

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

AUGUSTO CESAR DE ARRUDA SANTANA

**ESTIMATIVA DOS TEORES DE NITROGÊNIO NA FOLHA
DIAGNÓSTICO E BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR POR
ESPECTRORRADIOMETRIA**

**RECIFE
2017**

Augusto Cesar de Arruda Santana
Engenheiro Agrônomo

Estimativa dos teores de nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da cana-de-açúcar por espectrorradiometria

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte de requisitos para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Ciências do Solo

Orientador: Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

Co-orientadores: Prof^ª. Dra. Josiclêda Domiciano Galvínio

Prof. Dr. Renato Lemos dos Santos

RECIFE
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S232e Santana, Augusto Cesar de Arruda
Estimativa dos teores de nitrogênio na folha diagnóstico e
biomassa da cana-de-açúcar por espectrorradiometria / Augusto
Cesar de Arruda Santana. – 2017.
112 f. : il.

Orientador: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.
Coorientadores: Josiclêda Domiciano Galvêncio, Renato Lemos
dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo,
Recife, BR-PE, 2017.

Inclui referências e apêndice(s).

1. *Saccharum* spp. 2. Folha diagnóstico de N 3. Matéria seca da
parte aérea 4. Medidas espectrais 5. Índice de vegetação 6. Avaliação
nutricional I. Oliveira, Emídio Cantídio Almeida de, orient.
II. Galvêncio, Josiclêda Domiciano, coorient. III. Santos, Renato
Lemos dos, coorient. IV. Título

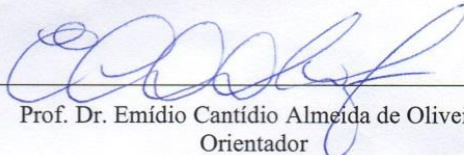
CDD 631.4

AUGUSTO CESAR DE ARRUDA SANTANA

**Estimativa dos teores de nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da cana-de-açúcar
por espectrorradiometria**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências do solo, da
Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Agronomia - Ciências do Solo.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2017

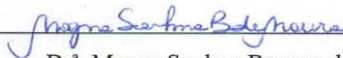


Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus de Garanhuns



Dr. Magna Soelma Beserra de Moura
Embrapa Semiárido

*“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e
de repente você estará fazendo o impossível”.*

São Francisco de Assis

DEDICO

Minha esposa, meus pais, minhas avós, tios e primos, cunhadas e cunhados, amigos de universidade (incluindo professores e alunos), amigos do dia-a-dia e de grande honra a

Deus e a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser o criador do céu e da terra e que nada nesse mundo seria possível sem sua permissão; por ter me livrado sempre dos perigos e ter dado sabedoria a discernir o melhor caminho.

A minha esposa Dilene Nicolau de Mendonça, por ser minha companheira, por dar-me forças nas horas mais difíceis e trazer felicidades, amor e carinho.

Aos meus pais Lenivaldo Alves de Santana e Maria Aparecida de Arruda Santana por ser a minha fortaleza e por ter me conduzido a grandes vitórias na minha vida.

Aos meus tios e tias maternos: Maria das Dores, Ivaneide, Iraneide, Alaíde e Itamir, por serem grandes pessoas em minha vida, por está sempre ao meu lado nas horas mais difíceis e também em momentos repletos de felicidades.

Em especial ao meu Tio Israel que no ano de 2016 foi morar junto à casa do Pai, mas que deixou muitos ensinamentos de vida e que até hoje levo comigo para caminhar na minha vida profissional e espiritual.

Aos meus tios e tias paternos: Heronice, Heronilda, Helenilda, Welligton e meu grande amigo tio e segundo pai Elias por me mostrar o caminho de lutas e conquistas, por serem grandes fontes de inspiração e sucesso.

Ao meu avô Heleno José que também partiu para a casa do pai, em 2016, e que tenho grande admiração pela sua pessoa, saudades externas.

A todos os meus primos paternos e maternos, pelos momentos de descontração e apoio nas horas mais difíceis.

As minhas duas avós: Joana e Mariinha por serem duas mulheres grandiosas e muito especiais em minha vida.

Ao professor e orientador Emídio Cantídio, por primeiramente ter acreditado no meu potencial e aceitado trabalhar junto comigo em uma pesquisa inovadora, e, em segundo por ter sido responsável pelos ensinamentos e realização deste trabalho.

Aos professores Josiclêda Domiciniano Galvêncio e Renato Lemos dos Santos pela co-orientação, apoio e atenção.

Ao amigo e Rodrigo de Queiroga Miranda por desempenhar um grande papel fundamental na realização deste trabalho.

Ao professor Emanuel Araujo por ser um e Pabrcício pelo apoio nas horas que mais precisei.

A professora Ana Dolores, Carolina Etienne e Rejane Pimentel por serem grandes amigas e conselheiras.

Toda a equipe UFRPE, em especial ao grupo GNAF que contribuíram para a execução deste trabalho com imensa dedicação: aos estagiários (as) Mõema, Henrique, Robson, Gustavo, Elton Araújo, Elton Galdêncio, Rodrigo, Marcones, Amanda, Andressa, Pedro, os alunos de pós-graduação Magda Flor, Abraão, Luan, Wildson, Ariane, à PNDP Elane e a todos que direta e indiretamente contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos colegas de Pós-graduação, pelos momentos de alegria e trocas de conhecimentos durante todo o nosso curso; em especial a Bruno, Jefrejan, Pablo, Rennan, Agostinho e Mariana.

Aos Amigos do dia-a-dia por está sempre me apoiando nas horas difíceis e alegres em especial a Eliabe, Adaías, Arthur, Abdías, Leonardo, Petrônio, Teylor, Marcone, Jameson, Deiverson e a todos mesmo não sendo mencionados, mas que contribuíram aos momentos de alegria e descontração.

Aos funcionários na UFRPE, em especial a Maria do socorro pela grande dedicação aos alunos do curso de pós-graduação em Ciência do solo desta instituição.

A UFRPE pela oportunidade de um curso digno de graduação em agronomia e pela oportunidade em ingressar no curso de pós-graduação.

A usina São José em nome do engenheiro agrônomo Antônio e do Técnico Sandro pela parceria em realizar o trabalho com grande apoio e dedicação.

A EECAC, representada por Djalma Simões Neto e o técnico Evanilson pela contribuição na pesquisa, até mesmo no fornecimento de insumos.

Ao laboratório de química do solo, representado pela professora Maria Betânia pela oportunidade de desempenhar minhas atividades laboratoriais e também a grandes amigos criados em especial Patrícia.

A CAPES pela concessão da bolsa.

Enfim, a todos que direta e indiretamente tornaram possível a concretização desta pesquisa, contribuindo assim na minha formação profissional.

Obrigado!

BIOGRAFIA

AUGUSTO CESAR DE ARRUDA SANTANA, filho de Lenivaldo Alves de Santana e Maria Aparecida de Arruda Santana, nasceu em 23 de agosto de 1991 no município de Timbaúba-PE, passando seus primeiros meses de vida na Usina Cruangi. Em seguida foi morar na Usina Santa Tereza do município de Goiana, Pernambuco, despertando assim o seu interesse agrícola.

Em 2007 iniciou o curso técnico em agropecuária, no Instituto Federal de Pernambuco (IFPE- *Campus* vitória de Santo Antão), concluindo em dezembro de 2009. Em Março de 2010 iniciou o curso superior em agronomia na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) no campus do Centro de Ciências Agrárias-CCA que é localizado no município de Areia. Em 2011 transferiu seu curso em agronomia para a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE-SEDE) e concluindo em 2014. Durante a graduação foi aluno bolsista do programa PIBIC pela FACEPE, trabalhando na linha de pesquisa de Microbiologia do solo dando ênfase na fixação biológica de nitrogênio e o uso de plantas leguminosas como adubos verdes.

Em março de 2015 ingressou no programa de Pós- graduação em Agronomia: Ciência do Solo, na UFRPE, atuando na área da fertilidade do solo e executando o trabalho voltado a adubação nitrogenada na cana-de-açúcar com ênfase na estimativa de teores de N nas folhas pela técnica da espectrorradiometria, que é uma base de apoio para os estudos com sensoriamento remoto.

Estimativa dos teores de nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da cana-de-açúcar por espectrorradiometria

RESUMO

Com o surgimento de novas tecnologias no setor agrícola foram proporcionados inúmeros avanços significativos, tanto na melhoria da produção dos cultivos quanto na eficiência da utilização dos insumos. Dentre essas tecnologia se destaca a técnica da espectrorradiometria que possibilita obter dados de refletâncias, que são influenciadas pelas condições biofísicas da vegetação. Por outro lado os pigmentos das folhas, as estruturas internas como as paredes celulares e conteúdo de água nas folhas, são influenciados, em grande parte, pelo conteúdo de N nos tecidos foliares, interferindo assim na absorção de energia e modificando a refletância, que pode ser detectada nos comprimentos de onda do visível, infravermelho próximo e médio, respectivamente. O N na cultura da cana-de-açúcar é considerado o segundo nutriente que mais é absorvido pela planta, superado apenas pelo K; sendo assim, manejo inadequado pode trazer mudanças no comportamento biofísico da planta até mesmo em redução da produtividade de colmos. Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento espectral da cana-de-açúcar para criação de novos índices que estimem o teor de N nas folhas diagnósticos, determinando o nível crítico para fins de análise nutricional, como também a produção de biomassa pelo efeito da contribuição da adubação nitrogenada. Para isso, em condições de campo, foram cultivadas duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) submetidas a sete doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹) em um delineamento em blocos casualizados com um arranjo fatorial (2x7) com 4 repetições. Aos 45, 90, 135, 235 e 300 dias após o plantio (DAP) foi avaliada a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), sendo que dos 45 até 235 dias foram avaliadas as medidas espectrais nas folhas diagnósticos (folha+1 e folha+3), por meio do espectrorradiômetro portátil com variação espectral de 350 a 2500 nm, como também foram quantificados os teores de N nas folhas diagnóstico. O teor de N não diferiu entres as folhas diagnósticos avaliadas, mas ambas apresentaram uma diluição ao decorrer do tempo com um efeito da interação tripla (dose x tempo x variedade), relacionando assim, com à produção de biomassa que foi influenciada pela adubação nitrogenada. A aplicação do N proporcionou também ganhos na produção de toneladas de colmos por hectare (TCH); sendo a dose de máxima eficiência econômica equivalente a 60 kg ha⁻¹ de N para ambas as variedades. Os teores de N nas folhas variaram de 3,31 a 1,28% e os comprimentos que melhor representou essa variação foram da banda do infravermelho médio, enquanto para a variação da biomassa foram da banda do visível. Os novos índices conseguiram explicar 71,8 e 88,8% das variações encontradas pelo teor de N nas folhas diagnóstico e na biomassa, respectivamente. Esses novos índices poderão ser utilizados como ferramentas para o sensoriamento remoto para contribuir em uma melhor avaliação nutricional da cultura da cana-de-açúcar com baixos custos e rapidez na obtenção dos resultados nutricionais.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Folha diagnóstico de N. Matéria seca da parte aérea. Medidas espectrais. Índice de vegetação. Avaliação nutricional.

Estimate of nitrogen contents in the diagnostic leaf and biomass of sugarcane by spectroradiometry

ABSTRACT

With the emergence of new technologies in the agricultural sector, a number of significant advances have been made, both in improving crop production and in the efficiency of input use. Among these technologies, the technique of spectroradiometry makes it possible to obtain data of reflectance, which are influenced by the biophysical conditions of the vegetation. On the other hand, leaf pigments, internal structures such as cell walls and leaf water content, are influenced in large part by the N content in the foliar tissues, thus interfering with the absorption of energy and modifying the reflectance, which can be detected at the wavelengths of the visible, near and medium infrared, respectively. The N in the sugarcane crop is considered the second nutrient that is absorbed more by the plant, surpassed only by the K; Thus, inadequate management can bring about changes in the biophysical behavior of the plant, even in the reduction of shoot yield. Thus, the objective of this research was to evaluate the spectral behavior of sugarcane to create new indices that estimate the N content in the diagnostic sheets, determining the critical level for nutritional analysis purposes, as well as the production of biomass by the Effect of nitrogen fertilization. For this purpose, two sugarcane varieties (RB92579 and RB867515) submitted to seven doses of N (0, 30, 60, 90, 120, 150 and 200 kg ha⁻¹) were grown under field conditions in one A randomized block design with a factorial arrangement (2x7) with 4 replicates. At 45, 90, 135, 235 and 300 days after planting (DAP) the aerial dry matter production (MSPA) was evaluated, and from 45 to 235 days the spectral measurements were evaluated on the leaflets And leaf + 3), by means of the portable spectroradiometer with spectral variation of 350 to 2500 nm, as well as the N contents in the diagnostic sheets were quantified. The N content did not differ between the diagnostic sheets evaluated, but both presented a dilution over time with a triple interaction effect (dose x time x variety), thus relating to the production of biomass that was influenced by nitrogen fertilization. The application of N also provided gains in the production of tons of stems per hectare (TCH); Being the dose of maximum economic efficiency equivalent to 60 kg ha⁻¹ for both varieties. The N contents in the leaves varied from 3.31 to 1.28% and the lengths that best represented this variation were of the average infrared band, while for the biomass variation were of the visible band. The new indexes were able to explain 71.8 and 88.8% of the variations found by the N content in the diagnostic sheets and in the biomass, respectively. These new indexes can be used as tools for remote sensing to contribute to a better nutritional evaluation of the sugarcane crop with low costs and fast results in obtaining nutritional results.

Keywords: *Saccharum* spp. N diagnosis leaf. Shoot dry matter. Spectral measure. Vegetation index. Nutritional assessment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	23
1.1 Hipóteses.....	24
1.2 Objetivo geral.....	24
1.3 Objetivos específicos.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 A cultura da cana-de-açúcar.....	27
2.2 O N e sua importância para a cultura da cana-de-açúcar.....	28
2.3 Análise nutricional de N em cana-de-açúcar.....	30
2.4 Agricultura de precisão e a técnica do sensoriamento remoto.....	32
2.5 Espectrorradiometria.....	32
REFERÊNCIAS.....	36
3 DINÂMICA DE N NA CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À ADUBAÇÃO NITROGENADA.....	43
Resumo.....	43
Abstract.....	44
3.1 Introdução.....	45
3.2 Material e Métodos.....	47
3.2.1 Descrição e caracterização da área experimental.....	47
3.2.2 Características químicas e físicas do solo em estudo.....	48
3.2.3 Descrição do ensaio experimental.....	49
3.2.4 Avaliação nutricional das folhas +1 e +3.....	49
3.2.5 Avaliação da Biomassa.....	50
3.2.6 Determinação da curva de diluição crítica de nitrogênio (CDCN).....	51
3.2.7 Avaliação da extração, exportação e a exigência nutricional de N em cana planta.....	52
3.2.8 Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos.....	52
3.2.9 Avaliação da dose máxima econômica da adubação nitrogenada em cana plant...53	
3.2.10 Análise estatística.....	53
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.3.1 Produção de matéria seca.....	54
3.3.1.1 Acúmulo e taxa de produção de matéria seca da parte aérea (MSPA).....	54
3.3.1.2 Produção de matéria seca no final do ciclo aos 315 DAP.....	56

3.3.2 Concentração de nitrogênio na cana-de-açúcar.....	59
3.3.2.1 Teor de N na folha diagnóstico.....	59
3.3.2.2 Curva de diluição do nitrogênio crítico.....	62
3.3.3 Extração, exportação e exigência do N da cultura da cana-de-açúcar.....	64
3.3.4 Produção agrícola e industrial.....	69
3.3.4.1 Produtividade agrícola, industrial e atributos tecnológicos.....	69
3.3.4.2 Avaliação da dose máxima econômica.....	72
3.4 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS.....	75
4 ESTIMATIVA DOS TEORES DE N NAS FOLHAS E DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO A TÉCNICA DA ESPECTRORRADIOMETRIA.....	81
Resumo.....	81
Abstract.....	82
4.1 Introdução.....	83
4.2 Material e Métodos.....	85
4.2.1 Descrição e caracterização da área experimental.....	85
4.2.2 Características químicas e físicas do solo em estudo.....	86
4.2.3 Descrição do ensaio experimental.....	87
4.2.4 Medidas espectrais na folha.....	87
4.2.5 Análises de nitrogênio nas folhas e Determinação da biomassa.....	88
4.2.6. Transformação do espectro.....	89
4.2.7 Criações de índices que estimem nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da planta.....	90
4.2.8 Validação dos índices.....	90
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4.3.1 Índice de nitrogênio para cana-de-açúcar.....	91
4.3.1.1 Seleção de comprimentos de onda sensíveis ao nitrogênio.....	91
4.3.1.2. Novos índices de nitrogênio em folha de cana-de-açúcar.....	93
4.3.1.3. Validação dos índices de nitrogênios.....	95
4.3.2. Índice de biomassa da cana-de-açúcar.....	97
4.3.2.1. Seleção de comprimentos sensíveis para a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA).....	97
4.3.2.2. Novos índices para biomassa da cana-de-açúcar.....	99

4.3.2.3. Validação dos novos índices para a biomassa da cana-de-açúcar.....	101
4.4 CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS.....	103
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
APÊNDICE A- Análise de variância (ANOVA) da produção de MSPA de duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada.....	112
APÊNDICE B- Espectrorradiômetro realizando leituras espectrais na folha diagnóstico da cana-de-açúcar.....	112

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados (açúcar e etano), no qual o torna uma referência internacional em tecnologias desses produtos. Desta forma a cultura da cana-de-açúcar representa uma importância socioeconômica e política para o país.

A produtividade nacional de cana-de-açúcar está estimada para a safra 2016/17 valores superiores a 76 Mg ha^{-1} ; já em relação ao estado de Pernambuco por ser o oitavo no ranking de maiores produtores do país, sua produtividade não ultrapassam os 54 Mg ha^{-1} . A baixa produtividade esta relacionada com o ambiente de cultivo, que leva em consideração as condições pluviométricas e a fertilidade do solo, que são fatores que contribuem para uma baixa nutrição mineral da cultura e que proporcionando assim uma baixa produtividade agrícola e industrial. Neste sentido, o melhor aproveitamento da adubação no início do ciclo pode garantir uma melhor nutrição mineral para a cultura e que favorecem para os ciclos subsequentes.

Na nutrição mineral da cana-de-açúcar, o nitrogênio por ser o segundo elemento mais absorvido pela cana-de-açúcar, superado apenas pelo potássio, possui um papel importantíssimo no crescimento e desenvolvimento da cultura, podendo limitar o crescimento e a produtividade dos canaviais. Sua extração vai depender do ciclo da cultura como também dos genótipos utilizados. No ciclo de cana planta o aproveitamento do nitrogênio, pela adubação nitrogenada, nas fases iniciais, não ultrapassam aos 30%, já em contrapartida o ciclo de cana soca o aproveitamento pode alcançar aos 56%, mostrando assim, que cana planta apresenta ser menos eficiente na absorção da adubação nitrogenada. No entanto, a redução da produtividade dos canaviais, no mesmo ciclo e em ciclos subsequentes, vem sendo observado sem o uso da adubação nitrogenada.

O estado nutricional da planta é o melhor indicativo da eficiência da adubação realizada na cultura; no sistema atual, o diagnóstico nutricional de N na cana-de-açúcar é realizado na fase inicial para que possa identificar deficiências e corrigi-las antes do máximo crescimento da planta. As análises para o diagnóstico nutricional correspondem ao levantamento da produção de biomassa durante o crescimento da cultura e também relacionado ao nível crítico dos teores de N nas folhas índices em resposta a adubação nitrogenada, nos quais permitem avaliar os efeitos da adubação minerais sobre as condições biofísicas da vegetação.

Dentre as técnicas de avaliação nutricional a espectrorradiometria, atualmente, está ganhando espaço em pesquisas, por está associada ao sensoriamento remoto que garante informações precisas e com rapidez em comparação com as técnicas tradicionais. A técnica da espectrorradiometria possibilita obter dados de refletância, que corresponde à radiação eletromagnética refletida após o contato com a superfície de um determinado objeto. A refletância é influenciada pelas condições biofísicas como, por exemplo, cor, formato e concentrações de determinado elemento químico do objeto alvo. Desta forma, os comportamentos espectrais podem trazer informações precisas da nutrição mineral de N na cana-de-açúcar com bases na produção de biomassa e no teor de N nas folhas diagnósticos.

1.1 Hipóteses

A presente pesquisa procurará avaliar as seguintes hipóteses: i) A eficiência da adubação nitrogenada em cana planta depende da região em estudo, sendo mais ou menos eficiente. ii) O conhecimento da dinâmica de N nas folhas diagnóstico e extraído pelos compartimento da cana-de-açúcar durante o ciclo de cana planta subsidiará de informações de pesquisa necessárias para compreensão da exigência nutricional em N para uma melhor eficácia no uso da adubação nitrogenada e garantindo assim, uma maior produtividade e longevidade dos ciclos subsequentes. iii) A diferença nos teores de N nas folhas diagnósticos e a produção de biomassa no decorrer no tempo afetam os comportamentos espectrais em diferentes comprimentos de ondas na cultura da cana-de-açúcar. Assim, a adubação nitrogenada em cana planta pode trazer mudanças biofísicas que podem ser detectadas pela técnica da espectrorradiometria, a qual identifica mudanças no comportamento espectral devido às mudanças no comportamento biofísico, assim são obtidas informações precisas para um melhor levantamento nutricional da cultura da cana-de-açúcar.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o comportamento espectral da cana-de-açúcar para criação de novos índices que estimem o teor de N nas folhas diagnósticos, determinando o nível crítico para fins de análise nutricional, como também a produção de biomassa pelo efeito da contribuição da adubação nitrogenada.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar a contribuição da adubação nitrogenada na nutrição nitrogenada da cana planta, a partir da identificação dos teores críticos de N que promovem maior produção de biomassa da parte aérea e produção agrícola e industrial;
- Avaliar o comportamento espectral da cana-de-açúcar em diferentes comprimentos de onda associados aos teores de N nas folhas diagnósticos como também na produção de biomassa;
- Criar novos índices que correlacionam com os teores de N nas folhas diagnósticos e produção de biomassa;
- Estimar os teores de N nas folhas diagnósticos e biomassa da cultura da cana-de-açúcar através de modelos matemáticos baseados nos novos índices de vegetação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma monocotiledônea pertencente à família das *Poaceae* e teve como sua origem na Ásia meridional, sendo trazida para o Brasil pelos colonizadores portugueses no ano de 1515. Possui seis espécies distintas, porém a *Saccharum officinarum* é a mais utilizada, com diversas variedades cultivadas no Brasil (DANIELS & ROACH, 1987; RIDESA, 2010).

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas com grande destaque na economia brasileira desde o início do século XVI (DIAS et al., 2015), sendo que o Brasil é o maior produtor mundial da cultura e de seus derivados, açúcar e álcool, tendo grande importância para o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro (MAPA, 2015).

Atualmente, a cana-de-açúcar ainda possui grande destaque com uma estimativa na safra 2016/17 de aproximadamente 9.110.900 hectares de área colhida, correspondendo a um aumento de 5,3% em relação à safra anterior (CONAB, 2016). De acordo com a Conab (2016) a produção na safra 2016/17 terá um acréscimo de 4,4% em relação à safra anterior que foi de 665,6 mil toneladas, sendo o estado do São Paulo, o maior produtor nacional, e o estado de Pernambuco em oitavo colocado, correspondendo a 1,9% de toda a produção de cana-de-açúcar do país.

