquido; B/C: razão benefício–custo descontado; TIR: Taxa interna de retorno; Cenários 1, 2,3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. Sistemas S1, S2 e S3 referem-se aos tratamentos a taxa variada T2, T3 e T4. *Cenários em que o investimento não se pagaria no horizonte de projeto de 8 anos com a de 6% a.a.

Os cenários de menor área não apresentaram viabilidade econômica devido ao alto valor do investimento em ambas as opções de aquisição do SPAD-502 e das despesas com mão de obra nas operações de cultivo do milho. Além disso, a ausência

de viabilidade econômica nos demais cenários dos sistemas S2 e S3 justifica-se também pela menor produtividade obtida (112,11 e 112,04 sacas ha⁻¹) em comparação ao sistema S1 (117,26 sacas ha⁻¹) e a maior quantidade de ureia utilizada. Ademais, para os cenários com amostragem em zonas, cuja finalidade seria de aumentar a eficiência de uso do N por meio de uma amostragem com maior precisão, com exceção do cenário 8 (sistema S1), os demais não apresentaram rentabilidade positiva (TIR > TMA) devido também a maior despesa na amostragem do índice SPAD.

Por sua vez, a análise de viabilidade comparativa utilizando os outros dois sensores resultou em viabilidade econômica de investimento para cenários nos três sistemas de adubação. Na Tabela 4 são demonstrados os resultados para a opção de investimento no ClorofiLOG CFL1030, cujo valor de aquisição é de US\$ 1892,74.

Tabela 4. Índices de viabilidade econômica de uso do clorofilômetro ClorofiLOG CFL1030 no manejo da adubação nitrogenada com os sistemas S1, S2 e S3 na cultura do milho em Januária, MG, 2018

Cenários	Índices de Viabilidade Econômica				
	VPL (US\$)	B/C	TIR (%)	Payback (anos)	
S1	1	-750,80	0,603	-5,28	> 8*
	2	1533,07	1,810	23,90	3,96
	3	3816,95	3,017	46,26	2,27
	4	6100,82	4,223	66,88	1,59
	5	-802,52	0,576	-6,19	> 8
	6	1006,81	1,532	18,19	4,79
	7	2698,90	2,426	35,66	2,87
	8	4061,78	3,146	48,52	2,17
S2	1	-1163,69	0,385	-13,39	> 8
	2	294,42	1,156	9,80	6,69
	3	1752,53	1,926	26,19	3,70
	4	3210,64	2,696	40,57	2,56
	5	-1215,41	0,358	-14,59	> 8
	6	-231,84	0,878	2,81	> 8
	7	634,48	1,335	13,92	5,62
	8	1171,60	1,619	20,01	4,50
S3	1	-1209,39	0,361	-14,45	> 8
	2	157,32	1,083	8,06	7,24
	3	1524,03	1,805	23,80	3,97
	4	2890,74	2,527	37,52	2,74
	5	-1261,11	0,334	-15,70	> 8
	6	-368,94	0,805	0,82	> 8
	7	405,98	1,214	11,18	6,29
	8	851,70	1,450	16,44	5,10

VPL: Valor presente líquido; B/C: razão benefício–custo descontado; TIR: Taxa interna de retorno; Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. Sistemas S1, S2 e S3 referem-se aos tratamentos a taxa variada T2, T3 e T4. *Cenários em que o investimento não se pagaria no horizonte de projeto de 8 anos com a TMA de 6% a.a.

Nos três sistemas de adubação, observou-se rentabilidade positiva para os cenários com área a partir de 3 ha com amostragem global. Para a amostragem em zonas, com exceção do sistema S1, os demais sistemas apresentaram viabilidade econômica para cenários com área a partir de 5 ha, pois somente os cenários 7 (amostragem em 7 zonas em 5 ha) e 8 (amostragem em 9 zonas em 7 ha) apresentaram a $TIR > TMA$, $VPL > 0$ e o payback time abaixo de oito anos.

A simulação de investimento com o Greenseeker cujo valor de aquisição foi de US\$ 1577,29 apresentou a maior rentabilidade (Tabela 5), pois apresentou como condição mínima para decisão a favor do investimento o cenário 6 com TIR de 24,46% e payback time de 3,89 anos.

Tabela 5. Índices de viabilidade econômica de uso do sensor Greenseeker no manejo da adubação nitrogenada com os sistemas S1, S2 e S3 na cultura do milho em Januária, MG, 2018

Cenários	Índices de Viabilidade Econômica				
	VPL (US\$)	B/C	TIR (%)	Payback (anos)	
S1	1	-435,35	0,724	-1,52	> 8*
	2	1848,52	2,172	30,93	3,23
	3	4132,40	3,620	56,69	1,87
	4	6416,27	5,068	80,90	1,32
	5	-487,07	0,691	-2,51	> 8
	6	1322,26	1,838	24,46	3,89
	7	3014,35	2,911	44,40	2,36
	8	4377,23	3,775	59,33	1,79
S2	1	-848,24	0,462	-10,27	> 8
	2	609,87	1,387	15,06	5,38
	3	2067,98	2,311	33,54	3,02
	4	3526,09	3,236	50,08	2,10
	5	-899,96	0,429	-11,56	> 8
	6	83,61	1,053	7,32	7,50
	7	949,93	1,602	19,67	4,55
	8	1487,05	1,943	26,52	3,66
S3	1	-893,94	0,433	-11,41	> 8
	2	472,77	1,300	13,13	5,80
	3	1839,48	2,166	30,82	3,24
	4	3206,19	3,033	46,54	2,26
	5	-945,66	0,400	-12,75	> 8
	6	-53,49	0,966	5,14	> 8
	7	721,43	1,457	16,60	5,07
	8	1167,15	1,740	22,49	4,14

VPL: Valor presente líquido; B/C: razão benefício-custo descontado; TIR: Taxa interna de retorno; Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do IRC para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente. Sistemas S1, S2 e S3 referem-se aos tratamentos a taxa variada T2, T3 e T4. *Cenários em que o investimento não se pagaria no horizonte de projeto de 8 anos com a TMA de 6% a.a.

O ClorofiLOG CFL1030 embora também tenha apresentado o cenário 6 (Sistema S1) como condição mínima para investimento, acabou por resultar em menor rentabilidade e liquidez com TIR de 18,19% e payback time de 4,79 anos. Em geral, a análise determinística mostra que, para o ClorofiLOG CFL1030 e o SPAD 502 adquirido nas duas opções de investimento, a área mínima de cultivo seria a partir dos 3 e 7 ha.