Por ser uma cultura de grande impacto econômico, muitos centros de pesquisas em melhoramentos genéticos, vem desempenhando seleções de novas variedades em busca de melhor adaptação e maior produção da cana-de-açúcar nas condições ambientais diversas. As buscas de novos híbridos estão voltadas para maior resistência a pragas e doenças, elevadas produtividades, e bons indicadores de qualidade das variáveis tecnológicas, como: teor de fibra e açúcar recuperável da cana; pureza, sólidos solúveis, açúcares redutores, e percentagem de sacarose aparente no caldo (LIMA NETO et al., 2013).

Em 2015, 68% das variedades cultivadas no Brasil, eram da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro- RIDESA, das quais a RB867515 é a mais cultivada no centro sul do país equivalente a 27,3% de área plantada, sendo a segunda mais plantada em Pernambuco com e em Pernambuco esta

11,23% superada apenas pela variedade RB92579, que é a mais plantada no nordeste, correspondendo a 39,97% de área plantada (RIDESA, 2015).

Segundo o boletim varietal a variedade RB867515 teve sua criação iniciada no ano de 1986 em Minas Gerais, foi lançada comercialmente no ano de 1997 pela Universidade Federal de Viçosa (RIDESA, 2010). Tem como características morfológicas principais: crescimento ereto, com perfilhamento médio e colmos com entrenós cilíndricos, de cor verde-arroxeadada sob a palha, e roxo intenso sobre o sol. É uma variedade que apresentam melhor desempenho em solos de textura leve e fertilidade média. Sua produção agrícola e industrial superou as produtividades de outras variedades bastante importantes, obtendo em média 117,25 toneladas de colmos por hectare (TCH) e 17,57 toneladas de açúcar por hectare (TAH); tornando assim, uma variedade referência e a mais cultivada no sudeste brasileiro.

Em relação à variedade RB92579, seu surgimento ocorreu a partir do cruzamento biparental (RB75126 x RB72199) no ano de 1992 e foi lançada no estado de Alagoas pela Universidade Federal de Alagoas, atualmente é a variedade mais cultivada na região nordeste do país (RIDESA, 2015) e tem como características morfológicas: hábito de crescimento ereto com alto perfilhamento, colmos com entrenós cilíndricos de comprimento e diâmetro médio com cor roxa ao sol e amarelo verde sob a palha. Em relação às características agroindustriais, é uma variedade que possui crescimento lento, mas que tem uma alta produtividade agrícolas nas quatro primeiras folhas, um alto teor de açúcar total recuperável (ATR) e não possui restrição a ambientes para produção (RIDESA, 2010).

Neste sentido, observam-se maiores necessidades de pesquisas envolvidas com estes genótipos para garantir um melhor aproveitamento agrícola; sendo assim, o estado nutricional da cultura, principalmente em relação à absorção de N, torna-se uma prática de estudo indispensável; visto que, segundo Vitti et al., (2007) um manejo inadequado da adubação nitrogenada pode levar a redução da produção agrícola e industrial.

2.2 O N e sua importância para a cultura da cana-de-açúcar

O N é elemento mais abundante nas plantas, sendo menor apenas do que C, O e H e na cultura da cana-de-açúcar o nitrogênio (N) é o segundo nutriente mais absorvido, sendo superado apenas pelo K, extraindo em média 179 kg ha⁻¹ de N, que varia pelos diferentes genótipos (OLIVEIRA et al., 2010).

O estresse de N na cana-de-açúcar, mesmo que não apresente sintomas visuais, reduzirá a atividade da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPC) e com as baixas concentrações de N as atividades de assimilação do CO₂ são prejudicadas e conseqüentemente reduz à produção da parte aérea (MEINZER & ZHU, 1998; TRIVELIN et al., 2002).

Inúmeras discussões foram realizadas em relação a respostas da adubação nitrogenada na cana-planta, devido ao fato de que na maioria dos trabalhos realizados não foi possível obter respostas à adubação. Azeredo et al., (1986) observou que 80 % dos trabalhos envolvendo cana-planta e adubação nitrogenada, não obteve respostas positivas. A falta de respostas da cana-planta à adubação nitrogenada tem sido atribuída à fixação biológica de N atmosférico; às perdas por lixiviações de N-fertilizantes (FERGUSON et al., 2002; OLIVEIRA et al. 2001), que podem chegar a 22% das camadas superficiais até as subsuperficiais (GUIBERTO, et al., 2011); as condições climáticas; ao vigor do sistema radicular comparado com ao da soqueira e matéria orgânica presente no solo (CARNAÚBA, 1989; URQUIAGA et al., 1992; ORLANDO FILHO, et al., 1999).

No entanto, trabalhos realizados nos estados de Pernambuco e Paraíba demonstraram resposta linear na produção de colmos e no rendimento de açúcar em cana planta, com retornos econômicos na ordem de 09 a 16 toneladas de colmos por hectare, após adição 30 a 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, em três solos representativos dessas regiões (Oliveira, 2012). Na mesma pesquisa os teores de N nas folhas aumentaram linearmente com a adubação nitrogenada (Oliveira, 2012).

Para cana soca os ganhos líquidos com a adubação nitrogenada variaram de 2,5 a 8 TCH, com adubação que variou de 50 a 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente (Fortes et al., 2013); para ambos os casos se observou que o aumento da produtividade obteve relação positiva e linear com os teores de N nos tecidos da cana-de-açúcar.

Resposta linear positivamente a adubação nitrogenada, também foi encontrada por Bologna-Campebell (2007) que mostrou um aumento de 55% na produtividade com uma dose de 120 kg ha⁻¹ em um experimento conduzido em vaso.

Deste modo, a utilização de N em doses subestimadas reflete em baixa produtividade, por outro lado quando as doses são utilizadas em excesso promovem redução da concentração de açúcar e baixa eficiência industrial (Fortes et al., 2013).

Em relação à produção de matéria seca da parte aérea o N promovem efeitos positivos e se torna um fator limitante na produção, pelo fato de que o N está presente

em diversas composições de biomoléculas que garante a formação dos tecidos das plantas, tais como ATP, NADH, NAPH, clorofilas, proteínas e enzimas (MIFLIN & LEA, 1976; HARPER, 1994; BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000).

Pesquisa realizada por Santos (2014) observou respostas positivas na produção de biomassa em relação à aplicação de fertilizante nitrogenado. Segundo o autor, ao utilizar duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) com aplicação de diferentes doses de N e Mo; observou, de maneira geral, que as variedades produziram em maior quantidade de matéria seca da parte aérea (MSPA) quando se aplicou doses crescentes de N, chegando a ganhos de 10 a 53%. De modo semelhante, Oliveira et al., (2013) e Otto et al, (2009) observaram efeitos positivos na produção de matéria seca em relação a adubação nitrogenada, com dose crescente até 120 kg ha⁻¹, em diferentes tipos de solos.

Quando se leva em consideração concentrações de N nas folhas denominadas folhas +1 e folha+3 podem ser utilizadas como fontes de informações para o levantamento nutricional de N na cultura da cana-de-açúcar como proposto por e Raij & Cantarella (1997) e Malavolta (1992). Franco et al., (2010) observou efeito da diluição do N nas folhas +1 em relação a aplicação de doses crescente de N para efeito na produção de biomassa com concentração média de 19 g kg⁻¹, valores este que condiz com recomendação proposta por Raij & Cantarella (1997) que corresponde a 18 -25 g kg⁻¹ e que implica na diluição do elemento para fins da produção da parte aérea da cultura.

2.3 Análise nutricional de N em cana-de-açúcar

O estado nutricional da planta é o melhor indicativo da eficiência da adubação realizada da cultura; no sistema de produção atual, o diagnóstico nutricional de N na cana-de-açúcar é realizado na fase inicial de crescimento, de modo que a deficiência possa ser corrigida antes da fase de máximo crescimento vegetativo (Oliveira et al, 2013).

A análise de crescimento da cana-de-açúcar em respostas a adubação nitrogenada permite avaliar os efeitos da adubação mineral em relação, principalmente, na produção de matéria seca da parte aérea, que pode ser avaliadas por meio de avaliações sequenciais do acúmulo de fitomassa ou de índices fisiológicos dela obtidos (GAVA et al., 2001).

Amostragem de folhas proposta por Raij & Cantarella (1997) e Malavolta (1992) correspondendo à folha+1 e a folha+ 3, respectivamente, podem trazer informações bases para um diagnóstico nutricional para a cana-de-açúcar. Por outro lado, o diagnóstico nutricional também é baseado na alocação do N pelas partes aéreas da cultura que não mais retornarão (colmos), podendo estimar o N exportado, e, conseqüentemente, a quantidade que deverá ser adicionada para suprir a necessidades no ciclo posterior (OLIVEIRA et al., 2010).

Oliveira et al., (2010), a extração de N pela parte aérea de diferentes variedades, pode concluir que a exigência em N difere entre os genótipos utilizados e relação as variedades RB867515 e RB92579 as exigências corresponderam a 1,27 e 1,02 kg Mg⁻¹, respectivamente. Valores na faixa de 0,8 a 1,5 kg t⁻¹ são considerados como bons indicadores na avaliação na demanda de N pela cana planta na obtenção de elevadas produções (Franco et al., 2010).

Na maioria das análises realizadas no nordeste para determinação da nutrição de N na cana-de-açúcar, utiliza a metodologia de Kjeldahl, correspondendo a uma digestão sulfúrica, destilação com auxílio do hidróxido de sódio (NaOH) e titulação com ácido clorídrico (HCl) a 0,01 mol (EMBRAPA, 2009) e para determinar o teor de N (g kg⁻¹).

A amostragem das folhas e de outras partes aéreas da cana-de-açúcar em locais representativos, o pré-tratamento, o transporte do material vegetal para o laboratório, a própria análise e o retorno e interpretação dos resultados, são processos demorados, que em muitos casos, impossibilita a correção no mesmo ciclo de produção, além de ser dispendioso.

Com isso, novas alternativas atualmente vêm ganhando espaço para analisar a nutrição mineral das culturas, sem ter a necessidade da degradação das amostras, garantindo também uma rapidez e segurança nos resultados obtidos.

Minolta (1989) ao criar um equipamento denominado SPAD-502 como medidor indireto de clorofila, pode proporcionar a utilização do equipamento (clorofilômetro) por diversas culturas e com resultados satisfatórios da diagnose nutricional de N. Argenta et al., (2001) utilizando a cultura do milho, mostrou uma grande capacidade de estimar com precisão os conteúdos de clorofilas (total, a e b) com o coeficiente de correlação variando de 0,83 a 0,98, de 0,80 a 0,97, e de 0,72 a 0,98, respectivamente, sendo encontrado também correlações consideravelmente boas com o conteúdo de N nas folhas chegando a uma precisão de que variaram de 0,66 a 0,9. Outra técnica inovadora que pode ser utilizadas com fins de diagnose nutricional das culturas é a

técnica sensoramento remoto que tem como base a espectrorradiometria com potencial elevado para a agricultura de precisão.

2.4 Agricultura de precisão e a técnica do sensoramento remoto

A agricultura de precisão (AP) consiste em um conjunto de técnicas que visam otimização dos manejos agrícolas, melhorando a eficácia de uso dos insumos e garantindo uma maior eficiência agrônômica (LAMPARELLI, 2016; MOLIN, 2009; PIERCE & NOWAK, 1999).

Técnicas de sensoramento remoto (SR) são largamente utilizadas na AP, que consistem em adquirir informações de um objeto (valores espectrais) utilizando ferramentas que não entram em contato com o mesmo (COELHO, 2005); esses objetos são sensores instalados em diferentes equipamentos, como: satélites artificiais em aviões, ou em plataformas orbitais, ou, sensores portáteis usados em trabalho de campo como é o caso do espectrorradiômetro e entre outros (RICHARDS e JIA, 2006).

Várias aplicações podem ser abordadas por meio do sensoramento remoto, dentre elas, se destacam: estimativa da biomassa em diferentes culturas, produtividade agrícola, avaliação nutricional do estresse hídrico e o vigor das plantas que podem estar correlacionado ao levantamento de pragas e doenças (BRANDÃO, 2009).

As variações biofísicas da vegetação podem ser observadas, no sensoramento remoto, em mudanças no comportamento espectral, captadas por espectrorradiometria em campo ou até mesmo em laboratório através de imagens multiespectrais.

2.5 Espectrorradiometria

A técnica da espectrorradiometria possibilita obter dados de refletância, que corresponde à radiação eletromagnética refletida após o contato com a superfície de um determinado objeto (Silva et al., 2012). A refletância é influenciada pelas condições biofísicas como, por exemplo, cor, formato e concentrações de determinado elemento químico do objeto alvo (Tian et al., 2011; Abdel- Rahman et al., 2010).

Nas plantas, a refletância é determinada principalmente nas folhas, sendo encontrada em diferentes bandas espectrais, as quais correspondem ao: visível, infravermelho próximo e o infravermelho médio.

Em relação às bandas espectrais da região do visível, que corresponde ao intervalo de comprimento de onda do 350–710 nm, essa influenciada por pigmentos nas folhas, como a clorofila, carotenoides e xantofilas que absorvem mais energia e consequentemente refletem menos nessa banda espectral. A região do infravermelho próximo (720-1.100 nm) possui um alto valor de energia refletida, devido a uma baixa absorção e uma maior distribuição interna da radiação na folha, pelo fato de que há uma interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo e constituinte foliares. Por último, na região do infravermelho médio (1.100-3.200 nm) é influenciada pela quantidade de água nas folhas, proteínas, celulose, hemicelulos e lignina (DEMATTE et al., 2004; PONZONI & SHIMABUKURO, 2009; TIAN et al., 2011).

Determinar a radiação refletida pelas folhas em diferentes bandas espectrais possibilita identificar informações precisas sobre as características de dossel, espessura das folhas e buscar relações com o estado de teor da água e nutrientes na planta (AHAMED, et al., 2011).

Vários trabalhos realizados na agricultura utilizam a técnica da espectrorradiometria juntamente com o sensoriamento remoto para diferentes fins, desde as diferentes características vegetais como também caracterização de solos. Demattê, et al., (2004) verificou que os componentes do solo (matéria orgânica, ferro, silte, areia, minerais como quartizo, magnetita, caulinita e esmectita) foram características mais importante para diferenciar valores espectrais e índices, caracterizando e discriminando os solos em estudo.

Estudos fitopatológicos também utilizam a técnica para poder verificar o estado da sanidade das culturas como, por exemplo, segundo Santos Júnior, et al., (2001) o uso da técnica da espectrorradiometria permitiu assumir que a presença de nematoides (*H. glycines*), em reboleira de soja, influenciou a resposta espectral e assim possibilitando um manejo mais preciso do controle de doenças e pragas para a cultura.

A produção de biomassa das culturas promove diferentes comportamentos espectrais como foi visto por Yuan & Zhang (2007) que observou uma diminuição da refletância de forma ordenada promovida pela diminuição da biomassa, principalmente no comprimento de onda do 570 nm. Outras variáveis da planta também afetam a resposta espectral, como exemplo dos teores de N. Na cultura da grama batatais (*Paspalum. notatum*) a quantidade de biomassa do dossel, após aplicação de diferentes níveis de adubação nitrogenada, afetou diretamente a refletância (Fonseca, et al., 2002).

Na literatura existe comprimento de onda que possui influência direta com componentes químicos da planta. No caso do nitrogênio os comprimentos conhecidos são: 570, 700-750, 1690, 1730, 2060, 2130, 2180, 2240, 2300 e 2350 nm (CURRAN, 1989; KUMAR et al., 2001; PEÑUELAS et al., 1994).

Pesquisa realizada por Mutanga et al., (2004) utilizando duas transformações espectrais (primeira derivada e remoção do contínuo) e cinco espécies de gramínea, incluindo o capim colonial, também obtiveram melhores correlação com o N em três faixas, nas quais foram: faixas com comprimentos no visível juntamente com infravermelho próximo (R550-750nm) e infravermelho médio respondendo aos comprimentos de onda (R1634-1786 e R2006-2196 nm).

O nitrogênio por ser um dos constituintes da clorofila (RAMBO et al., 2004), a sua deficiência impedirá a formação das organelas que conseqüentemente afetará o comportamento espectral na faixa do visível que está relacionado com os pigmentos das folhas (ASNER, 2008). As estruturas internas das folhas é um fator da influência da quantidade de energia refletida pelas plantas no comprimento de onda do infravermelho próximo, isso ocorre devido à influência da relação interfaces ar-água-células, tamanhos de células e organelas (GRANT, 1987; KNIPLING, 1970), espessura das camadas de celulares (BLACKBUM, 1999) ou até mesmo a relação entre a razão da superfície do mesófilo e a área foliar como foi encontrado por Slantion et al., (2001) utilizando 48 espécies.

Quando se leva em consideração as mudanças espectrais na faixa de comprimento de onda do infravermelho médio, que está ligado principalmente com conteúdo de água na folha, o N possui também influências nas mudanças espectrais nesta faixa, juntamente com açúcares, proteínas, celulose, hemicelulos e lignina (CURRAN, 1989).

Para a produção de matéria seca da parte aérea ou simplesmente a biomassa os comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo, os quais formam o índice intitulado como NDVI, por exemplo, responde bem as mudanças físicas da vegetação (GROHS, et al., 2009; BREDEMEIER, et al., 2013).

A partir desses dados da espectrorradiometria, é possível desenvolver índices para avaliações biofísicas da vegetação (ROSSATO et al., 2012). Esses índices de vegetação podem ser definidos como funções matemáticas entre duas ou mais bandas espectrais agrupadas que realçam o comportamento espectral da vegetação e correlacionam-se com os parâmetros biofísicos da vegetação; sendo eles mais sensíveis

do que as bandas individuais, quando relacionados aos parâmetros (EPIPHANIO, et al., 1996). Dentre inúmeros índices de vegetação, o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é o mais utilizado pelos estudos agrícolas (ESTEVES et al., 2012).

O NDVI é um índice de vegetação muito sensível às condições biofísicas da vegetação; é dado pela normalização entre a diferença do comprimento de onda do infravermelho próximo menos o comprimento de onda do vermelho, sobre os somatórios desses dois comprimentos. Este índice vem sendo utilizado, na grande maioria dos estudos, para avaliar e estimar a biomassa e o estágio de desenvolvimento da planta (GROHS, et al., 2009; BREDEMEIER, et al., 2013), avaliação do estado nutricional (ABDEL-RAHMAN et al., 2010), bem como para prever a produtividade das culturas (MA et al., 2001; MOLIN, et al., 2010; PICOLI, et al., 2009); sua equação é descrita com:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}})$$

Onde: ρ_{IVP} . refere-se a valor de refletância do infravermelho próximo

ρ_{V} . refere-se a valor de refletâncias do vermelho

O NDVI pode ser obtido no sensoriamento remoto a partir de imagens e sensores acoplados a satélites orbitais ou veículos aéreos remotamente tripulados. As imagens obtidas possuem valores brutos em pixels que podem ser convertidas em valores físicos, como a refletância e radiância, utilizando-se de programa que processam as imagens, como o Erdas Imagine e o Arc Gis (ESTEVES et al., 2012).

Outros novos índices com razões e normalizações foram criados utilizando transformação da primeira derivada e remoção do contínuo das refletâncias brutas para determinar a concentração de N nas folhas dos cultivos. Tian, et al., (2011) ao estudar variações espectrais em folha de arroz, encontrou quinze novos modelos, no qual o que mais obteve melhores resposta à variação da concentração de N, que correspondeu a um coeficiente de determinação (r^2) de 0,84 utilizando comprimentos correspondente a faixa espectral do azul ($R_{434} / (R_{496} + R_{401})$). Já estudo realizado por Abdel-Rahman et al. (2010) utilizando adubação nitrogenada em cana-de-açúcar e avaliando o seu comportamento espectral obtiveram modelos que estimaram positivamente a variação da concentração de N (%) nas folhas com r^2 de 0,71; neste novo índice para o N da cana-de-açúcar correspondeu a uma razão simples com comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio (R_{743} / R_{1316}).

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F. B.; BERG, M. V. D. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, p.52–57, 2010.
- AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K.C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass e Bioenergy**, Oxford, v.35, p. 2455-2469, 2011.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia vegetal**, Campinas v.13, n.2, p. 158-167, 2001.
- Asner, G.P. **Hyperspectral remote sensing of canopy chemistry, physiology, and biodiversity in tropical rainforests**. In: Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G.A. (Eds.), *Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests*. Taylor and Francis Publishers, London, UK, p. 261–296, 2008.
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBWE, H. & VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta - doses e fracionamento. **STAB**, Piracicaba 4:25-29, 1986.
- BLACKBUM, G.A. Relationship between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of Deciduous Broadleaves. **Remote Sensing Environment**, New Yourk, v.70, p. 224-27, 1999.
- BOLONGA-CAMPELL. **Balanco do nitrogênio e enxofre no sistema solocana-de-açúcar no ciclo de cana planta**. 2007. 112 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BRANDÃO, Z.N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Regulation of nitrogen as absorption and assimilation in plants. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.2, p. 365-372, 2000.
- 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**, Santa Maria, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.
- Cana-de-açúcar**. MAPA, Ministério da Agricultura. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acessado em: 21/01/2017

CARNAÚBA, B.A.A. **Eficiência de utilização e efeito residual de uréia-15N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), em condições de campo.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1989. 193p. (Tese de Mestrado)

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17.** v. 3, 65p, 2016.

COELHO, A. M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas.** Sete lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 60, 2005.

CURRAN, P. J. Remote Sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 30, p. 271-278, 1989.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: Heinz, D.J.(Ed.) Sugarcane improvement through breeding. Amsterdam: Elsevier. Cap. 2, 1987. p. 7-84.

DEMATTÊ, J. A. M.; GAMA, M.A.P.; COOPER, M.; ARAÚJO, J.C.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 187-200, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R.; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p. 95-112, 2004.

DIAS, M.O.S.; MACIEL FILHO, R.; MANTELATO, P.E.; CAVALETT, O.; ROSSELL, C.E.V.; BONOMI, A.; LEAL, M.R.L.V. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, Amsterdam, v.15, p. 35-51, 2015.

EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da agricultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

ESTEVES, B. S.; SOUSA, E.F.; MENDONÇA, J.C.; LOUSADA, L.L.; MUNIZ, R.A.; SILVA, R.M. Variação do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo de cana-de-açúcar no Nordeste Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, p. 663-670, 2012.

FERGUSON, R.B.; HERGET, G.W.; SCHEPERS, J.S.; GOTWAY, C.A.; CAHONN, J.E.; PETERSON, T.A. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: yield and soil residual nitrate effects. **Soil Science Society of American Journal**. Madison, v.66, p.544–553, 2002.

FONSECA, E.L.; ROSA, L.M.G.; FONTANA, D.C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p.365-371, 2002.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, p.88-96, 2013.

- FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.5, p. 579-590, 2010.
- GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.11, p. 1347-1354, 2001.
- GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen fertilizer leaching in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.68, n.1, p.86-93, 2011.
- GRANT, L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.22, p.309-322, 1987.
- GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTI, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p. 101-112, 2009.
- HARPER, J.E. Nitrogen metabolism. In: BOOTE, K.J., BENNETT, J.M., SINCLAIR, T.R., *et al.* **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1994. Chapt.11A, p.285-302.
- KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.1, p. 155-159, 1970.
- KUMAR, L.; SCHIMIDT, K.S.; DURY, S.; SKIDMORE, A.K. Imaging spectrometry and vegetation science. In: VAN DER MEER, F. & JONG, S.M. **Imaging spectrometry**. Dordrecht. The Netherlands: **Kluwer Academic Publishing**, p. 111-155, 2001.
- LAMPARELLI, R. A. C. Agricultura de precisão Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2016. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_72_7_711200516719.html>. Acesso em: 19 jan. 2017.
- LIMA NETO, J.F.; DUTRA FILHO, J.A.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, A.E.P.; SILVA, L.J.; FERREIRA, G.E. Avaliação agroindustrial e parâmetros genéticos de clones UFRPE de cana-de-açúcar no litoral norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, Recife, v.18, n.1, p. 8-13, 2013.
- MA, B.L.; DWYER, L. M.; COSTA, C.; COBER, E. R.; MORRISON, M.J. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.1227-1234, 2001.
- MALAVOLTA, E. ABC da análise de solo e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: **Ceres**, 1992.

MEINZER, F.C. & ZHU, J. Nitrogen stress reduces the efficiency of the C4 CO₂ concentrating system, and therefore quantum yield, in *Saccharum* (sugarcane) species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, 49:1227-1234, 1998.

MIFLIN, B.J., LEA, P.J. The pathway of nitrogen assimilation in plants. **Phytochemistry**, New York, v.15, p.873-885, 1976.

MINOLTA. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka:Minolta, 1989. 22p.
OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar**. Recife, 2012. 97p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília: MAPA, ACS, 2009. Encarte Técnico.

MOLIN, J. P.; FRASSON, F. R.; AMARAL, L. R.; POVH, F.P.; SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a respostas da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n.12, p.1345-1349, 2010.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K.; PRINS, H.H.T. Predicting in situ pasture quality in the kruger national park, South Africa, using continuum-removed absorption features. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.89, p. 394-408, 2004.

OLIVEIRA, E.C.A.; GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Plant Nutrition Soil Science**, Lauda, n.176,p. 712–723, 2013.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; FREIRE, M.B.G.S.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, S.A.M. Extração e exportação de nutrientes por variedade de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.34, p. 1343-1352, 2010.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Nitrateleaching in a sewage-sludge-amended Typic Hapludox cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, p.171–180, 2001.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A. & LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, 17: 39-41, 1999.

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

RAIJ, B.van & CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.van & CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. eds. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Fundação IAC, 1997. p.233-243. (Boletim,100).

- PEÑUELAS, J.; GAMON, J.A.; FREDEEN, A.L.; MERINO, J.; FIELD, C.B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 48, p.135-146, 1994.
- PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índices de vegetação do sensor modis na estimativa da produtividade de agricultura de agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p. 789- 795, 2009.
- PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p.1-85, 1999.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Ed., São José dos Campos-SP, 128p, 2010.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; BAYER, C. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.1279-1287, 2004.
- RICHARDS, J.A., JIA, X. 2006. Remote sensing digital image analysis. 4ª Edição. Springer, Alemanha. 449p.
- REDE INTERUNIVERSITÁRIA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO- RIDESA. Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar. **RIDESA**, Curitiba, 136p. 2010.
- REDE INTERUNIVERSITÁRIA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO- RIDESA. Liberação nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar. **RIDESA**, Curitiba, 72p. 2015.
- ROSSATO, O.B.; ANDRÉ- SANCHEZ, P.; GUERRA, S.P.S.; CRUSCIOL, C.A.C. Sensores de reflectância e fluorescência na avaliação de teores de nitrogênio, produção de biomassa e produtividade do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.8, p.1133-1141, 2012.
- SANTOS JÚNIOR, R. F. S. et al. Detecção de *Heterodera glycines* em plantio de soja mediante espectrorradiometria no visível e infravermelho próximo. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 27, n.4, p. 355- 360, 2002.
- SANTOS, R.L. **Molibdênio no metabolismo e na fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar**. Recife: UFRPE, 2014. p.135. Tese (Doutorado)- Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- SLANTION, M.R.; HUNT JR., E.R.; SMITH, W.K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, Saint Louis, v.88, n.2, p. 278-284, 2001.

SILVA, E. A.; MARANGON, G.P.; DESSBESELL, L.; MORAIS, W.W.; LIPPERT, B.D.; PEREIRA, R.S. Caracterização espacial na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, V. 42, n. 2, p. 285-292, 2012.

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; RAIJ, B. van.; SILVA, C. A. ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; PÉREZ, D. V.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; ABREU, M. F.; BARRETO, W. O. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. In: SILVA, F. C. (Org). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 2009. p.75-169. (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia).

TIAN, Y.C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.X.; HANNAWAY, D.B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.120, p. 299–310, 2011.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solos arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 26: 637-646, 2002.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S. & BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: nitrogen-15 and nitrogen balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 56:105-114, 1992.

VITTI et al 2007: VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. de C.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n. 2, p. 249-256, 2007.

YUAN, L.; ZHANG, L. The spectral responses of a submerged plant *Vallisneria spiralis* with varying biomass using spectroradiometer. **Hydrobiologia**, The Hague, v. 579, p. 291-299, 2007.

3 Dinâmica de N na cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada

RESUMO

A eficiência da adubação nitrogenada em cana planta vem mostrando respostas positivas nos canaviais nordestinos, ao observar incrementos na produtividade agrícola e industrial. A resposta à adubação está relacionada com os teores críticos de N nos componentes da parte aérea da planta em relação à produção de fitomassa e produtividade. Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a contribuição da adubação nitrogenada na nutrição nitrogenada da cana planta, a partir da identificação dos teores críticos de N que promoveram maior produção de biomassa da parte aérea e produção agrícola e industrial. Para isso, em condições de campo, foram cultivadas duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) adubadas com sete doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹). Os tratamentos foram distribuídos em blocos, sob arranjo fatorial (2x7) com 4 repetições. Os teores críticos de N na folha diagnóstico durante o crescimento da cana planta foram estimados a partir do ajuste matemático exponencial, obtido a partir da relação entre a massa seca da parte aérea (MSPA) e o teor de N na folha diagnóstico (folha+1). A produção da MSPA foi submetida ao ajuste sigmoidal, o que tornou possível identificar as fases de crescimento e produção de matéria seca da cana planta sob os diferentes níveis da adubação nitrogenada. A produtividade de colmos (TCH), açúcar (TAH) e qualidade tecnológica da cana planta adubada com N foi avaliada no final do ciclo vegetativo, aos 330 dias, utilizando colos industrializáveis colhidos na área útil das parcelas experimentais. A produção de biomassa, teor de N nas folhas e TCH foram influenciados positivamente pela adubação nitrogenada. Os teores de nitrogênio nas folhas, apresentaram decréscimos, em decorrer do tempo, em torno da ordem de 43,08 a 60,7% para a variedade RB92579, e, em torno de 33,42 a 72,97% do N para a variedade RB867515. Para a produção de MSPA, a adubação nitrogenada gerou ganhos, em média, na ordem de 27,25% em relação à dose 0 kg ha⁻¹. O nível crítico de N, aos 135 DAP, nas folhas diagnósticos, foram inferiores a 16 g kg⁻¹ apresentando uma melhor produção de MSPA. A dose de máxima eficiência econômica em relação à produção agrícola e industrial foi de 60 kg ha⁻¹. A aplicação de diferentes doses de N influenciou nos teores de N nas folhas, como também na produção de MSPA e produção agrícola e industrial em cana-planta, tornando possível sugerir que para análise nutricional da cana-de-açúcar a folha diagnóstico pode ser levada em consideração como padrão de levantamento nutricional.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Nitrogênio. Folha diagnóstico. Matéria seca da parte aérea. Extração de N.

3 N dynamics in sugar cane related to nitrogen fertilization

ABSTRACT

The efficiency of nitrogen fertilization in cane plant has been showing positive responses in the northeastern sugarcane plantations, when observing increases in agricultural and industrial productivity. The response to fertilization is related to the critical N content in the components of the aerial part of the plant in relation to phytomass production and productivity. Thus, the objective of this research was to evaluate the contribution of nitrogen fertilization in the nitrogenous nutrition of the cane plant, from the identification of the critical N contents that promoted greater biomass production of aerial part and agricultural and industrial production. For this, two sugarcane varieties (RB92579 and RB867515) were grown under seven field conditions (0, 30, 60, 90, 120, 150 and 200 kg ha⁻¹). The treatments were distributed in blocks, under factorial arrangement (2x7) with 4 replicates. The critical contents of N in the diagnostic leaf during plant growth were estimated from the exponential mathematical adjustment obtained from the relation between the aerial dry mass (MSPA) and the N content in the diagnostic leaf (leaf + 1). The MSPA production was submitted to the sigmoidal adjustment, which made it possible to identify the stages of growth and dry matter production of the cane plant under different levels of nitrogen fertilization. The yield of stalks (TCH), sugar (TAH) and technological quality of the sugarcane planted with N were evaluated at the end of the vegetative cycle, at 330 days, using industrializable coles harvested in the useful area of the experimental plots. The biomass production, N content in the leaves and TCH were positively influenced by nitrogen fertilization. Nitrogen levels in the leaves decreased over the period from 43.08 to 60.7% for the variety RB92579, and from 33.42 to 72.97% of the N for the Variety RB867515. For the production of MSPA, the nitrogen fertilization generated gains, on average, in the order of 27.25% in relation to the dose 0 kg ha⁻¹. The critical level of N, at 135 DAP, in the diagnostic sheets, was lower than 16 g kg⁻¹ presenting a better production of MSPA. The dose of maximum economic efficiency in relation to agricultural and industrial production was 60 kg ha⁻¹. The application of different doses of N influenced the N contents in the leaves, as well as in the production of MSPA and agricultural and industrial production in cane-plant, making it possible to suggest that for nutritional analysis of sugarcane the diagnostic leaf can be taken in consideration as a nutritional survey standard.

Keywords: *Saccharum* spp. Nitrogen. Diagnostic leaf. Shoot dry matter. N extraction.

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e na safra 2016/2017 apresentou aumento 5,3% da área plantada (CONAB, 2016). Entre as regiões produtoras, o Nordeste apresenta a terceira maior área plantada, contribuindo com 6,8 % na produção nacional da cana-de-açúcar. Nessa região, a produtividade média foi em média 51,9 toneladas de colmos por hectare (TCH), se mostrando abaixo do potencial genético das variedades atualmente utilizadas, que estimam valores em torno de 300 Mg ha⁻¹ (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008).

A disponibilidade hídrica e a nutrição mineral são os fatores que limitam a produtividade da cana-de-açúcar. No tocante a nutrição mineral, o suprimento inadequado de N é limitante e reduz a produtividade da cana planta de 6 a 25% como encontrado por Franco et al., (2010) e Trivelin et al. (2002), respectivamente; podendo reduzir, também, a longevidade do canavial (VITTI et al., 2007).

O aproveitamento N-fertilizante pela planta raramente excede 50% do nutriente aplicado (Fortes et al., 2013), devido que boa parte do N é perdido para o ambiente, como é o caso do processo de lixiviação que pode chegara até 22% do N total aplicado (GUIBERTO, et al., 2011). Franco et al. (2011) ao utilizarem a técnica com isótopo ¹⁵N na cana-de-açúcar, observaram que o aproveitamento do N-fertilizante entre o início e final do ciclo da cultura, foi de 30 a 9 % na cana planta e de 56 a 21% na cana soca, respectivamente. Em virtude disto, o ciclo da cana planta demonstra ser menos eficientes na utilização da adubação nitrogenada em comparação com a eficiência da cana soca que mostrou rendimentos na produção de colmos a uma diferença de 100 a 50% da maior dose aplicada em comparação a testemunha (0 kg ha⁻¹) na 2^a e 3^a soca, respectivamente (Vitti et al., 2007). Fortes et al. (2013) observou ganhos líquidos, em cana soca com aplicação da adubação nitrogenada, de 2,5 e 8 TCH, utilizando 50 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente; já em relação aos ganhos da adubação nitrogenada em cana planta são baixos e muitas vezes não apresentam efeito da adubação.

A resposta da adubação nitrogenada na cana planta é controversa e a pesquisa tem mostrado resultados inconsistentes, o que pode depender da variedade utilizada e do ambiente da produção. Azeredo et al. (1986), ao avaliar em diferentes regiões do país e com variedades não mais cultivadas, observaram que 80 % dos resultados que envolveram cana planta, não obteve repostas a adubação nitrogenada. Em estudo mais recente, na mesma região, Fortes et al. (2013) observaram incrementos na produtividade

da cana planta até a dose de 110 kg ha⁻¹ de N, com a utilização de variedades mais produtivas e mais exigentes em N. Além do fator variedade, o ambiente de produção também pode ser decisivo para se obter resposta a adubação nitrogenada. Oliveira (2012) observou incremento linear até 120 kg ha⁻¹ de N na cana planta cultivada região canavieira de Pernambuco e Paraíba, ao utilizar variedade exigente em N e ambiente com maior restrição hídrica.

A resposta à adubação nitrogenada está relacionada com a capacidade em que o ambiente de produção possui em atender a exigência de N da cana-de-açúcar, seja no ciclo de cana planta ou cana soca. No ciclo de cana planta, Oliveira et al. (2013) observou que a adubação nitrogenada aumentou a produção de matéria seca da parte aérea e modificou os teores de N nos tecidos das folhas, sendo estabelecido o teor de 19,7 g kg⁻¹ de N como crítico para se obter as maiores produtividades.

O teor de N nas folhas é resultante da interação de diversos fatores, entre eles, a disponibilidade de N oriundo na mineralização da matéria orgânica e a fertilidade nitrogenada, que podem trazer variações nos teores desde deficientes a excessivos, ou até mesmo tóxicos (OLIVEIRA et al. 2013). Em condições adequadas no suprimento de N, a quantidade dos teores armazenados na folha, é considerada não linear, em relação à produção de fitomassa (GASTAL; LEMAIRE, 2002). Esta relação de maior teor de N nas folhas diagnósticos em contrapartida com baixos aproveitamentos deste N para a produção de fitomassa leva à necessidade de identificar teores críticos que não sejam limitantes a produção.

A cana-de-açúcar por ser uma cultura semiperene e permanece no campo por mais de cinco anos, assim a identificação e manutenção dos teores críticos de N nos tecidos da planta em todos os ciclos forma canaviais mais produtivos e com maior longevidade. A adubação nitrogenada na cana planta não deve ser vista apenas para o primeiro ciclo de produção, mas para todo período de produção do canavial. Visto que, trabalho realizado por Trivelin et al. (2002) ao utilizar adubação nitrogenada em cana planta, observou resposta da adubação na produção de colmos e rendimento de açúcar; no entanto, foi possível também contribuir no crescimento das raízes e no estoque do N no sistema radicular. Efeito este que também foi encontrado em pesquisa realizada por Otto et al. (2009), garantindo assim, uma maior reserva nutricional em N para futuras socarias.

O efeito residual da adubação nitrogenada em cana planta pode refletir intensamente para as futuras socarias com ganhos que chegam à ordem de 20 e 35%

quando aplicados 60 e 120 kg ha⁻¹ (Orlando Filho et al., 1999; Vitti et al., 2007). Fortes et al. (2013) observou, além do efeito linear positivo em cana planta, efeitos subsequentes na produção de tonelada de colmos por hectare (TCH) e açúcar por hectare (TAH), chegando a manter a produtividade em quatro ciclos consecutivos, que por vez, foi influenciadas pela aplicação da adubação nitrogenada em fundo de sulco do plantio. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a contribuição da adubação nitrogenada na modificação dos teores de N nas folhas diagnóstico e sua relação com a produção de biomassa da parte aérea, produção agrícola e industrial da cana planta.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em condições de campo, na área agrícola da Usina São José S/A, localizada no município de Abreu e Lima (Latitude 7°49'09,61" S e Longitude 35°04'11,14" W) região do litoral norte do Estado de Pernambuco, com uma altitude de 128 m. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo (ARAUJO FILHO et al., 2000) e Typic Kandiudox (SOIL SURVEREY STAFF, 2014). O clima de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo Am's (tropical úmida), com transição para o tipo As' ou pseudo-tropical, com temperaturas médias anuais de 24° C e precipitação média em torno de 1.634,2 mm (CPRM, 2005). A precipitação ocorrida durante a condução do experimento foi de 1.476,8 mm (Figura 1).

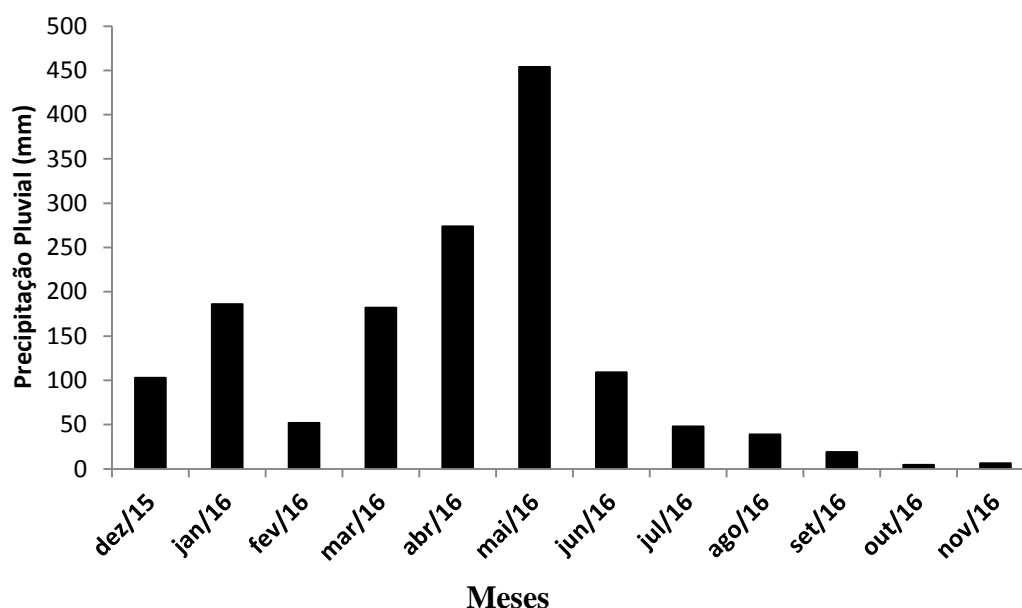


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) durante a pesquisa de campo na Usina São José, em Abreu e Lima, PE.

3.2.2 Características químicas e físicas do solo em estudo

A caracterização química e física do solo (Tabela 1) foi realizada na camada de 0-20 cm. A análise química correspondeu ao pH determinado em água (1:2,5); o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulação; o K^{+} e o Na^{+} extraídos com o extrator Mehlich1 e determinados por fotometria de chama; o P foi extraído também com o extrator Mehlich1 sendo determinado por espectrofotometria; carbono orgânico do solo extraído por dicromato de potássio e determinado por titulometria; a matéria orgânica do solo é baseada nos valores de carbono orgânico total do solo multiplicado pelo fator de correção 1,724, depois transformado em porcentagem (SILVA et al., 2009).

Tabela 1. Características químicas e físicas de amostras de solo do experimento antes do preparo inicial

Atributos químicos			
pH (H_2O)	6,00	m (%)	0,00
Fósforo (mg dm^{-3})	3,00	V (%)	66,34
Zinco (mg dm^{-3})	20,30	C (%)	1,27
Ferro (mg dm^{-3})	119,20	M.O (%)	2,19
Manganês (mg dm^{-3})	5,30	Atributos físicos	
Cobre (mg dm^{-3})	7,60	Areia Grossa (g kg^{-1})	313,20
Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	3,30	Areia Fina (g kg^{-1})	166,80
Magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,80	Areia Total (g kg^{-1})	480,00
Alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,00	Silte (g kg^{-1})	103,0
Potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,15	Argila (g kg^{-1})	417,0
Sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,08	Ds (g cm^{-3})	1,27
H ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,20	PT (%)	50,83
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	4,34	Classe textural	Argilo-arenosa
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	6,54		

SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação de bases; C: Carbono orgânico total; M.O: Matéria Orgânica do solo; Ds: Densidade do solo e PT: Porosidade total.

Para as características físicas do solo foram coletadas amostras deformadas e indeformada na profundidade de 0-20 cm, em zig-zag, com o auxílio do trado e anel volumétrico, respectivamente. Nas amostras deformadas foi realizada a análise de

granulometria do solo, quantificando as frações areia, silte e argila pelo método do densímetro, segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Nas amostras indeformadas foram determinadas a densidade e a porosidade total do solo, sendo a densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico, conforme descrito em Grossman e Reinsch (2002). O solo contido em anel volumétrico foi levado para a estufa à 105°C, e foram secos até peso constante. A densidade do solo foi então calculada por meio da equação (1).

3.2.3 Descrição do ensaio experimental

Os tratamentos constaram de duas variedades de cana-de-açúcar, RB92579 e RB867515 adubadas com sete doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹) na forma de uréia em dose única no fundo do sulco de plantio. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso no esquema de arranjo fatorial 2 x 7 com quatro repetições que totalizou 56 parcelas experimentais.

Cada parcela experimental foi composta por seis sucros de 10 m de comprimento, espaçadas 1,0 entre si, totalizando 60 m². A área útil foi delimitada em quatro linhas centrais com 08 metros de comprimento (32 m²), sendo destinadas as três linhas centrais para avaliação da produtividade final e uma linha para a avaliação da produção de biomassa da parte aérea no decorrer do tempo.

Antes da implantação do experimento, foi aplicado herbicida para dessecar a socoria remanescente e para facilitar a incorporação, com a grade aradora de 2 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT de 75%) calculados para elevar a saturação de bases para 70%. Em 19 de dezembro de 2015, foram abertos sulcos espaçados com 1,0 metro entre as linhas e foram semeados dois colmos sementes no fundo do sulco de plantio. Os colmos sementes foram distribuídos com a base do colmo junto com parte superior de outro colmo ("pé-com-ponta") e posteriormente foram cortadas em rebolos no tamanho médio de 30 a 40 cm, com a densidade de 3 a 4 gemas.

Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo de sulco, aplicando 120 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl), 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de Superfosfato Simples (SFS), 370 g de S, 10 g de B, 20 g de Cu, 500 g de Mn e 80 g de Zn adicionados na forma Sulfatos em um fertilizante mineral misto.

3.2.4 Avaliação nutricional das folhas +1 e +3

Durante o desenvolvimento da planta foi determinado o teor de N nas folhas diagnósticos +1 e +3, assim como quantificou-se a produção de biomassa da parte aérea. As coletas de foram realizadas em diferentes fases do ciclo da cultura (1ª fase: brotação/perfilhamento, 2ª fase: Crescimento e Desenvolvimento e 3ª fase: Maturação); sendo a primeira realizada no dia 02 de fevereiro de 2016 aos 45 dias após o plantio (DAP), a segunda coleta realizada no dia 22 de março de 2016 aos 90 DAP ambas na fase de perfilhamento da cultura. A terceira coleta foi realizada na fase considerada de crescimento rápido no dia 18 de maio de 2016 aos 135 DAP e a última coleta foi realizada no dia 11 de agosto de 2016 aos 300 DAP que correspondeu à fase de maturação da planta.

Para avaliar a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar foram coletadas 3 folhas diagnósticos, por parcela, da folha+1, identificada como a primeira folha que apresenta a lígula e bainha visível e a folha+3 identificada como a terceira folha com bainha e lígula visível (Malavolta (1992); Raij & Cantarella, 1997). Para a determinação do teor do N (g kg^{-1}), foi utilizado o terço médio de cada folha descartando a nervura central, que posteriormente foi seca em estufa de circulação forçada a 65°C , em seguida triturada em moinho tipo bola e pesada a 0,1g em balança de precisão. A extração do N no tecido vegetal foi por digestão sulfúrica e a determinação foi por destilação, com auxílio do hidróxido de sódio (NaOH) e titulação com ácido clorídrico (HCl) a 0,01 mol (EMBRAPA, 2009).