Além disso, para o cenário de maior viabilidade (Cenário 4, sistema S1), observou-se maior rentabilidade e liquidez para o Greenseeker, uma vez que a TIR e o payback time seriam de 80,90% e 1,32 anos. Para as demais opções de investimento, a TIR e o payback seriam de 11,41, 20,59 e 66,88% e 6,23, 4,41 e 1,59 anos, respectivamente para as opções de investimento no SPAD-502 obtido no mercado nacional e via importação e para o ClorofiLOG CFL1030. Ademais, destaca-se o ganho mínimo (razão B/C (%)), cujo valor seria de US\$ 4,06 para cada 1 dólar investido, enquanto para os outros sensores esse valor seria de US\$ 0,22, US\$ 0,64 e US\$ 3,22 (Tabelas 3, 4 e 5).

De modo geral, o uso do Greenseeker resultaria em maior rentabilidade e liquidez do projeto quando comparado as demais opções de sensores. Esse resultado era esperado devido ao seu menor custo de aquisição. Assim, para o sistema S1 que apresentou maior viabilidade econômica, a condição mínima de área de cultivo para decisão a favor do investimento seria de 3, 5 ou 7 ha caso fossem utilizados, respectivamente, o Greenseeker ou ClorofiLOG CLF1030 e o SPAD-502 adquirido via importação e no mercado nacional. Por outro lado, os cenários de 7 ha (amostragem global ou em zonas) serão sempre mais rentáveis, pois como o investimento é fixo, ou seja, independe do tamanho da área cultivada, o aumento da rentabilidade será diretamente proporcional ao aumento da área cultivada.

A rentabilidade do investimento para as duas opções de aquisição do SPAD-502 mostrou-se baixa ou negativa para áreas menores que 5 ha devido ao alto valor de aquisição do mesmo. No entanto, vale ressaltar que o uso do SPAD-502 resultou em maior eficiência de uso do N, ou seja, a aplicação ocorreu somente quando demandada pela planta. Assim, destaca-se o seu benefício ambiental pela redução da quantidade de N aplicada e menor perda por lixiviação e/ou volatilização no meio ambiente.

A análise determinística foi realizada apenas com base no valor de investimento e em situações de adoção ou não dos modelos de sensores. No entanto, sabe-se que durante o cultivo podem ocorrer variações na quantidade de ureia utilizada e

economizada, na produtividade da cultura e principalmente no preço do milho. Isso poderia inviabilizar o investimento em cenários de menor área, pois da série histórica de preços utilizada, observou-se que 24,5% do conjunto de dados (2014 a 2018) apresentaram reduções de 14,32 a 25,84% em relação ao preço médio utilizado na análise determinística (US\$ 13,20 sc 60 kg⁻¹).

Neste caso, deve-se ressaltar a exigência de um bom planejamento pelo produtor com atenção maior ao preço de comercialização, pois como uma commodity, o milho apresenta volatilidade nos preços caracterizada como cíclica ou sazonal, alternando períodos de alta e redução nos preços. Essa volatilidade é diretamente relacionada a eventos climáticos, previsões de safras, estoques, custos de produção e até mesmo movimentações especulativas nos mercados de negociação (SERRA; GIL, 2013).

Por fim, a análise determinística representa apenas o primeiro passo para determinar o risco associado ao investimento, visto que se considera a influência das variáveis de maneira independente, e quando, na verdade, as variáveis devem ser analisadas em conjunto (CARVALHO et al., 2014). Isso resulta em incertezas com relação ao comportamento futuro das variáveis de entrada utilizadas na análise de viabilidade do projeto.

3.3.3 Análise de Viabilidade Econômica Sob Condições de Risco

Para contornar as principais limitações da análise de viabilidade determinística, realiza-se a análise de risco com base em modelos probabilísticos, como a simulação de Monte Carlo, em que as incertezas acerca das variáveis de entrada do fluxo de caixa são analisadas de maneira conjunta. Neste caso, a análise de risco pela simulação de Monte Carlo permite a visualização de múltiplos cenários e suas probabilidades a partir da geração de números aleatórios, agregando informações relevantes ao processo de tomada de decisão em situações de risco (PEREIRA et al., 2014; REGO et al., 2015).

A Figura 1 mostra as distribuições de probabilidade acumulada do VPL obtidas pela simulação de Monte Carlo para os cenários de amostragem do índice SPAD com TMA de 6% a.a para o investimento no SPAD-502 com preço de aquisição no Brasil. A interpretação se dá pela leitura da probabilidade (eixo Y) de ocorrência do valor da variável em análise. Por exemplo, observa-se que a probabilidade do VPL < 0 nos cenários 1 e 5 (Figura 1A) é de 99,40%. Dessa forma, a análise de risco corrobora com a análise determinística, que demonstrou que o investimento nos cenários 1 e 5 não é viável. Estes cenários apresentaram alto risco de insucesso, pois os valores médios do

VPL seriam de -US\$ 5222,97 e -US\$ 5269,31, respectivamente, para os cenários 1 e 5.