3.2.5 Avaliação da biomassa

Após a coleta das folhas, foi avaliada a produção de biomassa seca da parte aérea. Para tanto, foi coletada todo material vegetal em um metro linear da segunda linha das parcelas experimentais. O material vegetal foi compartimentado em palmito, folha verde e colmo conforme identificação descrita em Oliveira et al. (2011a). As amostras foram pesadas ainda no campo em balança de precisão (0,05 g) e posteriormente subamostradas.

As subamostras foram secas em estufa com ventilação a 65°C até atingirem massa constante e novamente pesadas para determinação da umidade do material. A partir do número de perfilhos contabilizados na área útil (3 linhas de soqueira com 8 metros de comprimento), da biomassa produzida nos compartimentos da planta e da umidade determinada em laboratório, foi calculada a produção de matéria seca (Mg ha^{-1}

¹) de colmo, da parte aérea e a biomassa total da planta pela soma dos dois compartimentos.

Para a estimativa da produção biomassa da parte aérea durante o crescimento da cana-de-açúcar, foi utilizada o modelo de regressão sigmoide $y = a / [1 + \exp(\frac{x-x_0}{b})]$, no qual “x0” corresponde ao ponto de inflexão, ou seja, o dia em que ocorre o maior acúmulo; “a” é o maior valor de “y” alcançado pelo modelo, ou seja, o valor do maior acúmulo. Nesse modelo, as fases de acúmulo foram estimadas pelos seus parâmetros, sendo a primeira fase iniciada no plantio até “x0 – 2b”; a terceira fase se inicia em “x0 + 2b”; e a segunda fase corresponde ao período entre a primeira e a terceira fase.

3.2.6 Determinação da curva de diluição crítica de nitrogênio (CDCN)

Para determinar a CDCN foi utilizado a metodologia descrita em Oliveira et al. (2013) que utiliza a relação a matéria seca da parte aérea (MSPA) e os teores críticos de N na folha diagnóstico em cada coleta realizada.

Na determinação da curva de diluição crítica foi necessário, à identificação das concentrações de N que não limitaram a produção da biomassa da parte aérea, ou seja, que não estavam em excesso ou deficiência. Assim os dados da matéria seca e teor de N na folha diagnóstico, em cada época amostrada, foram submetidos a análise de variância (ANOVA) a 10% de probabilidade, e as médias foram distinguidas utilizando-se o teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Em cada amostragem as maiores produções significativas de MSPA e suas concentrações correspondentes, para qualquer dose de N aplicada, foi identificada e separada das demais; quando a maior produção era obtida em duas ou mais doses de N, a menor dose era escolhida para ser considerado o nível crítico (ZAIDI et al., 2010; GREENWOOD et al., 1990).

Os dados que mostraram diferenças significativas ($p \leq 0,10$) pela ANOVA e não foram utilizadas na determinação da CDCN, foram aproveitados para validação da curva crítica de diluição, sendo identificados como não limitantes e limitantes a produção. Quando as épocas analisadas não apresentaram efeitos das doses em relação à biomassa, foram levadas em consideração as concentrações de N da dose de 0 kg ha⁻¹, com suas respectivas produções de MSPA, como sendo o nível crítico para a produção

de BSPA. Esses dados foram utilizados para determinar a relação entre a concentração crítica de N e a produção de MSPA da cana planta, utilizando a função alométrica (2):

$$N_{cr} = aMS^{-b} \quad (2)$$

Onde: N_{cr} – expresso em $g\ kg^{-1}$, representa ao teor crítico de N na parte aérea da planta para uma determinada produção de biomassa; MS- é massa de matéria seca da parte aérea expressa em $Mg\ ha^{-1}$; a – corresponde ao teor na folha diagnóstico para produzir $1\ Mg\ ha^{-1}$ e b – representa o coeficiente de diluição que descreve a relação entre o teor de N e a fitomassa da parte aérea.

3.2.7 Avaliação da extração, exportação e a exigência nutricional de N em cana planta

Para avaliar o efeito da adução nitrogenada na concentração dos componentes da parte aérea e extração de nitrogênio (N) da cana planta foi realizado amostragem da parte aérea aos 315 DAP, coletando 1 metro linear e dividindo a parte aérea em compartimentos, os quais foram: colmo, palmito e folha verde. A massa fresca de cada compartimento foi pesada diretamente no campo pelo auxílio de uma balança com precisão de 0,05 g. Ainda em campo as amostras foram subamostradas, pesadas e levadas para a estufa a 65 °C, determinando assim sua biomassa seca. Todo o material seco em estufa foi moído em moinho tipo facas e determinado a concentração de N ($g\ kg^{-1}$), obtida por digestão sulfúrica e determinada por destilação e titulação. Multiplicando a concentração pela matéria seca ($Mg\ ha^{-1}$) produzida de cada compartimento, observa-se a extração de N (biomassa total da planta), a exportação que corresponde ao N extraído pelo colmo e que não permanecerá no campo e a exigência de N para cana planta levando em consideração todo o N extraído pela cultura durante o ciclo em relação a produção de colmos por hectare (TCH).

3.2.8 Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos

Para determinação da produtividade, foram coletados aos 330 DAP os colmos das plantas contidos na área útil de cada parcela experimental. Após o corte, os colmos foram pesados ainda no campo, com auxílio de dinamômetro digital (precisão de 0,05kg). Com a biomassa fresca de colmos foi possível estimar a produtividade de

colmos por hectare (Mg ha^{-1}). Após a pesagem, foi realizada amostragem aleatória de dez colmos, no qual os mesmos foram encaminhados ao Laboratório, passados em picadora e coletadas subamostras para determinação dos atributos tecnológicos de qualidade da cana-de-açúcar, sendo determinados os sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) com auxílio do refratômetro digital, Fibra (FIB %), pureza do caldo (PC) e o açúcar total recuperável (ATR) de acordo com as equações descritas em Fernandes (2003) e Carvalho et al. (2008), a percentagem de sacarose do caldo (Pol) foi obtido pelo sacarímetro digital. Pelo produto do PC com a produtividade de colmos, foi calculada a produtividade de açúcar por hectare (TAH).

3.2.9 Avaliação da dose máxima econômica da adubação nitrogenada em cana planta

Para a avaliação econômica da adubação nitrogenada que determina a dose de máxima eficiência econômica, é utilizada a Margem de Contribuição Agrícola (MCA) que corresponde a contribuição de diferentes doses da adubação nitrogenada em relação a produção de colmos e açúcares sobre o custo total que é determinado a partir do custo do adubo (Uréia) mais o custo do Corte Carregamento e Transporte (CCT). Com a MCA é possível observar os ganhos em $\text{R\$ ha}^{-1}$ das diferentes doses em relação à dose 0 kg ha^{-1} de N.

3.2.10 Análises estatísticas

As variáveis: teor de N nas folhas, BSPA, teor de N nos compartimentos da planta no final do ciclo, extração e exportação de N, produtividade e os atributos tecnológicos, foram submetidas a teste de distribuição normal e homocedasticidade e quando necessário foram realizado transformações dos dados para que atendesse as premissas da análise de variância (ANOVA).

O teor de N e a BSPA nas folhas por serem avaliadas no decorrer do tempo, foram analisadas a partir do teste de medida repetidas no tempo, utilizando o pacote estatístico SAS Leaning 2.0, seguindo o procedimento para modelos misto e selecionado o teste de covariância [AR (1), Ante (1), ARH (1), ARMA (1), CS, CSH, HF, TOEP, Lin (1), UN] que apresentou o menor valor do critério de Akaike. As variáveis quando obtiveram efeitos da dose e das interações com a dose, foram feitas análises de regressões, sendo selecionados os modelos que melhor representou o fenômeno, com um maior valor de coeficiente de determinação (r^2) e significância dos

parâmetros pelo teste t a 5%. Quando as variáveis apresentaram efeito isolado das variedades estudadas, foi utilizado para contraste de médias o teste de Tukey a 10% de probabilidade.

As variáveis relacionadas aos teores de N nos compartimentos da planta no final do ciclo, extração e exportação de N, produtividade (TCH) e atributos tecnológicos foram submetidas à ANOVA, utilizando um delineamento em blocos casualizado, sob um arranjo fatorial (2x7). Quando observado o efeito da dose, foram realizadas as regressões, selecionando os modelos que mais se ajustaram aos dados com um maior coeficiente de determinação (R^2) e significância dos parâmetros pelo teste t a 5%. Já em relação ao efeito isolado das variedades, a diferença entre elas foram observadas pela análise da ANOVA.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Produção de matéria seca

3.3.1.1 Acúmulo e taxa de produção Matéria Secas da Parte Aérea (MSPA)

A produção de biomassa seca da parte aérea apresentou efeito da interação do tempo com a variedade (Apêndice A), que foi ajustado no modelo sigmoide de crescimento vegetal na cana planta (Figura 2A), sendo possível identificar três fases de desenvolvimento vegetativo (Tabela 2).

A primeira fase de crescimento foi caracterizada pelo período em que as plantas se encontravam na maior produção de perfilhos e obteve baixo ganho na produção de MSPA, correspondendo em média a 11,85% e que perdurou até os 73 e 89 dias para a variedade RB867515 e RB92579, respectivamente (Tabela 2). Nesta fase, a variedade RB867515 apresentou maior taxa de acúmulo em comparação com a variedade RB92579 (Figura 2B), a qual encerrou sua primeira fase com 15 dias após a variedade RB867515, com acúmulo de $6,24 \text{ Mg ha}^{-1}$, equivalente a 12,01%, de toda a produção de MSPA (Tabela 2). Essa diferença na produção de matéria seca pode estar relacionado com o perfilhamento, no qual a variedade RB92579 apresenta uma elevada produção de perfilhos que pode perdurar até os 90 DAP, já a variedade RB867515 apresenta-se com rápido crescimento inicial e com característica de obter um maior diâmetro de colmo maior (ALMEIDA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2010a).

Na segunda fase, o ciclo de desenvolvimento foi caracterizado pelo maior desenvolvimento da cultura, acumulando, em média, 87,88 % da biomassa da planta;

chegando ao final desta fase próximos dos 200 dias com um acúmulo de MSPA equivalente a 45,57 e 41,04 Mg ha⁻¹ para a variedade RB92579 e RB8675115, respectivamente (Tabela 2). Resultados semelhantes foram observados com diferentes variedades e sob irrigação plena por Oliveira et al. (2010a), que observaram um acúmulo de matéria seca na ordem de 83% que correspondeu a 48 Mg ha⁻¹.

A terceira fase foi caracterizada pela redução na produção da MSPA que contribuiu, em média, com 0,26% em um período equivalente a 35 dias para RB92579 e de 38 dias na RB867515 (Tabela 2). Esta fase se caracteriza pela maturação das plantas aumentando seus atributos industriais e tecnológicos.

A partir da curva de produção de massa seca da parte aérea foi possível identificar que a produção MSPA na RB92579 inicialmente, é menor e a partir dos 89 DAP obteve ganhos superiores à RB867515 que chegaram a 190 g ha⁻¹ dia⁻¹ (31,6 %) aos 133 DAP (Figura 2 A e B; Tabela 2). Aos 90 DAP a RB92579 apresenta maior produção de perfilho, sendo assim evidente a menor taxa de acúmulo em relação a RB867515.

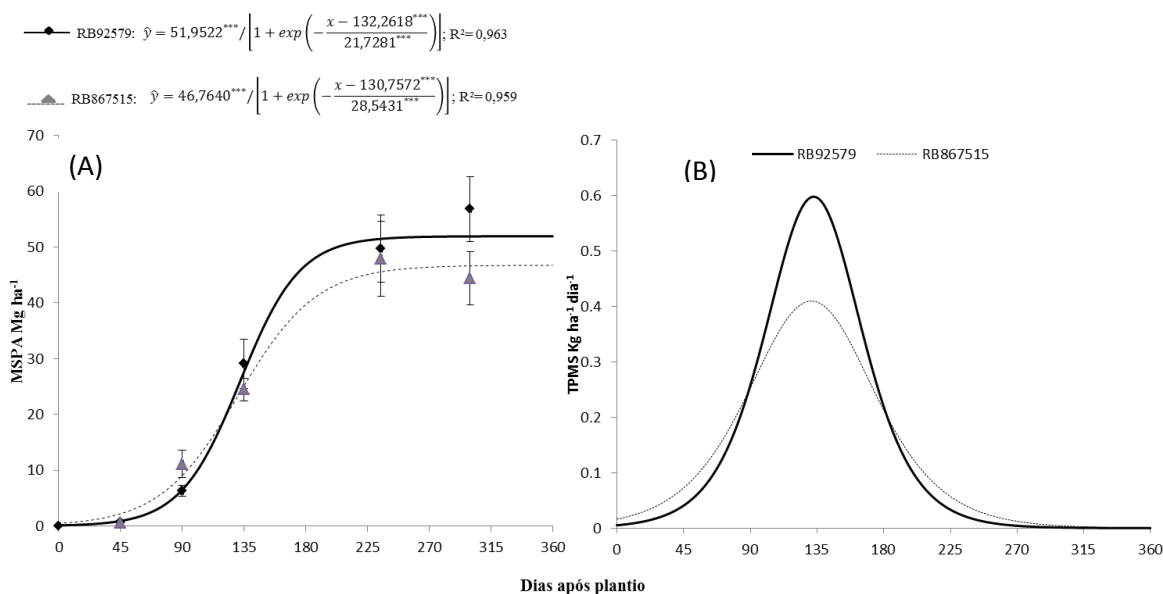


Figura 2. Curva de acúmulo de massa seca da parte aérea (A) e taxa de produção de matéria seca (B) na parte aérea de duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515)

Tabela 2. Distribuição das fases de desenvolvimento e produção de matéria seca da parte aérea de duas variedades de cana-de-açúcar, submetida a diferente dosagem de adubação nitrogenada

Variedade	<i>Cana planta</i>											
	1ª Fase			2ª fase			Maior acúmulo		3ª fase			
	Dias	Mg ha ⁻¹	%	Dias	Mg ha ⁻¹	%	Dias	g ha ⁻¹ dia ⁻¹	Dias	Mg ha ⁻¹	%	
RB92579	89	6,24	12,01	176	45,57	87,76	133	600	35	0,11	0,23	
RB867515	73	5,46	11,70	187	41,04	88,01	130	410	38	0,13	0,29	

3.3.1.2 Produção de matéria seca no final do ciclo aos 315 DAP

A produção de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea da planta foi influenciada pela adubação nitrogenada (Tabela 3).

No que se refere a produção de MSPA que permanece no campo, após a colheita (folha verde + palmito), foi observado que as doses de N 0 e 200 kg ha⁻¹ obtiveram os maiores acúmulos de matéria seca com, respectivamente 2,74 e 2,92 Mg ha⁻¹ (Figura 3 A). Esses dados encontram-se muito abaixo comparado ao observado por Oliveira et al. (2010a) que obteve valores médios que variaram entre 7,5 e 12,0 Mg ha⁻¹, no entanto cultivado sob irrigação plena, sendo que nesta pesquisa as condições de sequeiro contribuíram para obter uma menor produção de MSPA das folhas e palmito.

Machado et al. (1982) ao avaliar a produção de matéria seca durante todo o ciclo da cana-de-açúcar, observaram que o componente da parte aérea (folha + ponteiro) correspondia a 70% de toda a matéria seca até os 100 dias; após isso, a diminuição da matéria seca desse componente chegou a alcançar 9% próximo aos 400 DAP. Sendo assim, a baixa produção de matéria seca no final do ciclo, pode está relacionada com um maior acúmulo da matéria seca do colmo e com a baixa pluviosidade durante o ensaio experimental, acarretando assim em baixa produção de MSPA das folhas e palmito.

O acúmulo de matéria seca no colmo foi observado um incremento da produção até a dose 90 kg ha⁻¹, com ganhos que chegam a atingir 36,94% em relação à dose 0 kg ha⁻¹, correspondendo a um acúmulo de 59,96 Mg ha⁻¹ (Figura 3B). Esses dados corroboram com a pesquisa realizada por Almeida et al. (2008), que observou uma produção média de 53 Mg ha⁻¹; já Oliveira et al. (2010a) alcançou maior acúmulo médio finais com 85 Mg ha⁻¹ em diferentes variedades cultivadas sob irrigação plena. No entanto, produções de matéria seca que obtêm valores entre 50 a 60 Mg ha⁻¹ são consideradas ótimas baseadas em estudo realizado por Inman-bamber et al. (2002) que utilizaram genótipos em condições hídricas e nutricionais adequadas.

A variedade RB92579, obteve no geral, um maior acúmulo de matéria seca com 55,43 Mg ha⁻¹ correspondendo a uma diferença de 19,12 em relação a variedade RB867515 que obteve uma produção média de 44,83 Mg ha⁻¹ (Tabela 3). Esses valores no acúmulo de MSPA corroboram com Oliveira et al. (2010a) que observaram acúmulo de 85,0 e 48 Mg ha⁻¹ para as variedades RB92579 e RB867515.

O acúmulo total da matéria seca, por ser influenciado por mais de 95% do acúmulo ocorrido pelo colmo, foi observado também o efeito da dose e variedade; sendo assim, a dose 90 kg ha⁻¹ seguida pela dose 60 kg ha⁻¹ as que obtiveram os maiores acúmulos de MSPA, correspondendo a 62,47 e 57,1 Mg ha⁻¹ (Figura 3C), respectivamente. Os ganhos da MSPA para as duas variedades no final do ciclo da cultura, chegaram, em média, a uma variação de 28,96 a 35,07, 25% para as doses 60 e 90 kg ha⁻¹, respectivamente em relação a dose 0 kg ha⁻¹ (Figura 3C). De modo semelhante, Oliveira et al., (2013) e Otto et al, (2009) observaram efeitos positivos na produção de matéria seca em relação a adubação nitrogenada, com dose crescente até 120 kg ha⁻¹, em diferentes tipos de solos. Na produção total de matéria seca, a variedade RB92579 obteve maior acúmulo, correspondendo a uma produção equivalente a 18,25% a mais em relação à variedade RB867515 que produziu em média 47,23 Mg ha⁻¹ (Tabela 3).

Tabela 3. Matéria seca dos compartimentos da parte área de duas variedades de cana-de-açúcar aos 315 DAP, relacionado à adubação nitrogenada

Dose	Folha verde + Palmito		Colmo		Total	
	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515
-----Mg ha ⁻¹ -----						
0	2,48	3,01	40,91	34,71	43,40	37,72
30	2,16	2,25	47,71	46,71	49,88	48,97
60	1,59	1,96	58,24	52,41	59,84	54,37
90	2,87	2,15	66,63	53,29	69,50	55,44
120	1,89	2,00	54,29	40,91	56,18	42,91
150	2,88	2,10	62,50	41,15	65,39	43,26
200	2,56	3,27	57,71	44,66	60,28	47,94
Média	2,35	2,39	55,43	44,83	57,78	47,23
	F		F		F	
Variedade (V)	0,07 ^{ns}		9,34 ^{***}		9,20 ^{***}	
Dose (D)	3,35 ^{**}		2,33 [*]		2,26 [*]	
V x D	1,166 ^{ns}		0,54 ^{ns}		0,59 ^{ns}	
CV	23,38		22,40		21,46	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, ^{*}, ^{**} e ^{***} significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados foram submetidos a retirada de outliier.

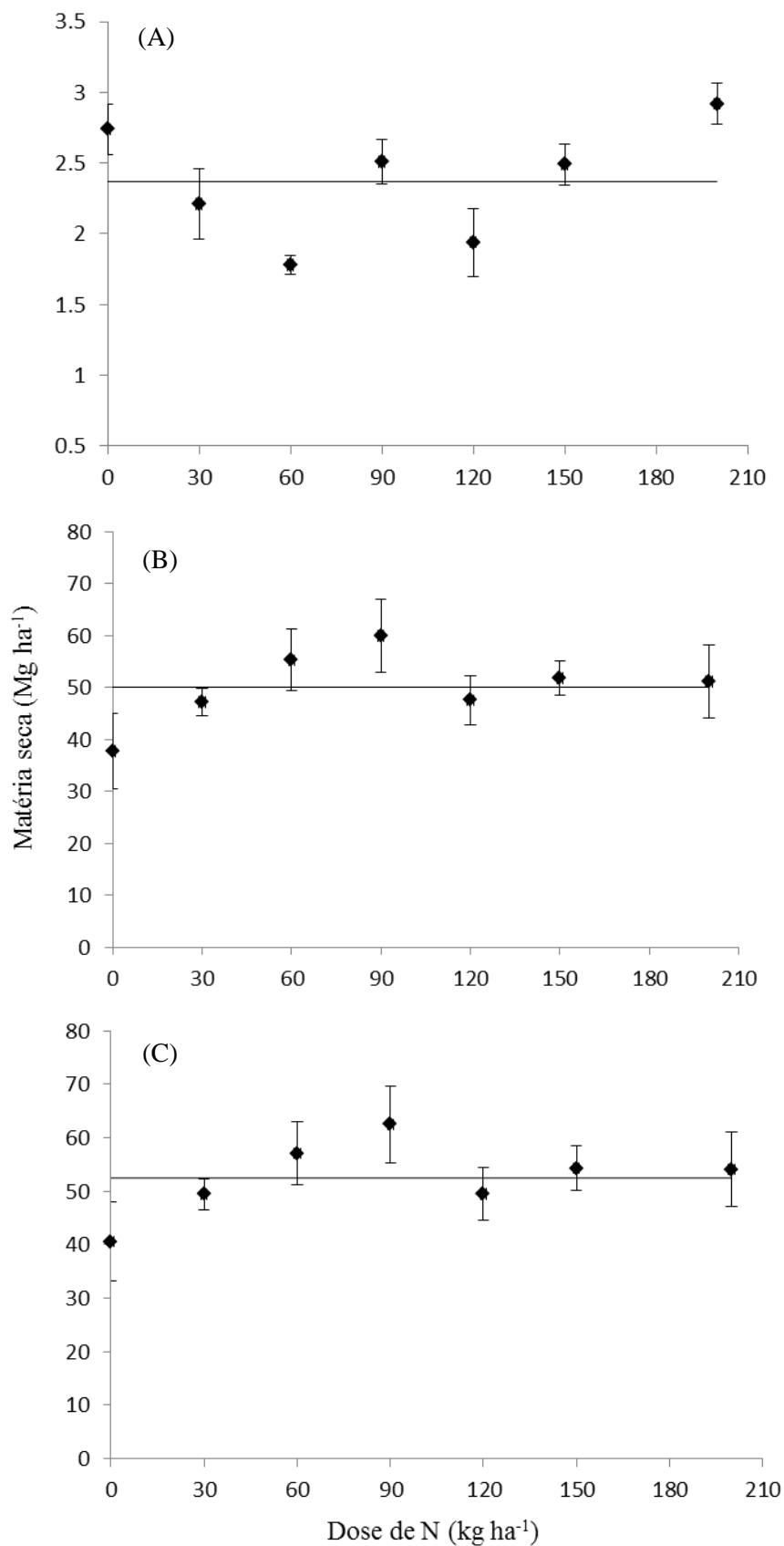


Figura 3. Biomassa seca da folha + palmito (A), colmo (B) e total da planta (C) de duas variedades (RB92579 e RB867515) de cana planta, relacionadas a adubação nitrogenada

3.3.2 Concentração de nitrogênio na cana-de-açúcar

3.3.2.1 Teor de N na folha diagnóstico

O teor de nitrogênio nas folhas diagnóstico folha+1 e folha+3 das variedades RB92579 e RB867515 não apresentou diferença entre si com a adubação nitrogenada durante as fases de crescimento da cana planta (Tabela 4), o que permite seguir a metodologia de Rajj & Cantarella (1997) que utiliza a folha +1 ou a metodologia de Malavolta (1992) que utiliza a folha +3 como folha diagnóstico dos teores críticos e faixas ideais de nitrogênio para cana planta.

Na região de produção de cana-de-açúcar de São Paulo, Vale (2009) ao utilizar a variedade SP83-2847 também não observou diferença no teor de N entre a folha +1 e folha +3 após aplicação de doses crescentes de nitrogênio. Em outros países a folha utilizada para avaliação nutricional da cana-de-açúcar é identificada como top visible Dewlap (TVD) ou a folha +1 que apresenta a primeira folha com a bainha e a lígula exposta, mas em virtude de erros de interpretação que considera a terceira folha após o cartucho, algumas pesquisas consideraram a folha +3 como sendo a folha diagnóstico (AGEITEC, 2017).

Nas fases de crescimento da cana planta apenas a folha +1 apresentou efeito significativo da interação entre variedade, dose e tempo (Tabela 4). E por ser comumente utilizada como folha diagnóstico em outras variedades cultivadas no Brasil (FRANCO et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2013) em outros países (BARKER; BRYSON, 2006) foi utilizada para avaliar a dinâmica de N na cana planta do presente estudo.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) dos teores de nitrogênio na folha +1 e +3 em duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) submetidas a doses crescentes de N e análise de variância da folha +1

ANOVA	
F+1xF+3	F 0,66 ^{ns}
AIC	-706
Modelo	AR(1)
Folha +1	
Variedade	F 30,58***
Dose	1,96*
Tempo	1233,12***
Var x Dose	7,02***
Var x T	1,46 ^{ns}
Dose x T	2,69***
Var x T x Dose	3,68***
AIC	-1103
Modelo	CSH

Os dados utilizados foram transformados pela potência de 0,1; ^{ns}Não significativo, *, ** e ***, significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade. AIC: Critério de Informação de Akaike- CSH: Composta Simétrica Harm.; AR(1): Auto regressiva de 1ª ordem.

O teor de N na folha +1 reduziu 66,59 e 73,00% referente ao menor e a maior variação dos teores encontrados (24,28 e 33,15 g kg⁻¹ de N) para a variedade RB92579 com a aplicação de 90 e 30 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, e, em torno de 68,62 e 71,48% referente ao menor e maior teor (24,86 e 30,97 g kg⁻¹ de N) para a variedade RB867515 com a aplicação de 30 e 200 kg ha⁻¹, respectivamente, no período de 45 aos 315 DAP (Figura 4AB). As variedades, em média, obtiveram uma redução de 19,3 e 19,54 g kg⁻¹ para a variedade RB92579 e RB867515, respectivamente durante todo o ciclo (Figura 4AB).

O declínio dos teores de N na parte aérea, durante o desenvolvimento da cana planta também foi relatado por Oliveira et al. (2013) na variedade SP80-3250, ao constatarem valores iniciais aos 120 DAP de 13,2 a 13,9 g kg⁻¹ de N. Santos (2014) também verificou decréscimo do teor de N na parte aérea ao decorrer do desenvolvimento da cana-de-açúcar, observando valores máximos de 15 g kg⁻¹ aos 120 dias e valores mínimos de 5 g kg⁻¹ estabilizando assim aos 200 dias que pode está relacionado com a produção de colmos pela cultura.

Nesta pesquisa a fase inicial do desenvolvimento da cultura, foi observado valores altos nos teores de N das folhas diagnóstico ainda não encontrados na literatura. Aos 45 DAP esses teores variaram de 33,15 a 24,28 e de 30,97 a 24,86 g kg⁻¹ nas doses de (30 e 90 kg ha⁻¹) e (200 e 30 kg ha⁻¹) para as variedades RB92579 e RB867515, respectivamente (Figura 4AB). Aos 90 DAP a dose de 150 kg ha⁻¹ de N obteve maiores teores com 19,84 e 18,80 g kg⁻¹ de N para as variedades RB92579 e RB867515, respectivamente (Figura 4AB). Os altos valores nos teores de N nas folhas podem caracterizar em maior suprimento da planta nos períodos iniciais de desenvolvimento, visto que Franco et al. (2011) ao utilizarem a técnica com isótopo ¹⁵N na cana-de-açúcar, observaram que o aproveitamento do N-fertilizante entre o início e final do ciclo da cultura, foi de 30 a 9 % na cana planta e de 56 a 21% na cana soca, respectivamente. Em virtude disto a adubação nitrogenada nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura se torna indispensável para suprir o N da planta.

Na fase de maior desenvolvimento da cultura (aos 135 DAP) as doses que obtiveram maiores teores foram as dose 0 e 150 kg ha⁻¹ de N com 17,08 e 15,66 g kg⁻¹ de N para as variedades RB92579 e RB867515; já os menores teores foram observados nas dose de 90 e 60 kg ha⁻¹ com teores de 11,59 e 13,37 g kg⁻¹, respectivamente para as variedades RB92579 e RB867515 (Figura 4AB) e que corroboram com os valores encontrados por Oliveira et al. (2013). Essa diminuição nos teores nas folhas com as dose de 90 e 60 kg ha⁻¹ estão relacionados com as maiores produções de biomassa.

Na fase final que antecedeu a colheita (300 DAP), os teores de N variaram de 7,42 a 9,3 g kg⁻¹ para a variedade RB92579 e de 6,23 a 8,83 g kg⁻¹ para a variedade RB867515 não havendo efeito, neste período, das doses e das variedades (Figura 4 AB).

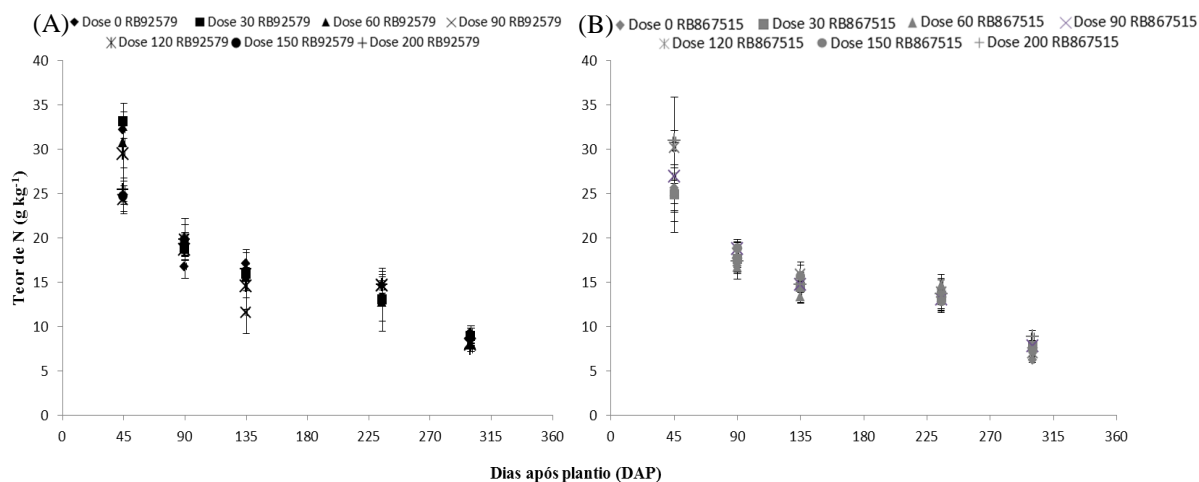


Figura 4. Teor de nitrogênio na folha diagnóstico (folha+1) nas variedades RB92579 (A) e RB867515 (B), em relação à adubação nitrogenada

3.3.2.2 Curva de diluição do nitrogênio crítico

A diluição do teor de N nas folhas está relacionada com o uso do N para produzir biomassa, assim quanto maior a biomassa é produzida e menor o suprimento de N pelo solo com o desenvolvimento da planta, esse nutriente será diluído para o desenvolvimento dos componentes da parte aérea e raízes (Franco et al., 2007).

A produção de biomassa seca da parte aérea das variedades RB92579 e RB867515 apenas apresentou diferença entre as doses de N aos 135 DAP (Figura 5A). Assim para obter o ajuste matemático e determinar a curva de diluição do nitrogênio crítico (CDNC) na folha +1 da cana planta, foram utilizados os teores 25,50, 16,75, 14,03 e 9,30 g kg⁻¹ de N na variedade RB92579 e 25,55, 16,81, 12,83 e 6,30 g kg⁻¹ de N na variedade RB867515 obtidos na dose 0 kg ha⁻¹ de N para os tempos 45, 90, 235 e 300DAP (Figura 5A). Para o tempo 135 DAP, a produção de biomassa da parte aérea nas doses 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N não apresentou diferença e foi superior ao obtida nas doses 0 e 200 kg ha⁻¹ de N. Deste modo, foram utilizados os teores 15,95 e 14,45 g kg⁻¹ de N na variedade RB92579 e RB867515 respectivamente, encontrados na dose de 30 kg ha⁻¹ de N, selecionada por ser a menor dose que obteve maior produção de MSPA na determinação da CDNC (Figura 5A).

Os teores críticos de N na folha +1 nas variedades RB92579 e RB867515 variaram de 33,15 a 24,67g kg⁻¹ e de 30,97 a 24,86 g kg⁻¹ para a produção de 0,75 e 0,79 Mg ha⁻¹ na fase inicial. Valores semelhantes foram encontrados por Gava et al. (2009) ao avaliar a concentração de N nos em dois genótipos de cana-de-açúcar, obtiveram concentrações quem variaram de 23,7 a 33,8 g kg⁻¹ de N para os estádios iniciais.

Aos 135 dias, em que foi observado o efeito da adubação nitrogenada na produção de biomassa da parte aérea, o teor crítico de N na variedade RB92579 foi de 15,95 ± 4,52 g kg⁻¹ para a produção de biomassa seca de 30,55 Mg ha⁻¹ e na variedade RB867515 os teores críticos foram de 14,45 ± 5,04 g kg⁻¹ com produção estimada de 25,8 Mg ha⁻¹ de biomassa seca. Resultados dos teores de N nas folhas diagnóstico apresentam próximas das concentrações observadas por Oliveira et al. (2013) que ao avaliar a concentração críticos de N, aos 130 DAP, por meio da CDNC, em cana planta de ano e meio, observaram valores entre 10,4 a 13,6 g kg⁻¹ para uma produção de 3,1 Mg ha⁻¹ de fitomassa. A diferença entre a produção de madeira seca pode está relaciona com o ciclo da cultura que neste trabalho foi utilizado cana de ano de ciclo curto.

Os teores críticos de N encontra-se dentro da faixa normal da nutrição, baseados em diferentes métodos de determinações que estabeleceu um valor de 14,5 g kg⁻¹ de N

crítico nas folhas diagnóstico e que também estabeleceu faixas normais de N pelo método da Chance Matemática (ChM) com uma faixa de 13,0 -15,0 g kg⁻¹, Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) com valores de 12,6 – 15,2 g kg⁻¹ e pela Diagnose da Composição Nutricional (CND) com 12,6- 16,5 g kg⁻¹ (SANTOS et al. 2013).

Com a CDNC foi possível identificar uma maior eficiência na utilização do N na variedade RB92579 em relação a RB867515, após levar em conta o coeficiente “a” e “b” da equação. O coeficiente “a” corresponde a concentração de N na parte aérea para produção de 1Mg ha⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2013); com isso foi observado que o valor obtido pela RB92579 foi de 23,23 g kg⁻¹, sendo ligeiramente inferior ao valor de 23,65 g kg⁻¹ estimados pela equação da variedade RB867515.

O coeficiente “b” da equação indica a intensidade de diluição de N crítico durante o desenvolvimento da cultura, e quando os valores apresentarem mais elevados (menos negativos) menor serão a diluição (ADRIOLO et al., 2006). Deste modo, o valor do coeficiente “b”, de -0,164 observados na variedade RB92579 em comparação ao valor de -0,197 observados pela variedade RB867515, mostrou a maior eficiência fisiológica no uso do N para a variedade RB92579, visto o menor teor na fase inicial de desenvolvimento, representada pelo coeficiente “a”, reduzida diluição com o aumento da produção de matéria seca (Figura 5 A e B).

Não foi possível observar valores limitantes para todos os dados encontrados para a criação do CDNC, visto que para validar a curva de diluição, os valores limitantes deveriam localizar-se abaixo da CDNC, enquanto que os dados não-limitantes estariam na parte superior da curva (ZIAD et al., 2010; COLNENNE et al., 1998; JUSTES et al., 1994). O motivo pelo qual não foi possível observar valores limitantes pode ser explicado pela baixa quantidade de dados analisados devido que foi utilizado poucas amostras; além disso, a diferença entre a produção de matéria seca só foi observado aos 135 dias diminuindo, mais ainda, a quantidade de dados que poderiam mostrar os valores limitantes e não-limitantes.

A baixa produtividade das duas variedades em relação às doses 0 e 200 kg ha⁻¹ pode está relacionado com a falta do N em quantidades essenciais, durante todo o ciclo, para a nutrição da planta quando leva em consideração a dose 0 kg ha⁻¹ e em relação a dose 200 kg ha⁻¹ a competição do elemento (N) com os demais macronutrientes pode ter acarretado em uma menor produtividade; sendo assim, foi observado uma menor diluição dos teores de N nas folhas durante todo o ciclo.

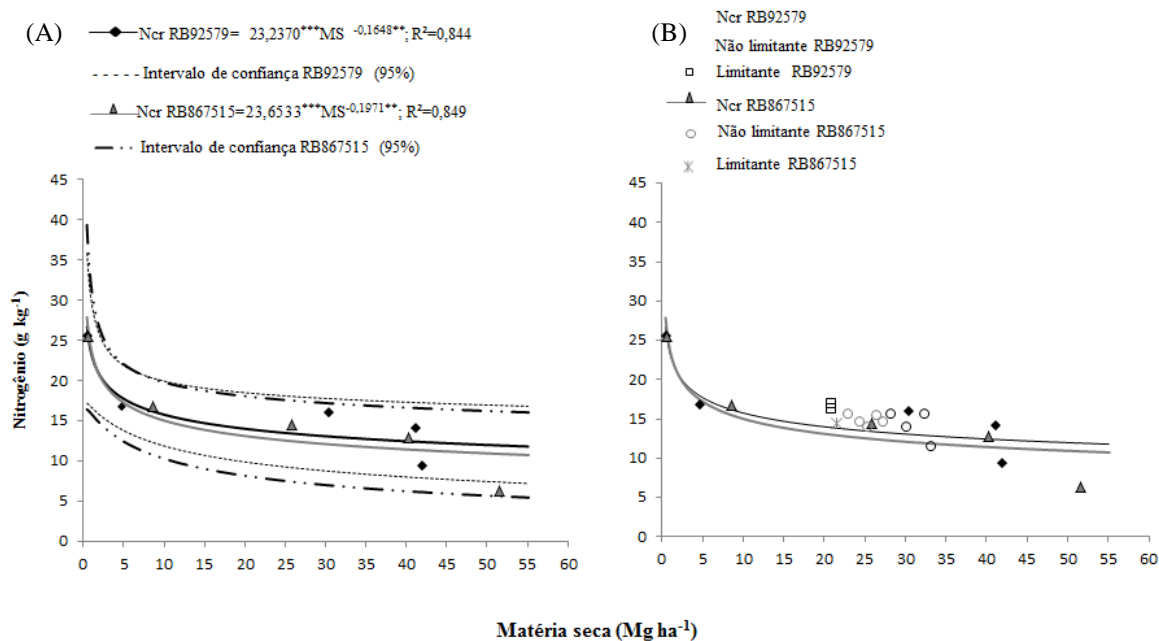


Figura 5. Curva de diluição do nitrogênio crítico (CDNC) da cana planta (A) e validação parcial da curva de diluição do nitrogênio crítico para a cana-de-açúcar utilizando os dados que se mostraram limitantes e não limitantes a produção de matéria seca (B). *, **, *** significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade

3.3.3 Extração, exportação e exigência do N da cultura da cana-de-açúcar.

O teor de N no colmo da cana planta apresentou efeito da aplicação das doses (Tabela 5), sendo que os dados de teor de N não se ajustaram a modelos matemáticos que expliquem o comportamento biológico. A dose 90 kg ha⁻¹ foi a que apresentou maior teor de N no colmo equivalente a 3,37 g kg⁻¹ que correspondeu a um aumento de 25,8% em relação à dose 0 kg ha⁻¹ (Figura 6). Para as variedades não apresentaram diferenças entre elas, sendo que foi observado valor médio de 2,565 g kg⁻¹ (Tabela 5) que encontrou próximos a recomendação proposta por Rajj & Cantarella (1997) equivale a teores de 2 a 2,5 g kg de N na parte aérea.

O teor de N nas folhas e no palmito da cana planta não apresentam diferença entre as variedades e com as doses de N aos 315 DAP, sendo observados valores médios de 7,5 e 5,5 g kg⁻¹ respectivamente (Tabela 5). A explicação para não observar o efeito da dose nas folhas e no palmito, pode está relacionada com a diluição do N ocorrida durante todo o ciclo da cultura, como visto na (Figura 4AB), e uma maior produção de colmos no final do ciclo.

Tabela 5. Teor de N nos compartimentos da parte aérea de duas variedades de cana-de-açúcar aos 315 DAP, em relação à adubação nitrogenada

Dose	Folha verde		Palmito		Colmo	
	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515
	-----g kg ⁻¹ -----					
0	8,96	6,90	5,92	4,80	2,43	2,65
30	9,14	5,41	6,62	5,78	1,92	2,18
60	8,16	8,02	5,08	6,58	2,59	3,00
90	8,26	7,88	6,26	6,39	3,58	3,16
120	7,70	6,72	5,69	5,02	2,80	1,91
150	6,81	7,46	5,36	5,04	2,30	2,61
200	6,65	8,12	5,12	4,07	2,38	2,38
Média	7,95	7,21	5,72	5,38	2,57	2,56
	F		F		F	
Variedade (V)	1,44 ^{ns}		0,55 ^{ns}		0,01 ^{ns}	
Dose (D)	0,28 ^{ns}		1,01 ^{ns}		2,64 ^{***}	
V x D	1,13 ^{ns}		0,83 ^{ns}		0,83 ^{ns}	
CV	25,84		26,56		24,69	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

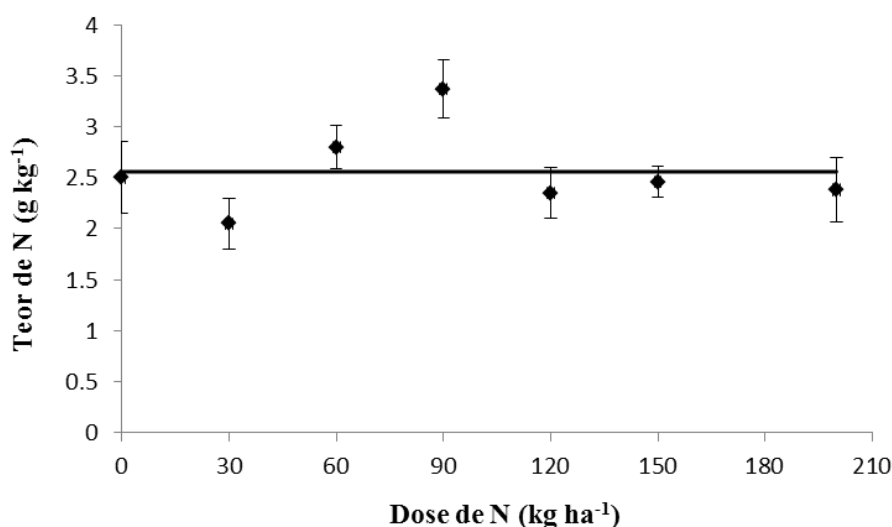


Figura 6. Teor de N no colmo de duas variedades (RB92579 e RB867515) aos 315 DAP, em relação a adubação nitrogenada

A extração, exportação e exigência nutricional de N foram influenciadas pela adubação nitrogenada; no entanto, só a extração e a exportação de N (kg ha⁻¹) apresentaram efeitos da interação variedade/dose (Tabela 4).

A dose que apresentou maior Extração de N na variedade RB92579 foi observada nos 90 kg ha⁻¹ de N aplicado, com valores extraídos de 258,53 kg ha⁻¹ que

correspondeu a 60,1% de incremento em relação à dose 0 kg ha⁻¹ que extraiu 103,17 kg ha⁻¹ (Figura 7A). Em relação à variedade RB867515, a dose 90 kg ha⁻¹ com 182,75 kg ha⁻¹ de N extraído, seguida pela dose 60 kg ha⁻¹ com 170,89 kg ha⁻¹, sendo em média 37,54% maiores que a dose 0 kg ha⁻¹ (Figura 5). Em relação as variedades a RB92579 extraiu, aproximadamente, 15% a mais em relação a variedade RB867515. Esses dados de extração corroboram com valores obtidos por Oliveira et al. (2011a) que observou extração de 237 e 260 kg ha⁻¹ para as variedades RB92579 e RB867515, respectivamente cultivadas sob irrigação plena.

De todo o N extraído pela planta durante o ciclo da cultura, boa parte é exportada juntamente com o colmo para a indústria; assim impossibilita o retorno deste elemento para o solo. Devido a uma maior produção de colmo no final do ciclo (Tabela 3), a exportação do N foi observada 90,24 e 85,83% para a variedade RB92579 e RB867515, respectivamente, mostrando que a variedade RB92579 é mais exigente na utilização do N para o seu desenvolvimento e conseqüentemente a reposição da aplicação nitrogenada nos ciclos posteriores se tornam indispensáveis.

Os valores da exportação de N foram observados em maior quantidade na dose de 90 kg ha⁻¹ com um valor de 237,60 kg ha⁻¹ para a variedade RB92579 que corresponde a um acréscimo de 64,04 % em relação a dose 0 kg ha⁻¹ (Figura 7B); já na variedade RB867515 os valores foram observados para a dose 90 kg ha⁻¹ com 167,79 kg ha⁻¹, seguida pela dose 60 kg ha⁻¹ com 156,85 kg ha⁻¹, correspondendo em média a 42,17 % de acréscimo em relação a dose 0 kg ha⁻¹.

Oliveira et al. (2010b) ao utilizar diferentes variedades cultivadas sob irrigação plena, observou que a variedade RB92579 e SP81-3250, foram as que mais exportaram N, com valores de 167 e 168 kg ha⁻¹, respectivamente, que correspondeu a 64,83 e 69,70% de todo o nitrogênio extraído pela cana planta. Neste trabalho a variedade RB867515 extraiu em média 135 kg ha⁻¹, valores estes inferiores ao encontrado por esta pesquisa.

Avaliando as relações entre extração de N e produção, constatou-se que a dose 90 kg ha⁻¹ promoveu, em média, uma maior exigência de N com 1,92 kg t⁻¹, sendo 45,31% maior em relação à dose 30 kg t⁻¹, a qual obteve a menor exigência (Figura 7C). Em relação a exigência de N nas variedades a RB92579 apresentou ser mais exigente do que a RB867515, com valores equivalentes a 1,41 e 1,29 kg t⁻¹, respectivamente. Os dados corroboram com os valores de exigência observados por Oliveira et al. (2010b)

que observaram uma variaram na exigência de N de 1,27 e 1,02 para as variedades RB867515 e RB92579, respectivamente.