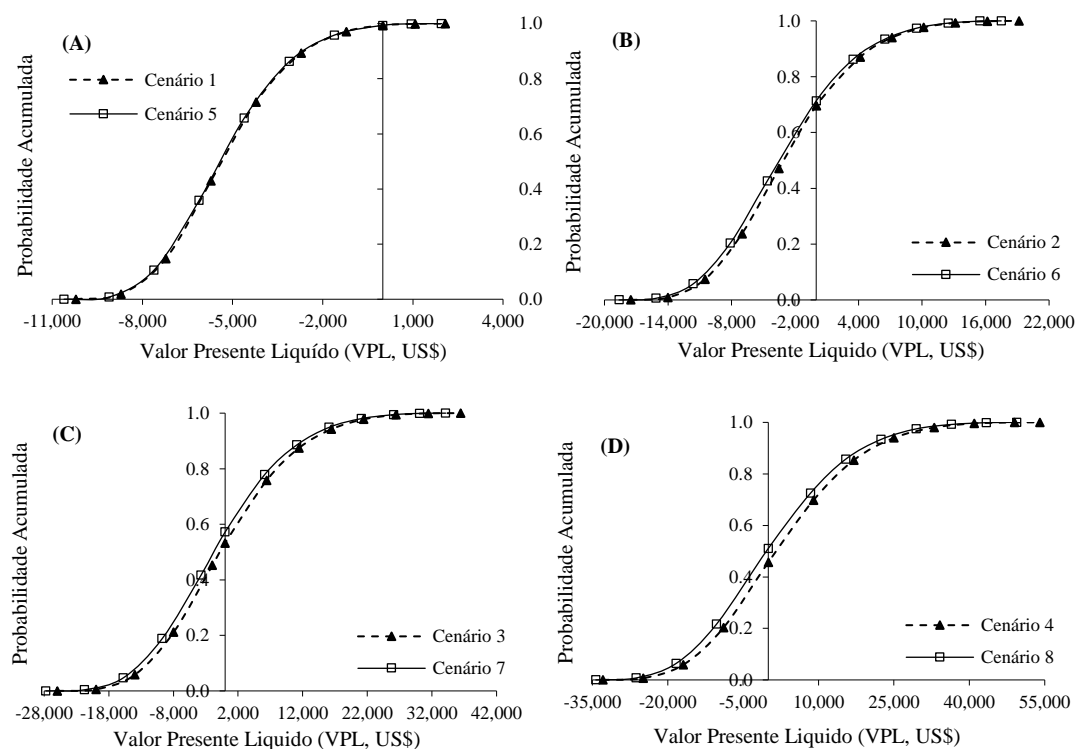


Figura 1. Distribuição de probabilidade acumulada do Valor Presente Líquido (VPL) obtido pela Simulação de Monte Carlo para os cenários de amostragem do índice SPAD utilizando o preço nacional do SPAD-502 em Januária, MG, 2018.

Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente.

Para os demais cenários, a simulação mostrou que na melhor das condições de investimento (Figura 1D, Cenários 4 e 8), a probabilidade do $VPL > 0$ seria de 54,30 e 49,00%, respectivamente, para os cenários 4 e 8 (7 ha). Além disso, a análise dos resultados da simulação mostra que o valor médio do VPL nos cenários 4 e 8 seria de US\$ 2599,33 e US\$ 743,80. Esse resultado mostra que, assim como na análise determinística, o investimento no cenário 4 é viável. Para o cenário 8, diferentemente da análise inicial, a simulação de Monte Carlo mostra que o uso do SPAD-502 também pode ser recomendado para áreas de 7 ha com amostragem em zonas.

De maneira semelhante, os resultados da opção de investimento no SPAD-502 obtido via importação, mostraram que os cenários com área abaixo de 3 ha, independentemente do tipo de amostragem, apresentariam no máximo 40,59% de probabilidade do $VPL > 0$ (Cenário 2, amostragem global em 3 ha), ou seja, o risco de insucesso é alto. Diferentemente, para os cenários de 5 e 7 ha que se mostraram viáveis

na análise determinística, a probabilidade do $VPL > 0$ seria de 53,80 e 49,50% para os cenários 3 e 7 (Figura 2C) e 59,60 e 53,70%, respectivamente, para os cenários 4 e 8 conforme demonstrado na Figura 2D. Neste caso, além de ser vantajoso do ponto de vista ambiental, a adoção do SPAD-502 na condição de importação seria favorável para cenários a partir de 5 ha, independente do tipo de amostragem.

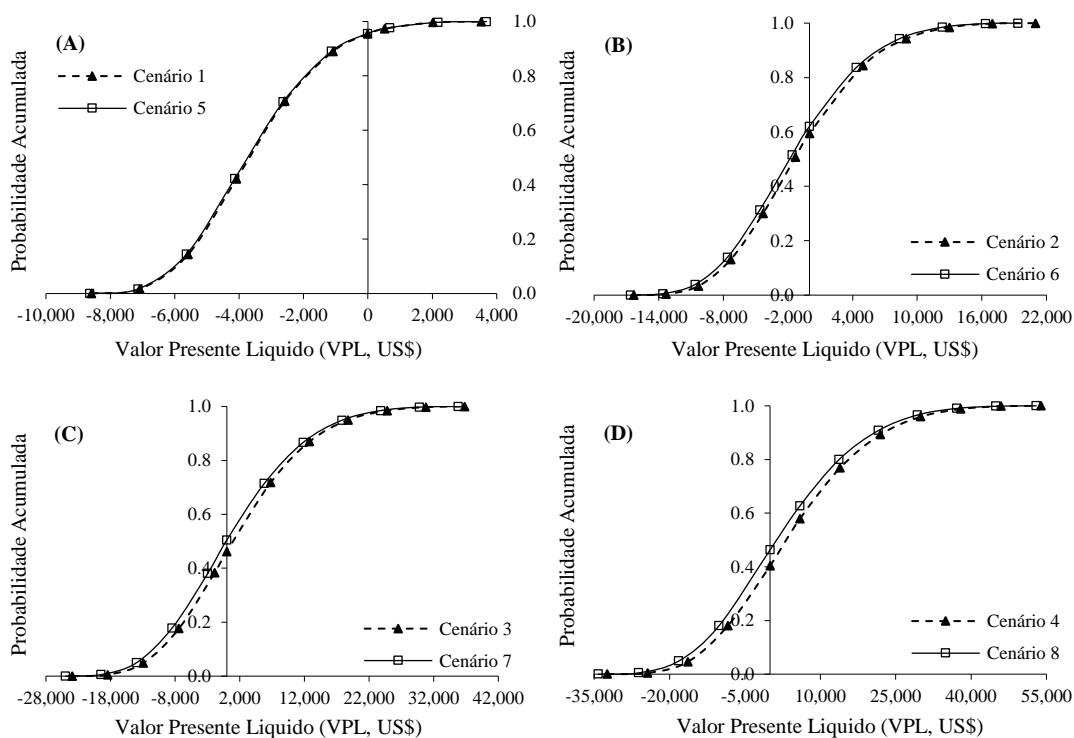


Figura 2. Distribuição de probabilidade acumulada do Valor Presente Líquido (VPL) obtido pela Simulação de Monte Carlo para os cenários de amostragem do índice SPAD utilizando o custo de importação do SPAD-502 em Januária, MG, 2018.

Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente.

Por sua vez, o investimento no ClorofiLOG CFL1030 mostra que, com exceção dos cenários 1 e 5, que apresentaram probabilidade do $VPL > 0$ de 35,46 e 34,73 (Figura 3A), os demais cenários apresentariam no mínimo 57,72% de probabilidade do $VPL > 0$ (Cenário 6, amostragem em 5 zonas em 3 ha). Assim, embora o risco ainda exista, o resultado obtido mostra a possibilidade de investimento em áreas a partir de 3 ha (Cenários 2 e 6) independente do sistema de adubação utilizado. Esse resultado difere do observado na análise determinística, em que, com exceção do sistema S1, o ClorofiLOG CFL1030 somente seria viável em áreas a partir de 3 ha e com amostragem global.