Tabela 6. Extração, exportação e a exigência nutricional de N das para cana planta, em relação à adubação nitrogenada

Dose	Extração		Exportação		Exigência	
	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515
	-----kg ha ⁻¹ -----				-----kg t ⁻¹ -----	
0	103,17	110,32	85,43	93,76	1,01	1,19
30	111,37	115,46	92,61	102,46	1,01	1,08
60	164,14	170,89	153,75	156,85	1,42	1,60
90	258,53	182,75	237,60	167,79	2,26	1,57
120	165,24	122,02	153,72	78,77	1,45	1,09
150	156,24	120,22	141,58	107,60	1,37	1,10
200	152,86	124,46	138,45	104,94	1,38	1,20
Média	158,79	135,16	143,30	116,02	1,41	1,29
	F		F		F	
Variedade (V)	8,55 ^{***}		9,77 ^{***}		2,91 [*]	
Dose (D)	12,75 ^{***}		11,13 ^{***}		6,37 ^{***}	
V x D	2,16 [*]		2,42 ^{**}		1,88 ^{ns}	
CV	20,57		25,18		24,59	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, ^{*}, ^{**} e ^{***} significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

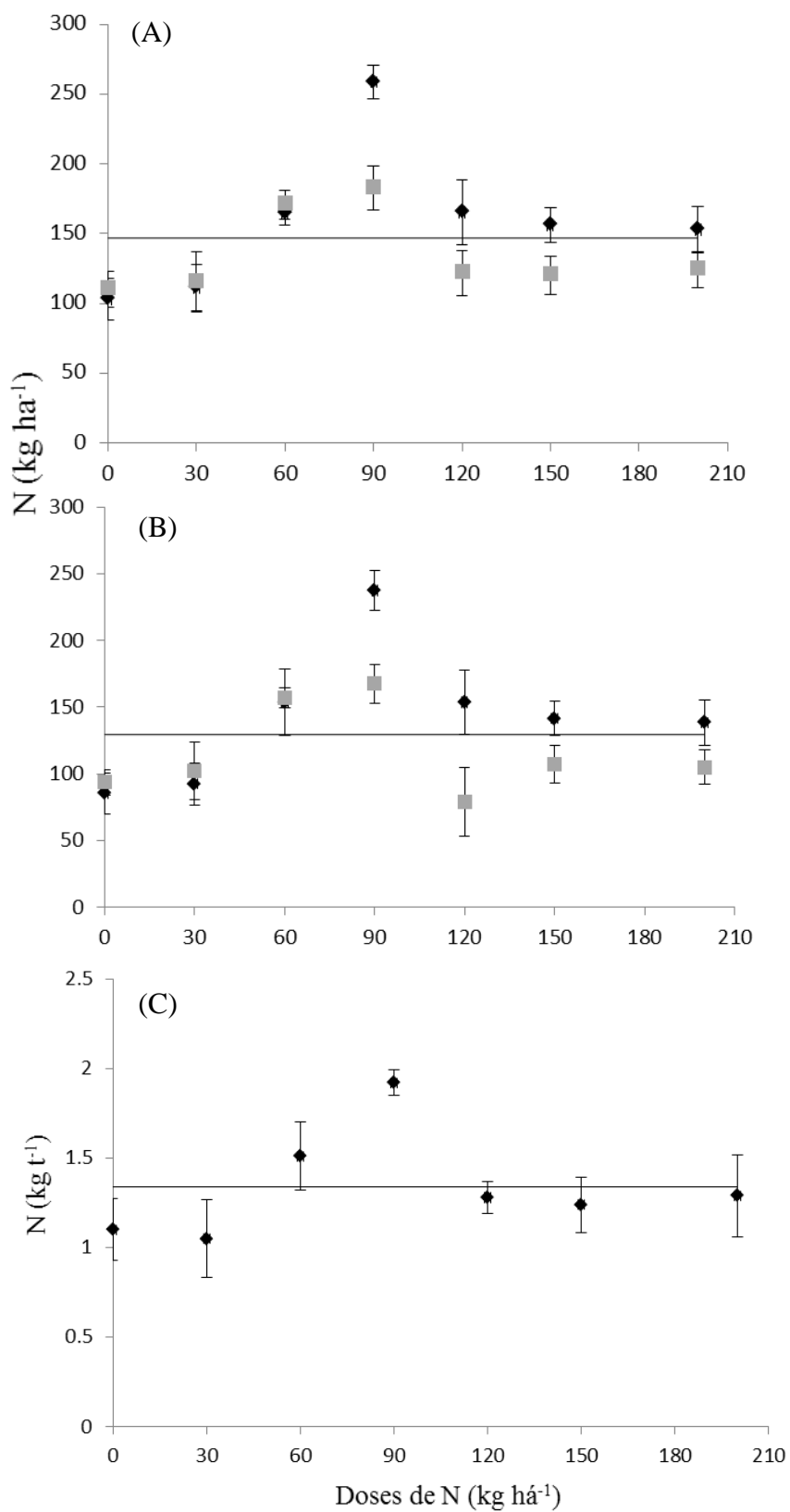


Figura 7. Extração (A), exportação (B) e exigência (C) de N nas variedades RB92579 (de forma de cor preta) e RB867515 (de forma de cor cinza), em relação a adubação nitrogenada

3.3.4 Produtividade agrícola e industrial

3.3.4.1 Produtividade agrícola, industrial e atributos tecnológicos

A variedade e adubação nitrogenada apresentaram efeito isolado para a produtividade de colmos (TCH) e interação para produtividade de açúcar (TAH) e açúcar total recuperável (ATR) (Tabela 6). Na RB92579 os ganhos em relação ao TCH foram maiores, sendo 6,15 % superior em à variedade RB867515 (Tabela 7). Oliveira et al. (2011B) também verificaram o potencial da RB92579 obter maiores produtividades de colmos, ao observarem incrementos na ordem de 2,5 e 69 Mg ha⁻¹ em relação a RB867515 nas condições de sequeiro e sob irrigação plena, sendo atribuído a maior eficiência de uso da água nas duas condições de cultivo.

Em ambas as variedades, as doses de N promoveram incrementos e obtiveram a mesma resposta para o TCH, em que os dados se ajustaram ao modelo polinomial quadrático, sendo possível calcular a dose de 129,45 kg ha⁻¹ de N e a produção de 117,19 Mg ha⁻¹ de colmos como a máxima eficiência agrônômica na cana planta (Figura 8A). Assim, a adubação nitrogenada promoveu ganhos na ordem de 15,73 e 24,25 Mg ha⁻¹ de colmos nas variedades RB92579 e RB867515, respectivamente, em relação ao controle (Tabela 7). Para o mesmo ciclo de cana planta, a RB92579 apresentou incremento linear a adubação nitrogenada, com ganhos de 09 a 16 Mg ha⁻¹ de colmos, até a dose 120 kg ha⁻¹ de N em solos de Pernambuco e Paraíba (Oliveira, 2012).

As pesquisas sobre adubação nitrogenada na cana-de-açúcar, em sua maioria realizadas na região centro sul do país, mostram incertezas em relação ao uso do N na cana planta e limitam a adubação nitrogenada em 45 kg ha⁻¹ (OLIVEIRA, 2011b), pelo fato de atribuírem a fixação biológica de N (FBN), a mineralização da matéria orgânica do solo e reserva de N presentes nos rebolos como fonte de N neste ciclo de cultivo (Trivelin, et al., 2002). No entanto, os resultados encontrados no presente estudo e os observados por Oliveira (2012) demonstram que a cana planta cultivada no Nordeste responde positivamente a adubação com ganhos entre 15 e 27 % com doses acima de 100 kg ha de N.

A diferente resposta a adubação nitrogenada em cana planta demonstra está relacionado com as diferentes regiões de produção de cana-de-açúcar do país. Visto que ambientes com menor eficiência a adubação, possuem condições pluviométricas e fertilidade de solos superiores ao comparar com regiões produtora de cana-de-açúcar do nordeste. Isto mostra que nesses ambientes com baixa eficiência da adubação

nitrogenada, como é o caso das regiões sudeste e centro-oeste, a mineralização da matéria orgânica presente no solo, pela adição dos restos culturais, é mais rápida pelo fato das condições pluviométricas alcançarem valores superiores a 1.900 mm e com altas temperaturas (TRIVELIN, et al., 2002).

A produção de açúcar por hectare (TAH) foi possível observar o efeito da dose, sendo a dose 150 kg ha⁻¹ na RB92579, seguida pela dose 60 e 120 kg ha⁻¹ com 19,67, 19,56 e 19,37 kg ha⁻¹, respectivamente. O incremento, em média, com a relação a dose 0 kg ha⁻¹, foi de 13,10 Mg ha⁻¹ (Figura 8B). Na variedade RB867515 a dose 90 kg ha⁻¹ apresentou maiores produção de TAH com um valor de 19,18 Mg ha⁻¹ (Figura 8B)

Tabela 7. Produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TAH) e atributos tecnológicos de duas variedades de cana-de-açúcar, relacionada à adubação nitrogenada

Dose de N	TCH		TAH		ATR	
	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515	RB92579	RB867515
	-----Mg ha ⁻¹ -----				-----kg t ⁻¹ -----	
0	101,46	92,94	16,96	17,58	164,5	171,77
30	109,92	107,23	17,19	18,90	155,48	172,43
60	115,27	109,32	19,56	17,17	166,21	168,29
90	114,14	115,91	17,53	19,18	153,08	163,92
120	115,77	117,14	19,37	17,42	165,57	148,33
150	124,71	108,30	19,67	18,38	151,99	165,25
200	122,32	103,37	17,92	17,90	153,74	158,97
Média	114,80	107,74	18,32	18,08	158,65	164,14
	F		F		F	
Variedade (V)	8,24 ***		0,85 ^{ns}		3,45*	
Dose (D)	4,62***		0,32 ^{ns}		1,60 ^{ns}	
V x D	1,46 ^{ns}		2,36*		1,97*	
CV	7,89		8,14		6,58	

TCH: tonelada de colmo por hectare; TAH: tonelada de açúcar por hectare; ATR: açúcar total recuperável. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns}não significativo, ***, ** e * significativo a 1, 5 e 10% respectivamente. Obs.: TCH foi retirado outlier e TAH levou em consideração a premissa da homocedase.

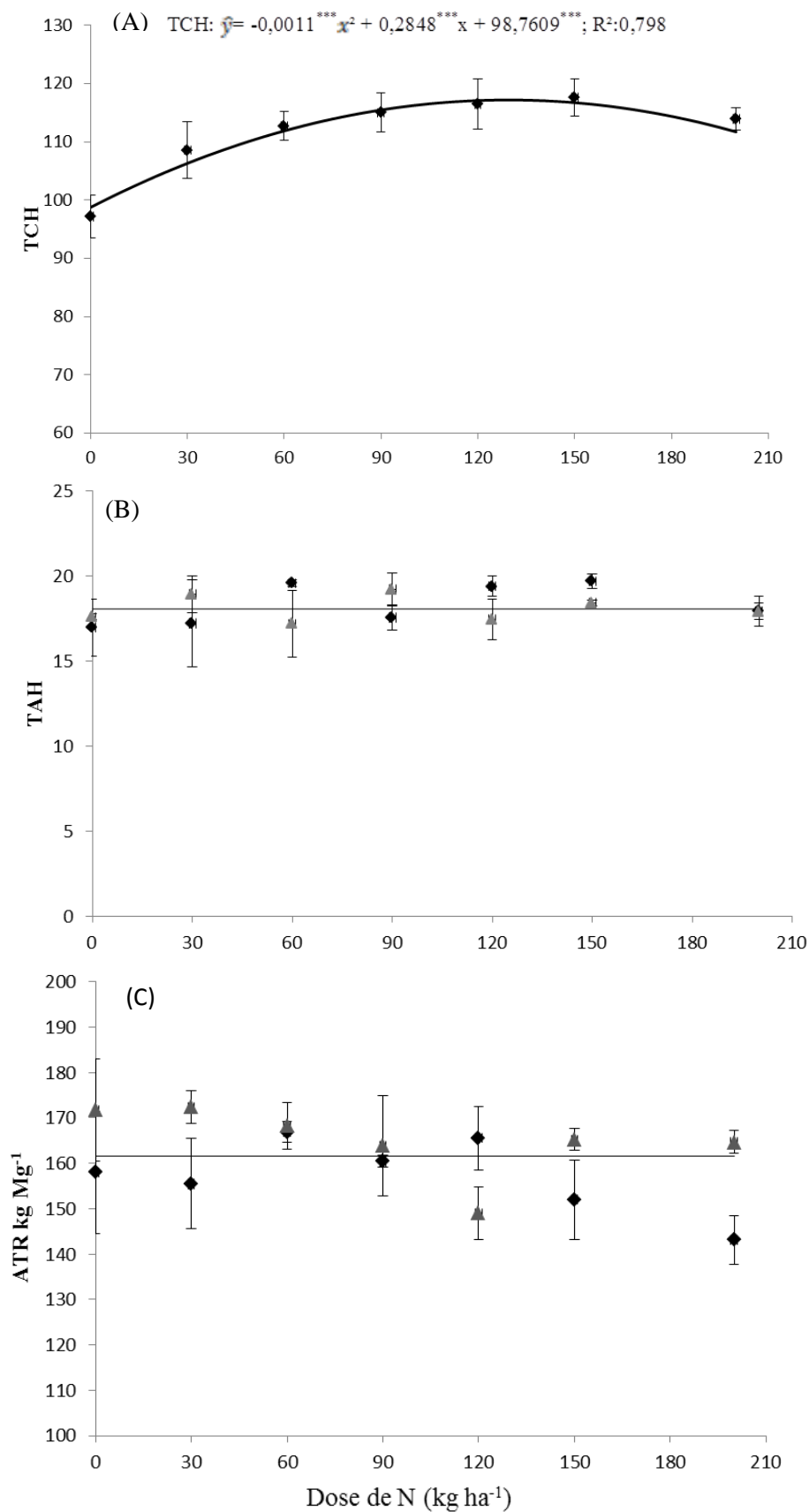


Figura 8. Produtividade de colmos (TCH) (A), produtividade de Açúcar (TAH)(B) e açúcar total recuperável (ATR) aos 330 dias após o plantio, em relação a adubação nitrogenada

Apesar de aumentar o TCH, a adubação nitrogenada promoveu redução no ATR para as duas variedades, com destaque na RB92579 que obteve redução de $13,58 \text{ kg ton}^{-1}$ quando aplicado doses acima de 120 kg ha^{-1} de N (Tabela 7; Figura 8B). A RB867515 também obteve redução no ATR com a adubação nitrogenada, sendo verificado queda de $15,59 \text{ kg ton}^{-1}$ com a dose de 120 kg ha^{-1} de N. Apesar da redução do ATR em relação à adubação nitrogenada, os valores obtidos ainda encontram-se superiores ao encontrados por Franco et al. (2010); Oliveira et al. (2001) e Oliveira (2012), contudo, próximos do observado por Santos (2014) que obteve valores médios de $168,61 \text{ kg ton}^{-1}$.

Dose elevadas de N pode ter aumentado sua concentração na solução do solo, que diminuído a disponibilidade de potássio para as plantas por ter um efeito antagônico com altas concentrações, sendo que esse elemento é responsável por diversas funções, inclusive a sua participação na síntese de açúcares e proteínas. Com isso, baixos níveis de sacarose em cana-de-açúcar, são associados à deficiência de K principalmente nos primeiros meses de desenvolvimento da cultura (MEDINA et al., 2013).

Deste modo, a utilização de N em doses subestimadas reflete em baixa produtividade, por outro lado quando as doses são utilizadas em excesso promovem redução da concentração de açúcar e baixa eficiência industrial (Fortes et al., 2013).

3.3.4.2 Avaliação da dose máxima econômica

Para testar a contribuição da adubação nitrogenada em relação à produtividade agrícola, foi realizado o cálculo da margem de contribuição agrícola (MCA). A margem de contribuição pode ser analisada do ponto de vista do produtor que entrega os colmos para a moagem (sistema agrícola), como também pode ser levada em consideração a agroindústria que produz sua própria matéria prima (Franco et al., 2010).

Neste trabalho, foi utilizado o MCA com bases nos custos do corte carrego e transporte (CCT) do colmo e da adubação nitrogenada em relação ao rendimento bruto obtido pelo valor referencial do ATR para o final da safra 2016/2017. Também foi levado em consideração a dose de máxima eficiência agrônômica que correspondeu a $129,45 \text{ kg ha}^{-1}$ de N e uma produção (TCH) de $117,19 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Todas as doses de N promoveram MCA positiva, no entanto, mesmo com produtividade menor, a dose 60 kg ha^{-1} de N apresentou a maior MCA, com retorno líquido de R\$ 1.714,81 (16,35%) (Tabela7). Para demais doses houve redução da MCA que variaram na ordem de 9,16 a 13,37%, com destaque para a dose 200 kg ha^{-1} que

apresentou a MCA de apenas 0,63%. Franco et al. (2010) ao utilizar diferentes doses (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹) de N em diferentes ambientes de produção, obteve valores em ganhos da MCA com a utilização da dose 40 kg ha⁻¹,havendo desvantagem financeira no emprego de maiores doses de N.

Tabela 8. Margem de contribuição agrícola, em relação a adubação nitrogenada

Dose de N Kg ha ⁻¹	TCH	ATR	Açúcar	Receita Bruta	Custo CCT	Custo Uréia	Custo Total	MCA	Ganhos
	Mg ha ⁻¹	Kg t ⁻¹	kg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
0	97,20	164,90	16.028	13.598	3.110	0	3.110	10.487	-
30	108,57	163,96	17.801	15.102	3.474	85,32	3.559	11.542	1054,93
60	112,29	167,60	18.819	15.966	3.593	170,64	3.763	12.202	1714,81
90	115,02	162,19	18.655	15.826	3.680	255,96	3.936	11.890	1402,39
120	116,45	157,30	18.317	15.540	3.726	341,28	4.067	11.472	984,97
129,45	117,19	158,98	18.630	15.806	3.750	368,15	4.118	11.688	1200,20
150	116,50	158,62	18.479	15.677	3.728	426,60	4.154	11.523	1035,19
200	112,84	153,91	17.367	14.734	3.610	568,80	4.179	10.554	66,66

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Açúcar: TCH x ATR; Receita Bruta: Açúcar x 0.8484 (ATR do fechamento da safra 2016/2017); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2017: R\$ 1280,00 ou R\$ 2,84/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. MCA: margem de contribuição agrícola. Ganhos: ganhos em R\$ em relação à dose 0 kg ha⁻¹ **Dose de máxima eficiência agrônômica**= 129, 45 kg ha⁻¹.

3.4 CONCLUSÕES

1. As variedades estudadas apresentaram diferença de 18,25% na produção da MSPA sendo a variedade RB92579 obteve um ganho maior correspondente a $47,23 \text{ Mg ha}^{-1}$.
2. As folhas diagnósticos (folha+1 e folha+3) não apresentaram diferenças no decorrer do tempo.
3. A adubação nitrogenada alterou os teores de N na folha diagnóstico, havendo uma diluição no decorrer do tempo da ordem de 66,59 a 73% para a variedade RB92579, e, em torno de 68,62 a 71,48% do N para a variedade RB867515.
4. O modelo alométrico da CDCN possibilitou o uso do modelo para a diagnose nutricional nas folhas da cana-de-açúcar para melhorar o aproveitamento no uso da adubação nitrogenada.
5. A concentração crítica de N nas folhas para a variedade RB92579 é de $15,95 \text{ g kg}^{-1}$ e $14,45 \text{ g kg}^{-1}$ para a variedade RB867515.
6. A adubação nitrogenada em cana-planta influenciou na produção de TCH com incremento na produção até os $129,45 \text{ kg ha}^{-1}$.
6. A exigência nutricional de N para produzir 1 TCH mostrou que na variedade RB92579 a exigência é de 1,41 kg de N, enquanto a variedade RB867515 obteve uma menor exigência de 1,29 kg de N.
7. A dose econômica de N baseado na margem de contribuição agrícola é de 60 kg ha^{-1} .

REFERÊNCIAS

ADRIOLO, J.L.; BISOGNIN, D.A.; PAULA, A.L.; PAULA, F.L.M; GODOI, R.S.; BARROS, G.T. Curva crítica de diluição de nitrogênio do cultivar Asterx de batata. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.7, p.1179-1184, 2006.

AGEITEC- Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONT000fkch7tf302wyiv80sq98yqk1vc13r.html> > Acesso em:15/01/2017.

ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.S. **Agricultura tropical**: quando anos década de inovação tecnológica, institucionais e políticas. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v.1: produção e produtividade agrícola.1336p.

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G.V.S.; FILHO, G.M.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologias**, Lavras, v.32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

ARAÚJO FILHO, J.C.; BURGOS, N.; LOPES, O.F.; SILVA, F.H.B.B.; MEDEIROS, L.A.R.; MELO FILHO, H.F.R.; PARAHYBA, R.B.V.; CAVALCANTI, A.C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F.B.R.; LEITE, A.P.; SANTOS, J.C.P.; SOUSA NETO, N.C.; SILVA, A.B.; LUZ, L.R.Q.P.; LIMA, P.C.; REIS, R.M.G. & BARROS, A.H.C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Boletim de Pesquisa Embrapa Solos, n.11, 2000.

AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBWE, H. & VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta - doses e fracionamento, **STAB**, Piracicaba, v. 4, p. 25-29, 1986.

BARKER, A.V.; BRYSON, G.M. Nitrogen. In: BARKER, A.V.; PILBEAN, D.J. (ed.). Handbook of plant nutrition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. chap. 2, p.21-50.

CARVALHO, C.M.; AZEVEDO, H.M. DANTAS NETO, J.; MELO, E.P.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, Recife, v. 3, p. 337-342, 2008.

COLNENNE, C.; MEYNARD, J.M.; REAU, R.; JUSTES, E.; MERRIEN, A. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. **Annals of Botany**, Oxford, v. 81, p.311-317, 1998.

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17**. v. 3, 65p, 2016.

CPRM- Serviço geográfico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Igarassu**. p.22, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas de Solos, 212p, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

FERNADES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2.ed. Piracicaba: STAB, 203. 240p.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, p.88-96, 2013

FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.669-674, 2007.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.5, p. 579-590, 2010.

FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.121, p. 29-41. 2011.

GASTAL, F.; LAMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.57, n.370, p.789-799, 2002.

GAVA, G.J.C.; M.A.; DIAS, F.L.F.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, E.C.A.; OLIVEIRA, M.W.; TEXEIRA, G.M. Interação entre fitomassa e nitrogênio em dois genótipos de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza: STAB,2009. 1. CD-ROM.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen fertilizer leaching in an Oxisol cultivated with sugarcane. **ScintiaAgricola**, Piracicaba, v.68, n.1, p.86-93, 2011.

GREENWOOD, D.J.; LEMAIRE, G.; GOSSE, G.; CRUZ, P.; DRAYCOTT, A.; NEETESON, J.J. Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass. **Annals of Botany**, Oxford, v. 66, p. 425-436, 1990.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G.. *Bulk density and linear extensibility*. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. **Madison, Soil Science of Society of America**, p. 201-228, 2002.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.76, p.71-84, 2002.