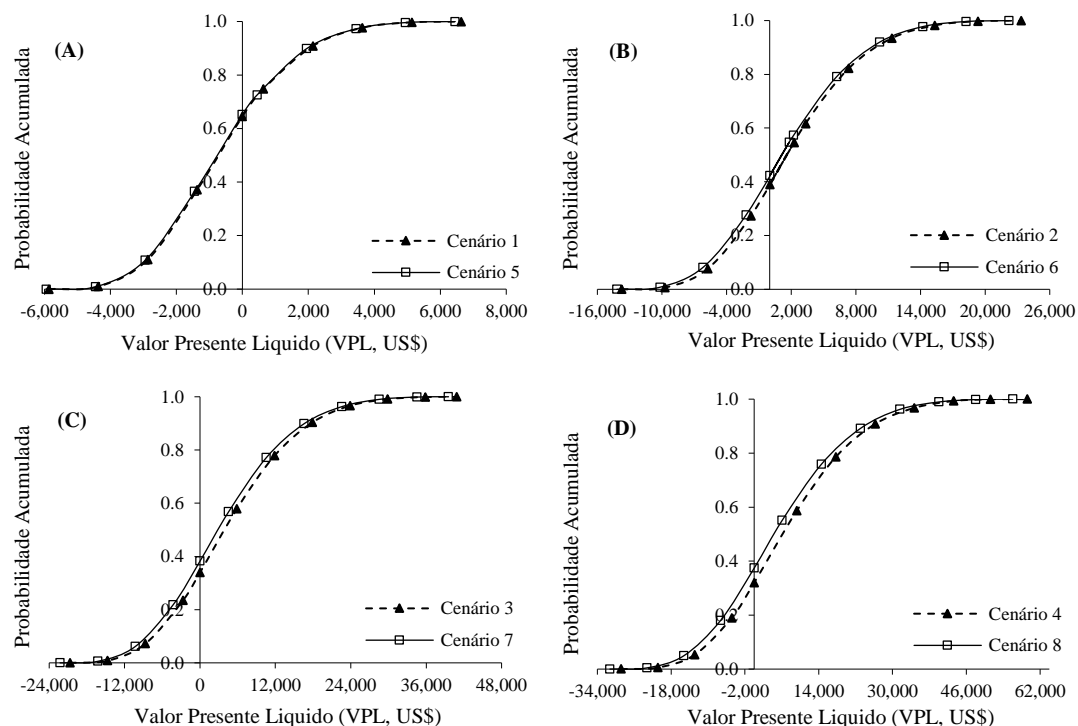


Figura 3. Distribuição de probabilidade acumulada do Valor Presente Líquido (VPL) obtido pela Simulação de Monte Carlo para os cenários de amostragem do índice relativo de clorofila utilizando o ClorofiLOG CFL1030 em Januária, MG, 2018. Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente

Para os cenários a partir de 5 ha (Figura 3C e 3D), a probabilidade do $VPL > 0$ seria de 66,07 e 61,79% e 68,00 e 62,60%, respectivamente, para os cenários 3 e 7 (5 ha) e 4 e 8 (7 ha). Nestes cenários, o VPL médio variou de US\$ 3625,96 a US\$ 7240,98. Além disso, observa-se que a probabilidade de insucesso do investimento entre os cenários de 5 e 7 ha são próximas. Isso decorre do baixo saldo (US\$) do fluxo de caixa descontado nestes cenários, visto que o alto valor do investimento e as despesas com mão de obra acabam por deduzir as receitas obtidas com a comercialização do milho.

A opção de investimento no Greenseeker apresentou o menor risco em relação as demais opções de sensores analisadas. Com exceção dos cenários 1 e 5 (1 ha), a condição mínima para o investimento seria a partir dos cenários 2 e 6 (3 ha), cuja viabilidade positiva foi reportada na análise determinística. Para estes cenários, a probabilidade do $VPL > 0$ foi de 63,03 e 60,02%, respectivamente, para os cenários 2 e 6 (Figura 4B). Para os demais cenários, a probabilidade de sucesso no investimento variou de 62,98 a 69,34% e o VPL médio de US\$ 3939,92 a US\$ 7541,73,

respectivamente, para os cenários 7 (amostragem em 7 zonas em 5 ha) e 4 (amostragem global em 7 ha).

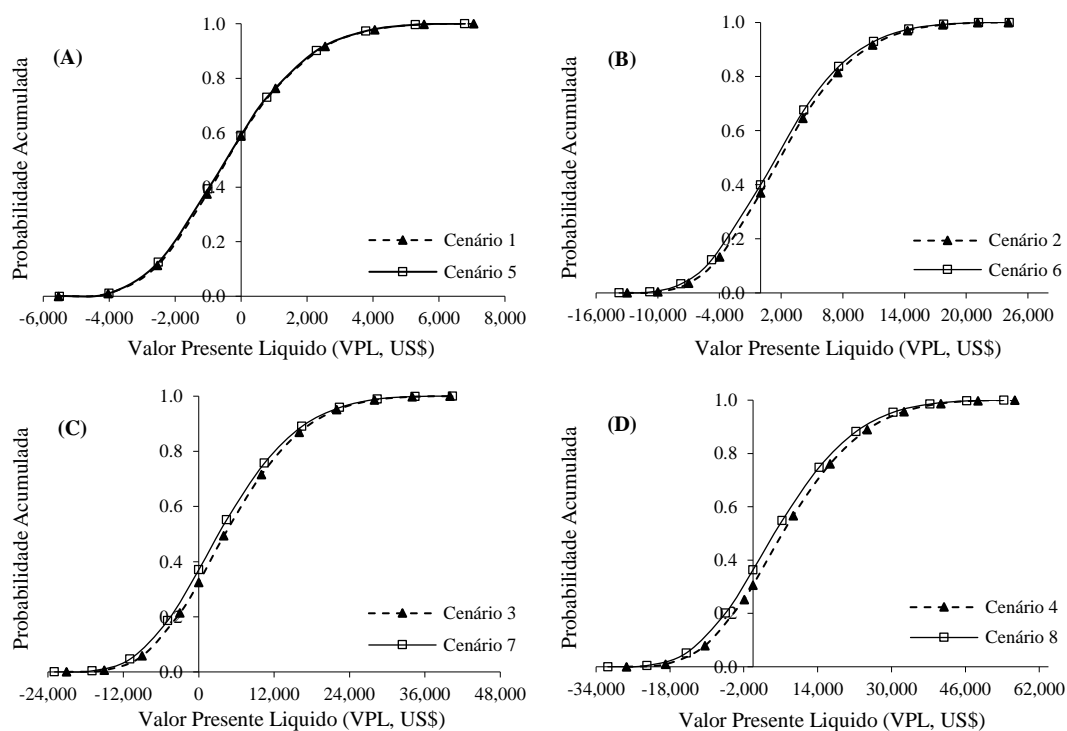


Figura 4. Distribuição de probabilidade acumulada do Valor Presente Líquido (VPL) obtido pela Simulação de Monte Carlo para os cenários de amostragem do índice relativo de clorofila utilizando o Greenseeker em Januária, MG, 2018.

Cenários 1, 2, 3 e 4: Amostragem global da média do índice SPAD para a área de 1, 3, 5 e 7 ha; Cenários 5, 6, 7 e 8: Amostragem dividida em zonas (subáreas), sendo utilizadas 3, 5, 7 e 9 zonas para 1, 3, 5 e 7 ha, respectivamente

Outro ponto analisado foi o impacto do tipo de amostragem (global ou em zonas) nos valores do VPL. Todos os cenários com amostragem em zonas apresentaram menor valor de VPL, o que era esperado, pois o SPAD-502 e o ClorofiLOG CFL 1030 são sensores de contato com a folha, logo, tem-se uma despesa maior com mão de obra na amostragem em campo. Entretanto, para o uso do Greenseeker, possivelmente, haveria uma redução no tempo de amostragem, pois o mesmo não necessita de contato foliar para amostragem. Ademais, vale ressaltar que, como as amostragens do índice relativo de clorofila ocorreram somente com o SPAD-502 e o ClorofiLOG CFL1030, caso fosse utilizado o Greenseeker seria necessário realizar em outra oportunidade um estudo para determinação do tempo e eventuais despesas com amostragem.

Assim, para as opções de investimento em que os cenários apresentaram o VPL > 0 , a diferença nos valores desse indicador pelo tipo de amostragem observada é pequena. Como exemplo, os cenários 3 e 7 (ClorofiLOG CFL1030) em que o VPL médio foi de US\$ 4640,73 e US\$ 3625,96. Diferentemente, para os cenários 4 e 8,

observou-se maior diferença entre os tipos de amostragem, com o VPL médio de US\$ 7240,98 e US\$ 5400,57.

Observa-se que o aumento da diferença no VPL entre a amostragem global ou em zonas é diretamente proporcional ao tamanho da área de cultivo e do número de zonas de amostragem. Neste caso, percebe-se que há uma limitação da utilização do clorofilômetro para áreas maiores e com trabalho manual. Desta forma, para cultivos a partir de 7 ha, já seria recomendado utilizar o Greenseeker, cujo princípio de amostragem baseia-se no escaneamento da biomassa da vegetação. Além disso, seria ideal o uso da mecanização agrícola, pois o Greenseeker pode ser acoplado tanto ao trator como a um implemento agrícola. Isso possivelmente resultaria em redução de despesas com mão de obra nas operações de cultivo e no tempo de amostragem.

De modo geral, a simulação de Monte Carlo mostrou que, o investimento no SPAD-502 adquirido no mercado nacional seria economicamente viável em áreas a partir de 7 ha com amostragem global ou em zonas. Por outro lado, a opção de importação já se mostra viável a partir dos 5 ha independente do tipo de amostragem. Entretanto, deve-se ressaltar que o risco de insucesso do investimento é alto, ou seja, a probabilidade do $VPL < 0$ seria de 51,05% (Figura 1D) para o SPAD-502 adquirido no mercado nacional e 50,52% para a opção de importação (Figura 2C).

Diferentemente, o investimento no ClorofiLOG CFL1030 ou no Greenseeker resultaria em maior rentabilidade e liquidez, sendo tanto nos cenários de amostragem global ou em zonas a partir de 3 ha. Neste caso, embora o risco ainda exista, a amostragem em zonas seria mais recomendada, pois pressupõe-se que quanto maior o número de amostragens melhor será a representação da variabilidade espacial do requisito de N pela cultura do milho. Isso poderia resultar em maior economia de fertilizantes e menor impacto ambiental.

Por fim, deve-se ressaltar que toda simulação possui limitações, uma vez que os valores utilizados na constituição do fluxo de caixa são projeções para cenários futuros e estes estão sujeitos a condições adversas e, portanto, sujeitos a erros. Além do risco econômico atribuído as variáveis de entrada do projeto, há o risco associado as condições climáticas e a ocorrência de doenças e pragas durante o ciclo da cultura.

3.4 CONCLUSÃO

A análise de viabilidade econômica e de risco do investimento destinado a adoção de sensores para o manejo da adubação nitrogenada a taxa variada na cultura do milho mostrou que, o investimento no clorofilômetro SPAD-502, independente do tipo de amostragem, seria economicamente viável em áreas de cultivo a partir de 7 ha para aquisição no mercado nacional e 5 ha para opção de importação. Por outro lado, os sensores ClorofiLOG CFL1030 e o Greenseeker, caso fossem utilizados, poderiam resultar em maior viabilidade econômica em áreas a partir de 3 ha com amostragem global ou em zonas.

3.5 REFERÊNCIAS

- ALI, M. M.; AL-ANI, A.; EAMUS, D.; TAN, D. K. Y. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques – a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 7, p.928–953. 2017.
- AMADO, T. J. C.; VILLALBA, E. O. H.; BORTOLOTTI, R. P.; NORA, D. D.; BRAGAGNOLO, J.; LEÓN, E. A. B. Yield and nutritional efficiency of corn in response to rates and splits of nitrogen fertilization. **Revista Ceres**, v. 64, n. 4, p.351-359. 2017.
- BAIO, F. H.; SILVA, S. P. D.; CAMOLESE, H. D. S.; NEVES, D. C. Financial analysis of the investment in precision agriculture techniques on cotton crop. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, p.838-847. 2017.
- BAITELLE, D. C.; DE JESUS FREITAS, S.; VIEIRA, K. M.; MENEGHELLI, C. M.; VERDIN-FILHO, A. C.; BARONI, D. F. PONCIANO, N. J.; DE SOUZA, P. M. Feasibility and Economic Risk of Programmed Pruning Cycle in Arabic Coffee. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 21, n. 4, p.1-9, 2018.
- BAZAME, H. C. **Adubação nitrogenada à taxa variada em capim Xaraés com base em sensores espectrais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de engenharia agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 44p. 2018.
- BIERMACHER, J. T.; EPPLIN, F. M.; BRORSEN, B. W.; SOLIE, J. B.; RAUN, W. R. Economic feasibility of site-specific optical sensing for managing nitrogen fertilizer for growing wheat. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 3, p. 213-230. 2009.
- BORGHI, E.; AVANZI, J. C.; BORTOLON, L.; JUNIOR, A. L.; BORTOLON, E. S. Adoption and Use of Precision Agriculture in Brazil: Perception of Growers and Service Dealership. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 11, p.89-104. 2016.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; JASPER, J.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T.G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p.1288-1298. 2013.
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.