JUSTES, E.; MARY, B.J.; MEYNARD, M.J.; MACHET, M.; THELIER-HUCHE, L. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. **Annals of Botany**, Oxford, v. 74, p.397-340, 1994.

MACHADO, E.C. Índices biométricos de duas cultivares de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, p.1323-1329, 1982.

MALAVOLTA, E. ABC da análise de solo e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: **Ceres**, 1992.

MEDINA, N.H.; BRANCO, M.L.T.; SILVEIRA, M.A.G.; SANTOS, R.B.B. Dynamic distribution of potassium in sugarcane. **Journal of Environmental Radioactivity**, Pinawa, v.126, p. 172-175, 2013.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Lixiviação de nitrato em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado em cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n.1, 2001.

OLIVEIRA, E.C.A.; OLIVEIRA, R.I.; ANDRADE, B.M.T.; FREIRE, F.J.; LIRA JUNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivada sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.9, p.951-960, 2010a.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; FREIRE, M.B.G.S.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, S.A.M. Extração e exportação de nutrientes por variedade de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p. 1343-1352, 2010b.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, M.B.G.S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.3, p.579-588, 2011a.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A.T.; CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, 2011b.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molibdica em cana-de-açúcar**. Recife, 2012. 97p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco

OLIVEIRA, E.C.A.; GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Plant Nutrition Soil Science**, Lauda, n.176, p. 712-723, 2013.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.
Nitrateleaching in a sewage sludge-amended Typic Hapludox cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, p.171–180, 2001.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A. & LAVORENTI, N.A.
Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 17, p. 39-41, 1999.

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.
Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

RAIJ, B.van ; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. eds. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Fundação IAC, 1997. p.233-243. (Boletim,100).

SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; JUNIOR, J. L.; CAMACHO, M. A. Normal nutrient ranges for sugarcane by the methods chm, dris and cnd and critical level by reduced normal distribution. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1651-1658, 2013.

SANTOS, R.L. **Molibdênio no metabolismo e na fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar**. Recife: UFRPE, 2014. p.135. Tese (Doutorado)- Universidade Federal Rural de Pernambuco.

SILVA, A.B; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V.; AZEVEDO, H.M. Rendimento e qualidade de cana-de-açúcar irrigada sob adubação de nitrogênio e potássio em cobertura. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n. 3, p.236-241, 2009.

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; RAIJ, B. van.; SILVA, C. A. ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; PÉREZ, D. V.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; ABREU, M. F.; BARRETO, W. O. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. In: SILVA, F. C. (Org). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 2009. p.75-169. (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia).

SOIL SURVERY STAFF.2014. Keys to Soil Taxonomy. 12nd edition. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solos arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 637-646, 2002.

VALE, D.W. **Efeito da aplicação de nitrogênio nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produção de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: UNESP, 2009. p.132, Dissertação- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.249-256, 2007.

ZAIDI, N.; BELANGE, G.; CLAESSENS, A.; LEFEBVRE, L.; CAMBOURIS, A.N.; TREMBLAY, N.; NOLIN, M.C.; PARENT, L.E. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p. 241-249, 2010.

4 Estimativa dos teores de N nas folhas e da produção de biomassa da cultura da cana-de-açúcar utilizando a técnica da espectrorradiometria

RESUMO

A técnica da espectrorradiometria possibilita obter dados de refletância, que corresponde à radiação refletida após o contato com a superfície. Os pigmentos e estruturas internas das folhas das plantas são influenciados com a adubação nitrogenada, o que influencia na absorção da energia e alteram a refletância da radiação, que pode ser detectada por espectrorradiometria no comprimento de onda do visível, infravermelho próximo e médio. Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar a variação espectral na folha +1 e +3 da cana-de-açúcar sob doses crescentes de N, de modo a obter ajustes matemáticos que possibilitem estimar o teor de N e a produção de biomassa. O experimento foi desenvolvido em condições de campo, com duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) submetidas a sete doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹), no delineamento estatístico de blocos casualizados no esquema de arranjo fatorial (2x7), com 4 repetições. Aos 45, 90, 135, 235 dias após o plantio (DAP) foi avaliada a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e teor de N nas folhas diagnósticos. Nos mesmos, também foram obtidas as medidas espectrais de refletância com intervalo espectral de 350- 2500 nm nas folhas diagnósticos, por meio do equipamento espectrorradiômetro portátil. O teor de N variou de 3,31 a 1,28%. Os comprimentos de onda que melhor representaram a variação do teor de N nas folhas foram os da banda do infravermelho médio, principalmente os comprimentos 1405, 1651, 1721 e 1857nm, em que a transformação exponencial e logarítimo natural possibilitou melhor sensibilidade de detectar as variações nos teores, sendo encontrados modelos que explicam 89% de toda a variação dos teores de N na folha diagnósticos, e, com erro médio quadrado (RMSE) de 0,19 que corresponde a 10,22% de erro em relação ao teor médio de N. Para estimar a biomassa da parte aérea, a banda do visível, principalmente com os comprimentos (464, 465, 474, 475, e 479nm), apresentaram melhores correlações, sendo a transformação da fração inversa (1/Rλ), a qual possibilitou desenvolver modelos com coeficiente de determinação (r²), em média, 0,71; no entanto, o RMSE não apresentou valores ideais na calibração, sendo necessário novas calibrações para obter um melhor RMSE. Os modelos determinados com uso da espectrorradiometria estimaram os teores de N nas folhas diagnóstico e a produção de biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar, o que possibilita ampliar a novos estudos em técnicas de sensoriamento remoto para análise nutricional de N e estimativas da produtividade.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Folha diagnóstico de N. Matéria seca da parte aérea. Refletância. Índices de vegetação.

Estimate of the N contents in the leaves and of the biomass production of the sugarcane crop using the spectroradiometry technique

ABSTRACT

The spectroradiometry technique allows to obtain data of reflectance, which corresponds to the reflected radiation after the contact with the surface. The pigments and internal structures of the leaves of the plants are influenced by nitrogen fertilization, which influence the absorption of energy and alter the reflectance of the radiation, which can be detected by spectroradiometry at the wavelength of visible, near and medium infrared. Thus, the objective of the research was to evaluate the spectral variation in leaf +1 and +3 of sugarcane under increasing doses of N, in order to obtain mathematical adjustments that make it possible to estimate N content and biomass production. The experiment was carried out under field conditions, with two varieties of sugarcane (RB92579 and RB867515) submitted to seven doses of N (0, 30, 60, 90, 120, 150 and 200 kg ha⁻¹) Statistical design of randomized blocks in the factorial arrangement scheme (2x7), with 4 replicates. At 45, 90, 135, 235 days after planting (DAP) the dry matter production of the aerial part (MSPA) and N content in the leaves were evaluated. In the same ones, the spectral measurements of reflectance with spectral range of 350-2500 nm in the diagnostic sheets were also obtained, through the portable spectroradiometer equipment. The N content ranged from 3.31 to 1.28%. The wavelengths that best represented the variation of the N content in the leaves were those of the medium infrared band, especially the lengths 1405, 1651, 1721 and 1857nm, where the natural exponential and logarithmic transformation allowed a better sensitivity of detecting the variations in the , With models that explain 89% of all variation of N contents in the diagnostic leaf, and with a mean square error (RMSE) of 0.19 corresponding to 10.22% of error in relation to the mean N content (464, 465, 474, 475, and 479nm) showed better correlations, with the transformation of the inverse fraction ($1 / R\lambda$), which allowed the Develop models with coefficient of determination (r^2), on average, 0.71; However, the RMSE did not present ideal values in the calibration, being necessary new calibrations to obtain a better RMSE. The models determined using spectroradiometry estimated the levels of N in the diagnostic leaves and the biomass production of the aerial part of the sugarcane, which allows to extend to new studies in remote sensing techniques for nutritional analysis of N and estimates of the productivity.

Keywords: *Saccharum* spp. N diagnosis leaf. Shoot dry matter. Reflectance. Vegetation index.

4.1 INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias no setor agrícola proporcionou inúmeros avanços significativos, tanto na produção dos cultivos quanto na eficiência da utilização dos insumos utilizados em todo o ciclo da cultura. Dentre estas tecnologias, a técnica da espectrorradiometria juntamente com o sensoriamento remoto vem sendo expandida para diferentes fins, buscando cada vez mais melhorar o gerenciamento dos recursos agrícolas e naturais.

A técnica da espectrorradiometria consiste em obter dados de refletância, que corresponde à radiação refletida após o contato com a superfície de um determinado objeto (SILVA, et al., 2012). A refletância é influenciada pelas condições biofísicas como, por exemplo, cor, formato e concentrações de determinado elemento químico do objeto alvo e que identificando as variações da radiação refletida em diferentes bandas espectrais que possibilita identificar informações precisas sobre as características do dossel (TIAN, et al., 2011; AHAMED, et al., 2011; ABDEL- RAHMAN et al., 2010).

Nas plantas, a refletância é determinada principalmente nas folhas, sendo encontrada em diferentes bandas espectrais, as quais correspondem ao: visível, infravermelho próximo e o infravermelho médio. As bandas espectrais da região do visível correspondem ao intervalo de comprimentos de ondas dos 350– 720 nm e são influenciadas por pigmentos nas folhas, como a clorofila, carotenoides e xantofilas que absorvem mais energia e conseqüentemente refletem menos nessa banda espectral (TIAN et al., 2011; BLACKBURN, 1999). A região do infravermelho próximo, que corresponde ao intervalo de comprimento de 720–1.100 nm, possui alto valor de energia refletida, devido à baixa absorção e maior distribuição interno da radiação na folha, pelo fato de que existe interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo e constituinte foliares (SLATON et al., 2001; GATES et al., 1965). Por último, a região do infravermelho médio, corresponde aos comprimentos dos 1.100– 2.500 nm e é influenciada pela quantidade de água nas folhas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009; TIAN et al., 2011; DEMATTÊ et al., 2004).

As modificações nas refletâncias nas plantas estão relacionadas com variação de diferentes aspectos biofísicos, dentre eles a variação na produção da biomassa que aumenta a refletância nos comprimentos de onda do visível e diminui de forma ordenada a refletância no infravermelho próximo e médio com a diminuição da produção da biomassa (YUAN; ZHANG, 2007). Outras variáveis da planta também afetam a resposta espectral, como exemplo, dos teores de N. Na cultura da grama

batatais (*Paspalum. notatum*) a quantidade de biomassa do dossel, após aplicação de diferentes níveis de adubação nitrogenada, afetou diretamente a refletância (FONSECA, et al., 2002).

O nitrogênio como nutriente influencia tanto na taxa de expansão, quanto na divisão celular, determinando assim o tamanho das folhas, acumulando conseqüentemente mais fitomassa. Assim sendo, à medida que o aumento das doses de adubo nitrogenado supri a cultura com N, ocorre um aumento da fitomassa do dossel, quanto também um aumento na produção da clorofila, com conseqüente aumento da refletância dos comprimentos de onda do infravermelho próximo, enquanto os comprimentos do visível diminuem conforme a quantidade de radiação absorvida pelos pigmentos nos processos fotossintéticos (FERNÁNDEZ et al., 1994; JENSEN et al., 1990). Na literatura existe comprimento de onda que possui influência direta com componentes químicos da planta. No caso do nitrogênio os comprimentos de onda que possui relação com os componentes químicos da planta e no presente caso com o teor de N foram observados na cultura do arroz, nos comprimentos 570-710 nm (Tian et al., 2011; BLACKMER, et al., 1996), por Wu et al. (2000) nas culturas do arroz e milho para os comprimentos 700-900 nm, e também em nos comprimentos de 1690, 1730, 2060, 2130, 2180, 2240, 2300 e 2350 nm em diferentes vegetações (KUMAR et al., 2001; PEÑUELAS et al., 1994; CURRAN, 1989).

A partir desses dados de refletâncias, é possível desenvolver índices para avaliações biofísicas da vegetação (ROSSATO et al., 2012). Esses índices de vegetação podem ser definidos como funções matemáticas entre duas ou mais bandas espectrais agrupadas que realçam o comportamento espectral e correlacionam-se com os parâmetros biofísicos da vegetação; sendo eles mais sensíveis do que as bandas individuais, quando relacionados aos parâmetros (EPIPHANIO, et al., 1996). Dentre inúmeros índices de vegetação, o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é o mais utilizado pelos estudos agrícolas (BREDEMEIER et al., 2013; ESTEVES et al., 2012; MOLIN et al., 2010; PICOLI et al., 2009; GROHS et al., 2009; MA et al., 2001). No entanto, novos índices podem ser criados e que poderá representar melhoria na correlação com os parâmetros biofísicos estudados.

Em estudos realizados por Tian et al., (2011) utilizando adubação nitrogenada na cultura do arroz, obteve melhores resultados utilizando novos índices em comparação com os índices já criados, nos quais foram utilizados razões simples na faixa do visível, principalmente (533, 565 nm) obtendo correlação (R^2) de 0.76 e normalização

utilizando os comprimentos 401, 434 e 496 nm com correlação de 0,84. Já o estudo realizado por Abdel- Rahman et al., (2010) com a cultura da cana-de-açúcar, a melhor correlação com o teor de N nas folhas foi ao utilizar comprimentos transformados (primeira derivada e remoção do contínuo) em razões simples com comprimentos do infravermelho próximo (743 e 1316 nm), sendo observado correlação de 0.76.

Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a variação espectral na folha +1 e +3 da cana-de-açúcar sob doses crescentes de N, de modo a obter ajustes matemáticos que possibilitem estimar o teor de N e a produção de biomassa.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em condições de campo, na área agrícola da Usina São José S/A, localizada no município de Abreu e Lima (Latitude 7°49'09,61" S e Longitude 35°04'11,14" W) região do litoral norte do Estado de Pernambuco, com uma altitude de 128 m. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo (ARAÚJO FILHO et al., 2000) e Typic Kandiodox (SOIL SURVEREY STAFF, 2014). O clima de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo Am's (tropical úmida), com transição para o tipo As' ou pseudo- tropical, com temperaturas médias anuais de 24° C e precipitação média em torno de 1.634,2 mm (CPRM, 2005). A precipitação ocorrida durante a condução do experimento foi de 1.476,8 mm (Figura 1).

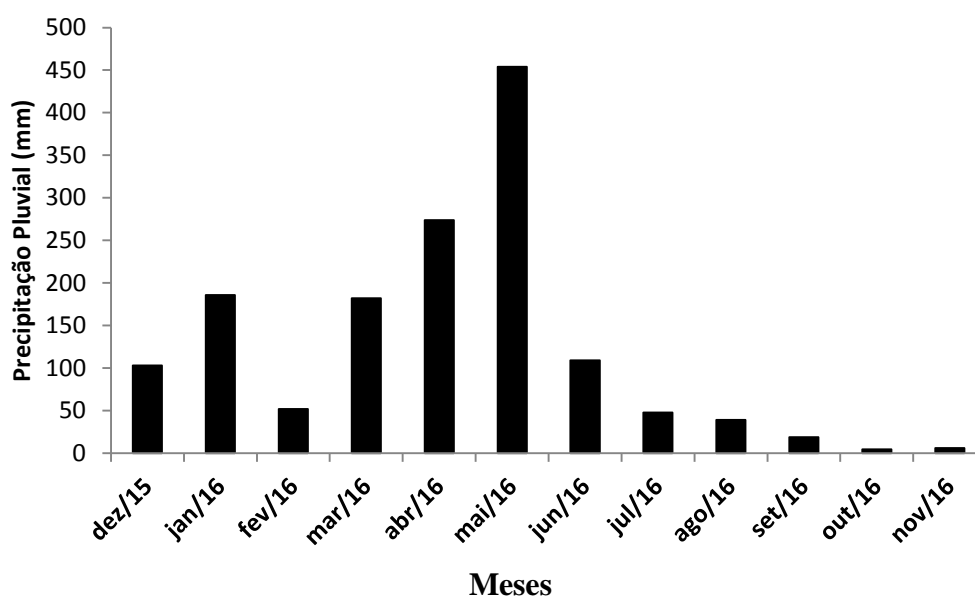


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) durante a pesquisa de campo. Usina São José, em Abreu e Lima, PE.

4.2.2 Características químicas e físicas do solo em estudo

A caracterização química e física do solo (Tabela 1) foi realizada na camada de 0-20 cm. A análise química corresponderam ao pH determinado em água (1: 2,5); o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com KCl 1 mol/L e determinados por titulação; o K^+ e o Na^+ extraídos com o extrator Mehlich1 e determinados por fotometria de chama; o P foi extraído também com o extrator Mehlich1 sendo determinado por espectrofotometria; carbono orgânico do solo extraído por dicromato de potássio e determinado por titulometria; a matéria orgânica do solo é baseada nos valores de carbono orgânico total do solo multiplicado pelo fator de correção 1,724, depois transformado em porcentagem (SILVA et al., 2009).

Tabela 1. Características químicas e físicas de amostras de solo do experimento antes do preparo inicial

Atributos químicos			
pH (H ₂ O)	6,00	m (%)	0,00
Fósforo (mg dm ⁻³)	3,00	V (%)	66,34
Zinco (mg dm ⁻³)	20,30	C (%)	1,27
Ferro (mg dm ⁻³)	119,20	M.O (%)	2,19
Manganês (mg dm ⁻³)	5,30	Atributos físicos	
Cobre (mg dm ⁻³)	7,60	Areia Grossa (g kg ⁻¹)	313,20
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	3,30	Areia Fina (g kg ⁻¹)	166,80
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,80	Areia Total (g kg ⁻¹)	480,00
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,00	Silte (g kg ⁻¹)	103,0
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,15	Argila (g kg ⁻¹)	417,0
Sódio (cmol _c dm ⁻³)	0,08	Ds (g cm ⁻³)	1,27
H (cmol _c dm ⁻³)	2,20	PT (%)	50,83
SB (cmol _c dm ⁻³)	4,34	Classe textural	Argilo-arenosa
CTC (cmol _c dm ⁻³)	6,54		

SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação de bases; C: Carbono orgânico total; M.O: Matéria Orgânica do solo; Ds: Densidade do solo e PT: Porosidade total.

Para as características físicas do solo, foram coletadas amostras deformadas e indeformada na profundidade de 0-20 cm, em zig-zag, com o auxílio do trado e anel volumétrico, respectivamente. Nas amostras deformadas foram determinadas a análise de granulometria do solo, quantificando as frações areia, silte e argila pelo método do densímetro, segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Nas amostras indeformadas foram determinadas a densidade e a porosidade total do solo, sendo a densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico, conforme descrito em Grossman e Reinsch (2002). O solo contido em anel volumétrico foi levado para a estufa à 105°C, e foram secos até peso constante.

4.2.3 Descrição do ensaio experimental

Os tratamentos constaram de duas variedades de cana-de-açúcar, RB92579 e RB867515 adubadas com sete doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹) na forma de uréia em dose única no fundo do sulco de plantio. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso no esquema de arranjo fatorial 2 x 7 com quatro repetições que totalizou 56 parcelas experimentais.

Cada parcela experimental foi composta por seis sucos de 10 m de comprimento, espaçadas 1,0 entre si, totalizando 60m². A área útil foi delimitada em quatro linhas centrais com 08 metros de comprimento (32 m²), sendo destinadas as três linhas centrais para avaliação da produtividade final e uma linha para a avaliação da produção de biomassa da parte aérea.

Antes da implantação do experimento, foi aplicando glifosato para dessecar a soqueira remanescente e para facilitar a incorporação, com a grade aradora de 2 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT de 75%) calculados para elevar a saturação de bases para 70%. Em 19 de dezembro de 2015, foram abertos sulcos espaçados com 1,0 metro entre as linhas e foram semeados dois colmos sementes no fundo do sulco de plantio. Os colmos sementes foram distribuídos com a base do colmo junto com parte superior de outro colmo ("pé-com-ponta") e posteriormente foram cortadas em rebolos no tamanho médio de 30 a 40 cm, com a densidade de 3 a 4 gemas.

Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo de sulco, aplicando 120 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl), 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de Superfosfato Simples (SFS), 370 g de S, 10 g de B, 20 g de Cu, 500 g de Mn e 80 g de Zn adicionados na forma Sulfatos em um fertilizante mineral misto.

4.2.4 Medidas espectrais na folha

As medidas de refletância foram obtidas em campo com uso do espectrorradiômetro, modelo FieldSpec[®]4, acoplado com pistola de leitura e calibração. (Analytical Spectral Devices, ASD, 2005). Os dados foram coletados na fase inicial da germinação e perfilhamento que correspondeu aos 45 e 90 dias após o plantio

(DAP), a segunda avaliação foi realizada na fase que antecedeu o maior crescimento vegetativo aos 135 e por último a quarta avaliação foi realizada na fase de maturação aos 235 dias que antecedeu a colheita aos 330 DAP.

As medidas de refletância espectral foram realizadas em no terço médio do limbo foliar da primeira e terceira folha verde (folha+1 e folha+3), completamente expandidas e com a lígula da bainha visível (ABDEL-RAHMAN et al., 2010), em dias com poucas nuvens e com luminosidade, no horário das 11:00 às 14:30 (TIAN, et al., 2011; ABDEL- RAHMAN et al., 2010). As avaliações foram realizadas em três plantas localizadas na segunda linha do plantio que foi destinada a análise espectral, análise química do tecido vegetal e para determinar a biomassa da cana-de-açúcar.

Tomou-se como medida espectral de referencia, a refletância obtida com o painel Spectralon[®] de cor branca, tendo como finalidade a calibração inicial para posteriormente coleta das medidas espectrais das plantas (Apêndice B). Foi utilizada a variação espectral de 350- 2500 nm, sendo obtido resolução de 1,4 nm na faixa de 350-1000 nm e resolução de 2 nm na faixa de 1000-2500 nm (ABDEL-RAHMAN et al., 2010).

4.2.5 Análises de nitrogênio nas folhas e Determinação da biomassa

Nas mesmas folhas das plantas utilizadas para as leituras de refletância, foi determinado o teor do N. Durante o desenvolvimento da planta foi determinado o teor de N nas folhas diagnósticos +1 e +3, assim como quantificou-se a produção de biomassa da parte aérea. As coletas de foram realizadas em diferentes fases do ciclo da cultura (1^afase: brotação/perfilhamento, 2^afase: Crescimento e Desenvolvimento e 3^a fase: Maturação); sendo a primeira realizada no dia 02 de fevereiro de 2016 aos 45 dias após o plantio (DAP), a segunda coleta realizada no dia 22 de março de 2016 aos 90 DAP ambas na fase de perfilhamento da cultura. A terceira coleta foi realizada na fase considerada de crescimento rápido c no dia 18 de maio de 2016 aos 135 DAP e a última coleta foi realizada no dia 11 de agosto de 2016 aos 300 DAP que correspondeu à fase de maturação da planta.

Para avaliar a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar foram coletadas 3 folhas diagnósticos por parcela da folha+1 e +3, identificada como a primeira folha que apresenta a lígula e bainha visível (RAIJ; CANTARELLA, 1997) e a folha+3 identificada como a terceira folha com bainha e lígula visível (RAIJ; CANTARELLA, 1997; MALAVOLTA ,1992). Para a determinação do teor do N (g kg^{-1}), foi utilizado o

terço médio da folha descartando a nervura central, que posteriormente foi seca em estufa de circulação forçada a 65°C, em seguida triturada em moinho tipo bola e pesada a 0,1g em balança de precisão. A extração do N no tecido vegetal foi por digestão sulfúrica e a determinação foi por destilação, com auxílio do hidróxido de sódio (NaOH) e titulação com ácido clorídrico (HCl) a 0,01 mol (EMBRAPA, 2009).