CAO, Q.; MIAO, Y.; LI, F.; GAO, X.; LIU, B.; LU, D.; CHEN, X. Developing a new Crop Circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 2-18. 2017.

CARVALHO, C. R. F.; PONCIANO, N. J.; SOUZA, P. M.; SOUZA, C. L. M.; SOUSA, E. F. Viabilidade econômica e de risco da produção de tomate no município de Cambuci-RJ, Brasil. **Ciência Rural**, v. 44, n. 12, p. 2293-2299, 2014.

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. Impactos potenciais da agricultura de precisão sobre a economia brasileira. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 10, p.177-204, 2013.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: décimo segundo levantamento. Setembro 2018. v.5, safra 2017/18, n. 12.** Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 02 out. 2018.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA LTDA. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG / CFL 1030).** Porto Alegre: Falker, 2008. 33p.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Índice Geral de Preços Disponibilidade Interna, IGP-DI.** Disponível em: <http://www14.fgv.br/novo_fgvdados/visualizaconsulta.aspx>. Acesso em: 20 out, 2018.

FRANCIS, D. D.; PIEKIELEK, W. P. **Assessing Crop Nitrogen Needs with Chlorophyll Meters.** SSMG-12, p. 1-4, 1999.

HARDIN, J. A.; SMITH, M. W.; WECKLER, P. R.; CHEARY, B. S. In situ measurement of pecan leaf nitrogen concentration using a chlorophyll meter and vis-near infrared multispectral camera. **Hortscience**, v. 47, n. 7, p. 955-960, 2012.

HAWKINS, J. A.; SAWYER, J. E.; BARKER, D. W.; LUNDVALL, J. P. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 4, p. 1034–1040. 2007.

LINK, J.; GRAEFF, S.; BATCHELOR, W. D.; CLAUPEIN, W. Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. **Agricultural Systems**, v. 91, n.1, p.135–153. 2006.

NTECH INDUSTRIES. **The GreenSeeker hand held data collection and mapping unit**. Sd. Disponível em:<www.ntechindustries.com/handheld.html>. Acesso em: 15 de janeiro de 2018.

PALISADE. **@RISK: Risk analysis and simulation add-in for Microsoft® Excel**. Ithaca: Palisade, 2018. 515p.

PAMPOLINO, M. F.; MANGUIAT, I. J.; RAMANATHAN, S.; GINES, H. C.; TAN, P. S.; CHI, T. T. N.; RAJENDRAN, R.; BURESH, R.J. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems. **Agricultural Systems**, v. 93, p. 1–24. 2007.

PEREIRA, E. J. S.; PINHO, J. T.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. Methodology of risk analysis by Monte Carlo Method applied to power generation with renewable energy. **Renewable Energy**, v. 69, p. 347-355. 2014.

REGO, M. A. S.; SABBAG, O. J.; SOARES, R.; PEIXOTO, S. Risk analysis of the insertion of biofloc technology in a marine shrimp *Litopenaeus vannamei* production in a farm in Pernambuco, Brazil: A case study. **Aquaculture**, v. 469, p.67-71, 2017.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 2ed. Viçosa: Editora UFV; 2013. 386 p.

SANTOS, M. M.; GALVÃO, J. C. C.; SILVA, I. R.; MIRANDA, G. V.; FINGER, F. L. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1185-1194, 2010.

SCHLICHTING, A. F.; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, M. C.; PIETROSOUZA, W.; SILVA, T. J. A.; FARIAS, L. N. Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p. 1148-1151, 2015.

SERRA, T.; GIL, J. M. Price volatility in food markets: can stock building mitigate price fluctuations?. **European Review of Agricultural Economics**, v. 40, n. 3, p. 507-528. 2013.

SHAVER, T. M.; KRUGER, G. R.; RUDNICK, D. R. Crop canopy sensor orientation for late season nitrogen determination in corn. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n.15, p. 2217-2223. 2017.

SCHLICHTING, A. F.; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, M. C.; PIETROSOUZA, W.; SILVA, T. J. A.; FARIAS, L. N. Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p. 1148-1151, 2015.

SILVEIRA, P. M. D.; GONZAGA, A. C. D. O. Portable chlorophyll meter can estimate the nitrogen sufficiency index and levels of topdressing nitrogen in common bean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p.1-6. 2017.

TOZER, P. R. Uncertainty and investment in precision agriculture—Is it worth the money?. **Agricultural Systems**, v. 100 n.1-3, p. 80-87. 2009.

USDA. United States Department of Agriculture. **Crop production report – September 2018**. Disponível em:
<https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/crop0918.pdf>
Acesso em: 02 out. 2018.

YUAN, Z.; ATA-UL-KARIM, S. T.; CAO, Q.; LU, Z.; CAO, W.; ZHU, Y.; LIU, X. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings. **Field crops research**, v. 185, p.12-20. 2016.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B. The “null hypothesis” of precision agriculture management. **Precision Agriculture**, v. 2, n. 3, p.265-279. 2001.

ZHAO, B.; ATA-UL-KARIM, S. T.; LIU, Z.; ZHANG, J.; XIAO, J.; LIU, Z.; QIN, A.; NING, D.; YANG, Q.; ZHANG, Y.; DUAN, A. Simple Assessment of Nitrogen Nutrition Index in Summer Maize by Using Chlorophyll Meter Readings. **Frontiers in plant science**, v. 9, n. 11, p. 1-13, 2018.

4. CONCLUSÃO GERAL

De modo geral, pelos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que:

- O uso do clorofilômetro SPAD-502 na cultura do milho é viável do ponto vista técnico, pois resultou em economia de até 24% do total de nitrogênio utilizado sem apresentar redução na produtividade de grãos;
- O SPAD-502 mostrou-se economicamente viável em ambas as condições de aquisição (mercado nacional ou importação) em áreas de cultivo a partir de 7 ou 5 ha. Entretanto, vale ressaltar que já existem no mercado outras opções de sensores (clorofilômetro e radiômetro) com precisão de leitura similar para fins de tomada de decisão de adubação e que seriam economicamente viáveis em áreas a partir de 3 ha.
- O uso de sensores ópticos associados a técnica de adubação a taxa variada é vantajosa em relação ao sistema convencional de adubação largamente utilizado no Brasil. Além disso, o clorofilômetro é recomendável para áreas de pequeno porte, pois o seu uso poderá aumentar a eficiência do sistema de produção por meio do menor consumo de nitrogênio e, conseqüentemente, menor impacto ambiental.

APÊNDICES

Apêndice A

Resultados da análise físico-química do solo na camada de 0 a 20 cm da área experimental em Januária, MG

Identif.	Composição Química																				Comp Física				
	pH ¹	MO ²	P ³	K ³	Na ³	Ca ⁴	Mg ⁴	Al ⁴	H+Al ⁵	SB	t	T	V	m	B ⁶	Cu ³	Fe ³	Mn ³	Zn ³	S ⁷	Prem ⁸	CE	Areia	Silte	Argila
		dag/kg	mg/dm ³					cmolc/dm ³						%				mg/dm ³				mg/l	dS/m	dag/kg	
539	6,15	1,2	37,2	43	-	4,1	1,1	0,00	1,68	5,3	5,3	7,0	75,9	0,0	-	0,7	45,8	80,4	3,8	-	63,3	0,11	66	13	21
540	6,04	1,2	35,1	31	-	4,8	1,0	0,00	1,59	5,9	5,9	7,5	78,9	0,0	-	0,7	52,2	75,4	3,2	-	63,3	0,11	68	12	20
541	5,78	1,3	47,3	27	-	4,9	1,1	0,00	1,62	6,1	6,1	7,7	79,0	0,0	-	0,8	67,2	85,1	3,5	-	68,2	0,09	67	11	22
542	5,73	1,5	54,1	37	-	5,3	1,0	0,00	1,42	6,4	6,4	7,8	81,8	0,0	-	0,8	62,4	93,7	4,6	-	63,5	0,12	66	11	23
543	5,94	1,4	58,4	47	-	5,1	0,9	0,00	1,78	6,1	6,1	7,9	77,4	0,0	-	0,9	43,2	87,5	4,8	-	63,0	0,12	67	12	21

1 = pH em água; 2 = Colorimetria; 3 = Extrator: Mehlich-1X; 4 = Extrator: KCl 1 mol/L; 5 = pH SMP; 6 = Extrator: BaCl₂; 7 = Extrator: Ca(H₂PO₄)₂. 500 mg/L de P em HOAc 2mol/L; 8 = Solução equilíbrio de P; SB = Soma de bases; t = CTC efetiva; T = CTC a pH 7; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio; P-rem = Fósforo remanescente; CE = Condutividade elétrica. dag/kg = %; mg/dm³ = ppm; cmolc/dm³ = meq/100 cm³ - Todos os métodos aplicam-se unicamente à análise de solos para fins agrônomicos.

Amostras: 539, 540, 541, 542 e 543 correspondem aos blocos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Apêndice B

Abaixo seguem exemplos de fluxos de caixa para os cenários de investimento nos clorofilômetros SPAD-502 (via importação) e ClorofiLOG CFL1030 e no radiômetro Greenseeker.

Fluxo de caixa do cenário 4 (Sistema S1) para investimento no clorofilômetro SPAD-502 adquirido via importação

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82
Comercialização do milho	0,00	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82
Saídas:	4853,35	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57
Investimento (SPAD-502)	4853,35	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57
Fluxo de Caixa	-4853,35	1,287,25	1287,25	1,287,25	1287,25	1287,25
Fluxo de Caixa Descontado	-4853,35	1,214,39	1145,65	1,080,80	1019,62	961,91
Saldo Acumulado	-4853,35	-3566,10	-2278,85	-991,60	295,65	1582,91
Saldo Acumulado Descontado	-4853,35	-3638,96	-2493,31	-1412,51	-392,89	569,02

Cenário 4: amostragem global da média do índice SPAD em 7 hectares

Fluxo de caixa do cenário 6 (Sistema S1) para investimento no clorofilômetro ClorofiLOG CFL1030

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	4643,50	4643,50	4643,50	4643,50	4643,50
Comercialização do milho	0,00	4643,50	4643,50	4643,50	4643,50	4643,50
Saídas:	1892,74	4176,56	4176,56	4176,56	4176,56	4176,56
Investimento (SPAD-502)	1892,74	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	4176,56	4176,56	4176,56	4176,56	4176,56
Fluxo de Caixa	-1892,74	466,93	466,93	466,93	466,93	466,93
Fluxo de Caixa Descontado	-1892,74	440,50	415,57	392,05	369,85	348,92
Saldo Acumulado	-1892,74	-1425,81	-958,88	-491,94	-25,01	441,92
Saldo Acumulado Descontado	-1892,74	-1452,24	-1036,67	-644,62	-274,77	74,15

Cenário 6: amostragem do índice SPAD em 5 zonas em 3 hectares

Fluxo de caixa do cenário 4 (Sistema S1) para investimento no clorofilômetro ClorofiLOG CFL1030

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82
Comercialização do milho	0,00	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82	10834,82
Saídas:	1892,74	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57
Investimento (SPAD-502)	1892,74	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57	9547,57
Fluxo de Caixa	-1892,74	1287,25	1287,25	1287,25	1287,25	1287,25
Fluxo de Caixa Descontado	-1892,74	1214,39	1145,65	1080,80	1019,62	961,91
Saldo Acumulado	-1892,74	-605,49	681,76	1969,01	3256,26	4543,52
Saldo Acumulado Descontado	-1892,74	-678,35	467,30	1548,10	2567,72	3529,63

Cenário 4: amostragem global da média do índice SPAD em 7 hectares

Fluxo de caixa do cenário 3 (Sistema S1) para investimento no radiômetro Greenseeker

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	7739,16	7739,16	7739,16	7739,16	7739,16
Comercialização do milho	0,00	7739,16	7739,16	7739,16	7739,16	7739,16
Saídas:	1577,29	6819,69	6819,69	6819,69	6819,69	6819,69
Investimento (SPAD-502)	1577,29	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	6819,69	6819,69	6819,69	6819,69	6819,69
Fluxo de Caixa	-1577,29	919,47	919,47	919,47	919,47	919,47
Fluxo de Caixa Descontado	-1577,29	867,42	818,32	772,00	728,30	687,08
Saldo Acumulado	-1577,29	-657,82	261,64	1181,11	2100,57	3020,04
Saldo Acumulado Descontado	-1577,29	-709,87	108,45	880,45	1608,75	2295,83

Cenário 3: amostragem global da média do índice SPAD em 5 hectares

Fluxo de caixa do cenário 3 (Sistema S2) para investimento no radiômetro Greenseeker

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	7438,86	7438,86	7438,86	7438,86	7438,86
Comercialização do milho	0,00	7438,86	7438,86	7438,86	7438,86	7438,86
Saídas:	1577,29	6851,84	6851,84	6851,84	6851,84	6851,84
Investimento (SPAD-502)	1577,29	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	6851,84	6851,84	6851,84	6851,84	6851,84
Fluxo de Caixa	-1577,29	587,02	587,02	587,02	587,02	587,02
Fluxo de Caixa Descontado	-1577,29	553,79	522,45	492,87	464,97	438,66
Saldo Acumulado	-1577,29	-990,27	-403,25	183,77	770,79	1357,81
Saldo Acumulado Descontado	-1577,29	-1023,50	-501,05	-8,18	456,80	895,45

Cenário 3: amostragem global da média do índice SPAD em 5 hectares

Fluxo de caixa do cenário 3 (Sistema S3) para investimento no radiômetro Greenseeker

Ano	0	1	2	3	4	5
Entradas:	0,00	7392,00	7392,00	7392,00	7392,00	7392,00
Comercialização do milho	0,00	7392,00	7392,00	7392,00	7392,00	7392,00
Saídas:	1577,29	6841,78	6841,78	6841,78	6841,78	6841,78
Investimento (SPAD-502)	1577,29	-	-	-	-	-
Despesas operacionais	-	6841,78	6841,78	6841,78	6841,78	6841,78
Fluxo de Caixa	-1577,29	550,22	550,22	550,22	550,22	550,22
Fluxo de Caixa Descontado	-1577,29	519,08	489,70	461,98	435,83	411,16
Saldo Acumulado	-1577,29	-1027,07	-476,84	73,38	623,60	1173,83
Saldo Acumulado Descontado	-1577,29	-1058,21	-568,51	-106,54	329,29	740,45

Cenário 3: amostragem global da média do índice SPAD em 5 hectares

Apêndice C

Série histórica do preço do milho (sc 60 kg), salário mínimo e custo horário de mão de obra (US\$ h⁻¹) utilizados para ajuste das distribuições da simulação de Monte Carlo

Preço do milho (US\$ sc 60 kg ⁻¹)												
Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2014	13.99	14.99	18.20	18.42	15.55	15.18	14.98	13.64	13.26	12.63	13.08	13.76
2015	13.79	13.11	11.76	12.92	11.47	10.13	9.97	8.97	9.14	9.52	10.89	10.78
2016	11.85	12.69	13.93	12.54	15.60	16.61	17.77	17.95	18.43	16.01	14.37	13.61
2017	14.46	14.89	14.77	15.12	14.21	14.20	14.60	15.24	11.49	11.66	11.60	11.85
2018	11.96	11.85	12.26	12.33	11.55	11.13	11.13	11.61	10.35	-	-	-
Salário Mínimo (US\$)												
2014	304.00	303.81	311.33	324.35	326.08	323.96	325.54	319.31	310.43	295.79	284.17	274.37
2015	299.21	279.85	251.05	258.99	257.43	253.28	244.53	224.27	201.75	203.12	208.70	203.59
2016	217.19	221.49	237.63	246.83	248.68	256.46	268.71	274.22	270.29	276.27	263.36	262.56
2017	293.18	301.91	299.62	298.83	292.02	284.39	292.31	297.43	298.96	293.67	287.53	284.69
2018	297.20	294.36	290.98	280.02	262.42	252.88	249.21	242.80	231.78	-	-	-
Despesa hora trabalhada (US\$)												
2014	2.40	2.40	2.45	2.56	2.57	2.55	2.57	2.52	2.45	2.33	2.24	2.16
2015	2.36	2.21	1.98	2.04	2.03	2.00	1.93	1.77	1.59	1.60	1.65	1.61
2016	1.71	1.75	1.87	1.95	1.96	2.02	2.12	2.16	2.13	2.18	2.08	2.07
2017	2.31	2.38	2.36	2.36	2.30	2.24	2.30	2.34	2.36	2.32	2.27	2.24
2018	2.34	2.32	2.29	2.21	2.07	1.99	1.96	1.91	1.83	-	-	-

OBS: Os dados da tabela foram convertidos em dólar (US\$) com taxa cambial referente a média de cada mês da série de dados.

Apêndice D

Série de dados de produtividade (sc 60 kg ha⁻¹) e quantidade de ureia utilizada (kg ha⁻¹) para ajuste das distribuições da simulação de Monte Carlo

		Produtividade de grãos (sc 60 kg ha ⁻¹)				Minimo	Média	Moda	Máximo
S1	131,01	109,39	123,70	109,92	112,30				
S2	124,50	115,45	115,53	127,30	80,78	72,14	114,01	-	139,77
S3	127,39	139,77	133,15	87,77	72,14				
		Ureia utilizada (kg ha ⁻¹)							
S1	203,64	203,64	203,64	203,64	152,73				
S2	203,64	254,55	203,64	152,73	203,64	114,55	193,45	203,64	254,55
S3	178,18	254,55	216,36	152,73	114,55				

S1, S2 e S3: Referem-se aos Sistemas de adubação utilizados nos tratamentos 1, 2 e 3

Tabela 5. Funções de distribuição de probabilidade das variáveis de entrada da Simulação de Monte Carlo

Variável	Unidade	Tipo de Distribuição	Sintaxe da distribuição	Parâmetros
Preço do milho	US\$ sc 60 kg ⁻¹	Histograma	RiskHistogrm (mínimo, máximo, {p1, p2,...,pn})*	8,97, 18,43, p1, p2:pn
Custo mão de obra	US\$ h ⁻¹	Histograma	RiskHistogrm (mínimo, máximo, {p1, p2,...,pn})	1,59, 2,57, p1, p2:pn
Produtividade de grãos	sc 60 kg ha ⁻¹	Triangular	RiskTriang (mínimo, moda, máximo)	72,14, 114,01, 139,77
Ureia utilizada	kg ha ⁻¹	Triangular	RiskTriang (mínimo, moda, máximo)	114,55, 203,64, 254,55

*: Distribuição do histograma com n classes entre o valor mínimo e máximo com peso de probabilidade p para cada classe; OBS: Para o ajuste da distribuição dos dados de produtividade utilizou-se a média devido à ausência da moda no conjunto de dados.