Para determinar a biomassa seca da aérea da foi coletada todo material vegetal em um metro linear da segunda linha das parcelas experimentais. O material vegetal foi compartimentado em palmito, folha verde e colmo conforme identificação descrita em Oliveira et al. (2011a). As amostras foram pesadas ainda no campo em balança de precisão (0,05 g) e posteriormente subamostradas.

As subamostras foram secas em estufa com ventilação a 65 °C até atingirem massa constante e novamente pesadas para determinação da umidade do material. A partir do número de perfilhos contabilizados na área útil (3 linhas de soqueira com 8 metros de comprimento), da biomassa produzida nos compartimentos da planta e da umidade determinada em laboratório, foi calculada a produção de matéria seca (g planta⁻¹) de colmo, da parte aérea e a biomassa total da planta pela soma dos dois compartimentos.

4.2.6. Transformação do espectro

As medidas espectrais expressas em refletância foram submetidas a transformações utilizando o programa computacional, denominado *correlator* (*programa desenvolvido especificamente para o presente estudo*). No programa utilizou-se a linguagem escrita em Python 2.7 e diferentes métodos matemáticos para a criação de novos índices de vegetação. Assim, os dados de refletância originais sofreram 6 transformações matemáticas sendo utilizado o Logaritmo natural ($\ln(R\lambda)$), logaritmo de 10 ($\log_{10}(R\lambda)$), exponencial (a^x), fração inversa ($1/R\lambda$), refletância elevada ao quadrado ($R\lambda^2$) e a raiz quadrada ($\sqrt{R\lambda}$), a quais estão presente no programa computacional do espectrorradiômetro FieldSpec[®]4 e que podem melhorar as correlações com os comportamentos biofísicos da vegetação.

O teor de N das folhas e a biomassa da parte aérea da planta (g/ planta) foram correlacionados pelo teste de Pearson com os valores de refletância obtidos no campo e as transformações nos comprimentos de onda do visível (350–720 nm), do vermelho (630–690 nm) que corresponde às características conhecidas de pigmentos em vegetação (ASNER, 2008); do infravermelho próximo (720–1100 nm) que estão

relacionadas com as estruturas internas das folhas (TIAN et al., 2011; DEMATTÊ et al., 2004) e também com o comprimento de onda do infravermelho médio que tem como características uma forte relação com o conteúdo de água na planta.

Os comprimentos de onda (com e sem transformações da refletância) que apresentaram correlações positivas, significativas ($p < 0,05$) e com maior coeficiente de correlação ($r \geq 0,6$), foram selecionados para determinar os índices de N e de produção de biomassa da parte aérea.

4.2.7 Criações de índices que estimem nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da planta

Os índices de N e o de biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar foram determinados por meio de funções matemáticas, como razão e normalização, dos dados de refletância e/ou transformações dos comprimentos de onda, seguindo o método testado por Abdel-Rahman et al., (2010).

Para calcular os índices as quatro repetições de todos os tratamentos formaram uma média que representou os tratamentos. Para cada tratamento e tempo avaliado, 75% dos dados obtidos em campo, foram utilizados no desenvolvimento de modelos matemáticos sensíveis a variação da refletância para o mesmo comprimento de onda. Os 25% dos dados restantes foram separados para validação dos modelos desenvolvidos.

Nos modelos matemáticos gerados com 75 % dos dados, os índices calculados pela variação da refletância para o mesmo comprimento de onda, tiveram seus valores correlacionado com o teor de N e a produção de biomassa encontradas no campo, sendo escolhidas as equações que obtiveram significância dos parâmetros ($p < 0,05$) e maior coeficiente de determinação (R^2).

4.2.8 Validação dos índices

Para validação dos modelos que estimam os teores de N e a produção de biomassa, os 25% dos dados obtidos em campo, foram aplicados aos modelos selecionados, sendo comparado com o teor de N e a produção de biomassa estimadas pelas equações, assim foi validado as equações que calcularam resultados semelhantes aos encontrados em campo. Os modelos, após validação, foram avaliados o seu desempenho a partir do coeficiente de determinação R^2 e pelo erro quadrado médio (RMSE) segundo a equação utilizada por Dong et al., (2016):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{(1/h)}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}$$

$$\text{RMSE\%} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{M} \times 100}$$

No qual: n é representa o número de observações, M_i valores mensurados, E_i valores estimados e \bar{M} corresponde a média de todos os valores mensurados.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Índice de nitrogênio para cana-de-açúcar

4.3.1.1 Seleção de comprimentos de onda sensíveis ao nitrogênio

O teor de N nas folhas não apresentou diferença com as doses de N, porém variou com crescimento da cana-de-açúcar, sendo verificado os maiores valores nas fases iniciais (3,31 %) e os menores valores no final do ciclo de crescimento (1,28 %). A variação dos teores de N no ciclo da cultura obteve correlação com os comprimentos de onda nas três faixas distintas (375- 401, 572-705 e 1314-2500 nm) e apresentaram o $r \geq 0,6$ (Figura 2).

A maior correlação com o teor de N foi obtida nos comprimentos de ondas do infravermelho médio, na faixa de R1415-1478nm, com r igual a 0,854 (Figura 2). A utilização das transformações possibilitou melhoria nas correções das refletâncias de diferentes comprimentos de onda em relação ao teor de N, sendo observado uma melhoria na ordem de 10,84 % quando está observando o comprimento 620 nm que faz parte da região do visível (Figura 2).

Os comprimentos de onda que possui relação com os componentes químicos da planta e no presente caso com o teor de N foram observados na cultura do arroz, nos comprimentos 570-710 nm (TIAN et al., 2011; BLACKMER, et al., 1996), por Wu et al. (2000) nas culturas do arroz e milho para os comprimentos 700-900 nm, e também em nos comprimentos de 1690, 1730, 2060, 2130, 2180, 2240, 2300 e 2350 nm em diferentes vegetações (CURRAN, 1989; KUMAR et al., 2001; PEÑUELAS et al., 1994).

Pesquisa realizada por Mutanga et al. (2004) utilizando duas transformações espectrais (primeira derivada e remoção do contínuo) em cinco espécies de gramíneas, , também obtiveram melhores correlação com o N nas três faixas, nas quais foram as faixas no comprimento do visível juntamente com infravermelho próximo (R550-

750nm) e do infravermelho médio nos comprimentos de onda (R1634-1786 e R2006-2196 nm) obtiveram a maior correlação.

O nitrogênio por ser um dos constituintes da clorofila (RAMBO et al., 2004), a sua deficiência impedirá a formação das organelas que conseqüentemente afetará o comportamento espectral na faixa do visível que está relacionado com os pigmentos das folhas (ASNER, 2008). As estruturas internas das folhas influênciam na quantidade de energia refletida pelas plantas no comprimento de onda do infravermelho próximo, isso ocorre devido à influência da relação interfaces ar-água-células, tamanhos de células e organelas (GRANT, 1987; KNIPLING, 1970), espessura das camadas de celulares (BLACKBURN, 1999) ou até mesmo a relação entre a razão da superfície do mesófilo e a área foliar como foi encontrado por Slantion et al., (2001) utilizando 48 espécies. Uma das hipóteses das mudanças na estrutura interna das plantas pode estar relacionada com a aplicação da adubação nitrogenada que implicará em aumento na divisão celular e conseqüentemente na maior produção de biomassa vegetal (FERNÁNDEZ et al., 1994; JENSEN et al., 1990).

A partir destas informações dos comprimentos que apresentam mais sensibilidade na variação com os teores de N nas folhas; foram selecionados para gerar os índices que melhor explicam os parâmetros biofísicos das plantas.

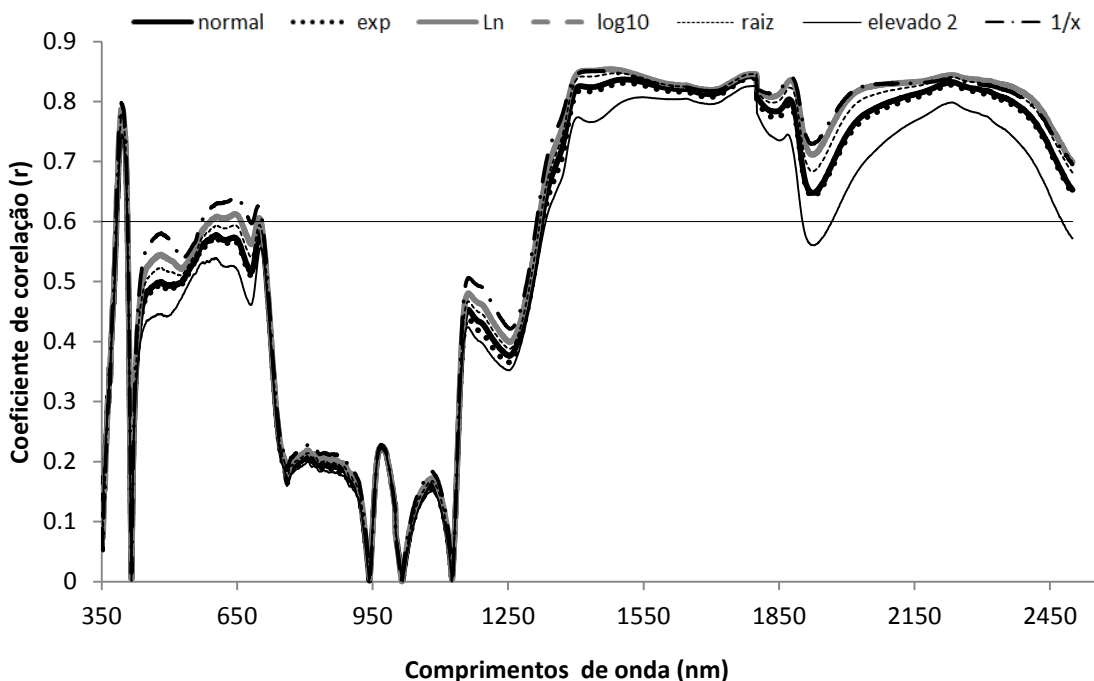


Figura 2. Coeficiente de correlação (r) dos comprimentos de onda em relação ao teor de N (%) nas folhas diagnósticos

4.3.1.2. Novos índices de nitrogênio em folha de cana-de-açúcar

Ao utilizar o programa (*correlator*), para gerar os índices e estabelecer o coeficiente de determinação (R^2) com limite mínimo de 0,7 para melhor explicação dos modelos com as variações dos teores de N nas folhas foi criado em torno de 27.261.025 modelos com dois parâmetros (comprimentos) que esses índices estimaram o N (%) na ordem de 0,70 até 0,86. Os melhores índices obtiveram R^2 de 0,83 e 0,86 (Tabela 2). Ao utilizar três parâmetros os índices não sofreram mudanças na melhoria do coeficiente de determinação, mantendo assim o R^2 de 0,86, no entanto, ao utilizar um índice com quatro parâmetros foi possível melhorar a correlação com o N nas folhas partindo de 0,86 para aproximadamente 0,89.

Tabela 2. Novos índices de N (%) das folhas diagnósticos da cana-de-açúcar cultivada em um latossolo amarelo

Parâmetros	Região sensível (nm)	Modelo	r	R^2
1-Parâmetro	R375-401		$\geq 0,6$	
	R572-705		$\geq 0,6$	
	R1314-2500		$\geq 0,6$	
2-Parâmetros		$\frac{\sqrt{1378} - \sqrt{1375}}{\sqrt{1860} / \sqrt{1405}}$		0.83
				0.86
3- Parâmetros		$(1860)**2+(1857)**2/(1405)**2$		0.86
		$(1857)**2/(1407)**2+\sqrt{(1407)}$		0.86
4- Parâmetros		$\exp(1857)+\text{Ln}(1651)/(1/1721)*\text{Ln}(1405)$		0.89
		$\exp(1857)+\text{Ln}(1405)/(1/1721)*\text{Ln}(1651)$		0.89

Os melhores índices que estimaram o N (%) nas folhas de cana-de-açúcar com valores superiores a 0,85 tiveram comportamentos lineares em relação à concentração de N mensurados (Figura 3). Esse comportamento foi observado por Tian et al., (2011), no qual obteve quinze novos índices para o nitrogênio em arroz, dos quais cinco obtiveram o comportamento linear crescente e também decrescente. Mesmos resultados foram encontrados por Abdel-Rahman et al. (2010) utilizando índices para determinar o N na cana-de-açúcar.

Quando se leva em consideração a correlação encontrada pelos índices, neste trabalho, foi apresentado uma maior correlação comparadas com a pesquisa desenvolvida por Abdel-Rahman et al. (2010), ao qual a melhor correlação correspondeu ao índice de R^2 de 0,71 e por Tian et al., (2011) que obteve uma maior R^2

de 0,84; ambos utilizando primeira derivada e remoção do contínuo como transformações dos dados.

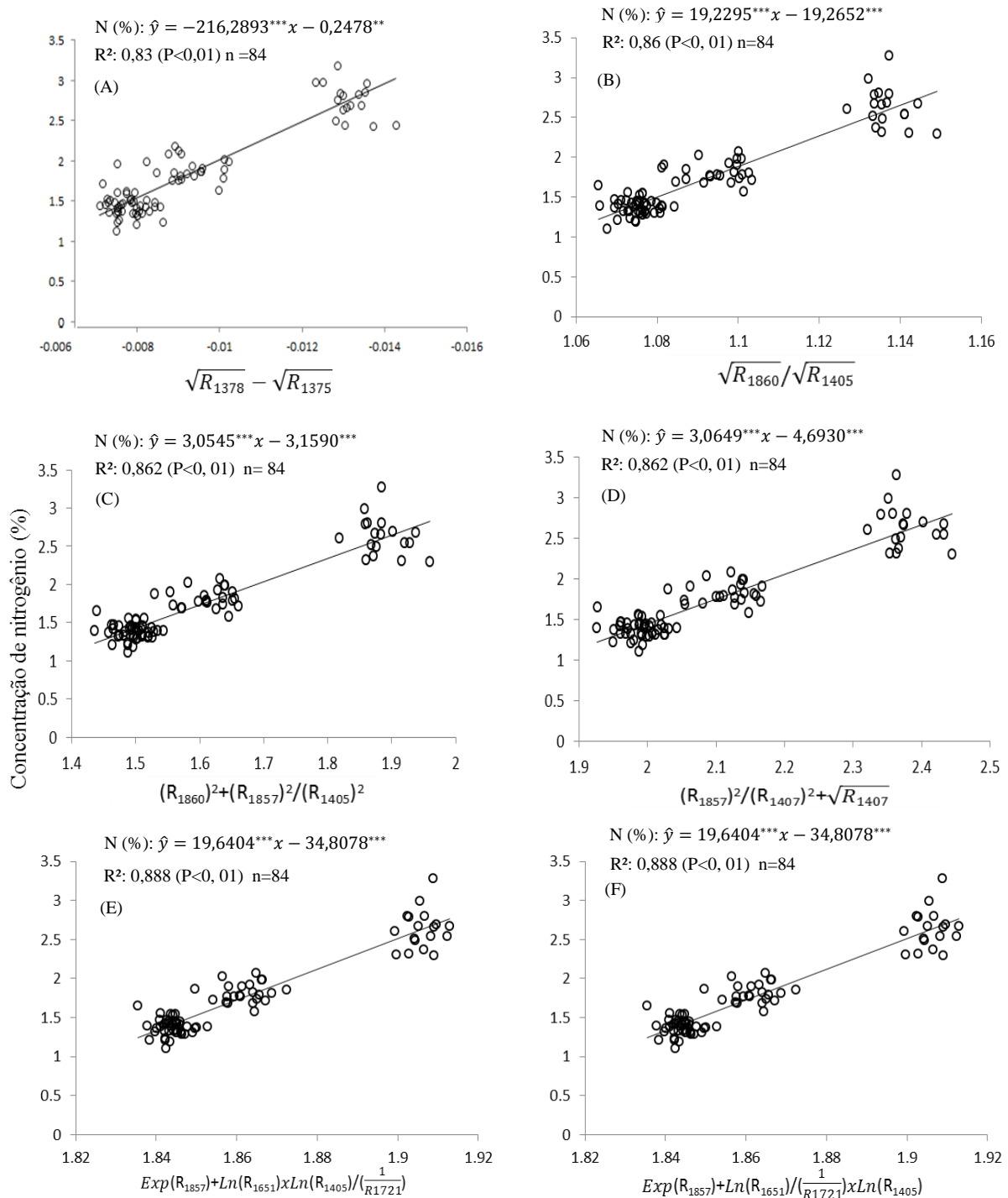


Figura 3. Relação entre concentração de N (%) e novos índices de N: (A e B) índices com dois parâmetros; (C e D) índices com três parâmetros e (E e F) com quatro parâmetros. ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade

Os comprimentos envolvidos nos novos índices encontrados são equivalente à banda de comprimento de onda do infravermelho médio, destacando os comprimentos 1375, 1378, 1405, 1407, 1651, 1721, 1857 e 1860 nm. Esses comprimentos segundo as diferentes pesquisas demonstram sensibilidade ao elemento nitrogênio, mostrando que os modelos que utilizam esses comprimentos respondem melhor a variação do N nas folhas das plantas (CURRAN, 1989; KUMAR et al., 2001; MUTANGA et al, 2004; PEÑUELAS et al., 1994). Indiferentemente desses resultados, Tian et al., (2011) e Abdel-Rahman et al. (2010) obtiveram melhores resultados, em grande parte, com comprimentos de ondas na banda do visível (418-481, 551-608 e 697-749 nm).

4.3.1.3. Validação dos índices de nitrogênios

Os resultados da validação dos novos índices de N para cana-de-açúcar estão expostos na (figura 4). Foram obtidos valores baixos de RMSE de 0,191, em relação ao N mensurado e o estimado, que equivalentes a 10,27% de erro em consideração a média dos dados (Figura 4 C) e em média 10,40% de RMSE para os demais índices, exceto o primeiro modelo com dois parâmetros envolvidos (Figura 4 A). Com os valores elevados de R^2 da validação em conjunto com o RMSE é notório a capacidade de previsão dos índices para o conteúdo de N nas folhas diagnóstico de cana-de-açúcar.

Quando leva em consideração o sensoriamento remoto, no qual as informações registradas no pixel possui a média das refletâncias de todos os alvos; sendo assim ao observar a média dos dados mensurados e estimados (1,85 e 1,87 %) possuem como resíduo -0,0192 que ao ser transformado em RMSE equivale a 0,0192 ou simplesmente 1,03% de erro.

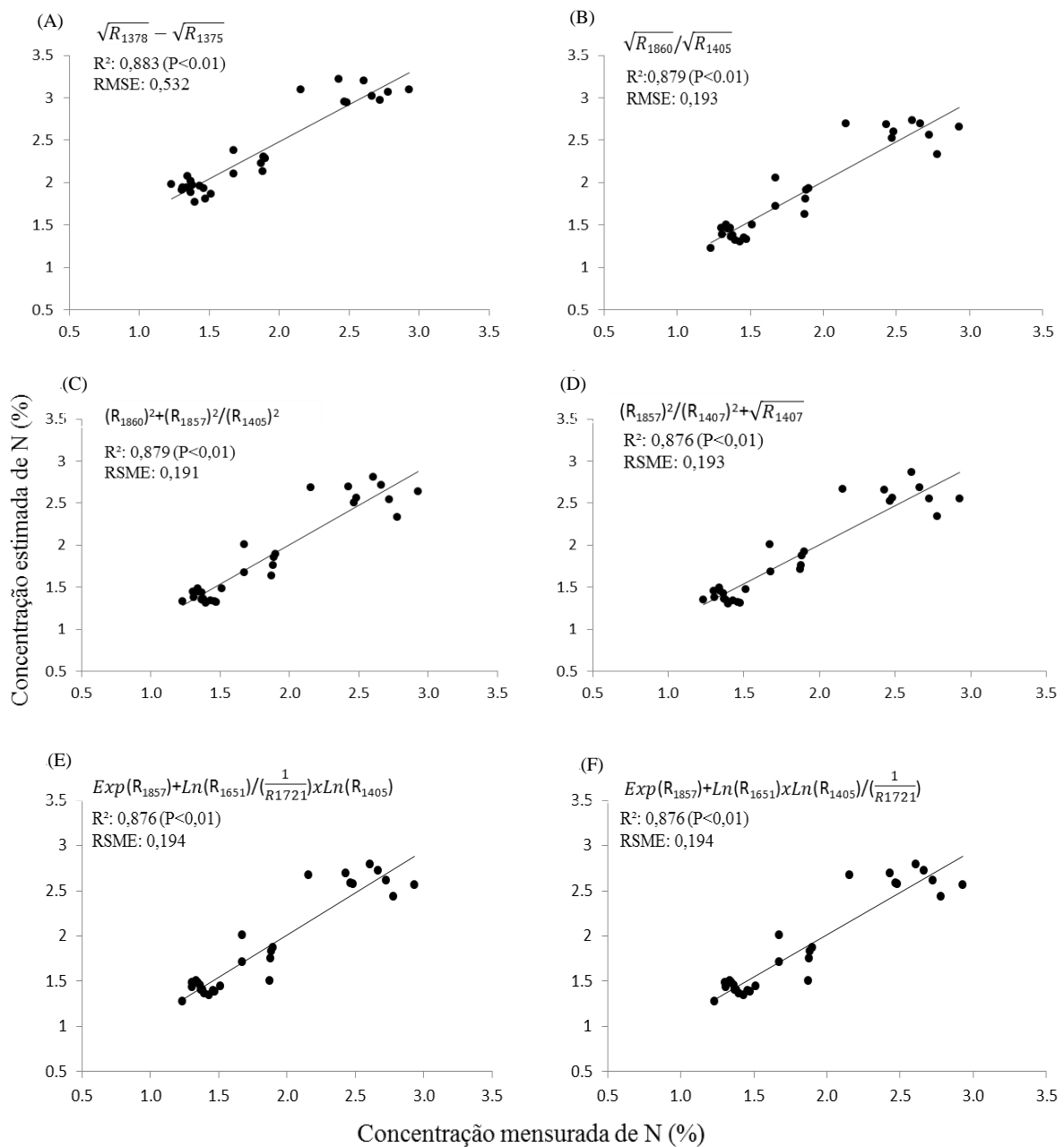


Figura 4. Relação entre o nitrogênio (%) mensurado e o estimando na folha diagnóstico da cana-de-açúcar para um conjunto de dados de amostras (n=28) correspondendo a 25% dos dados, utilizando a validação dos índices criados: (A e B) índices com dois parâmetros; (C e D) índices com três parâmetros e (E e F) com quatro parâmetros. ^{ns} não significativo, *,** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade

Os índices podem ser aplicados em técnicas do sensoriamento remoto como também serem utilizados em equipamentos portáteis, como por exemplo, o clorofilômetro que estimam através de modelos matemáticos e com os comportamentos espectrais das plantas, o conteúdo de clorofila com alta precisão na estimativa em diversas culturas.

Trabalhos realizados por Argenta et al., (2001) utilizando a cultura do milho, mostrou uma grande capacidade de estimar com precisão os conteúdos de clorofilas (total, a e b) com o coeficiente de correlação variando de 0,83 a 0,98, de 0,80 a 0,97, e de 0,72 a 0,98, respectivamente, sendo encontrado também correlações significativas com o conteúdo de N nas folhas, chegando a uma precisão de 0,66 a 0,91. Silva, (2014) utilizando o mesmo equipamento em árvores nativas encontrou modelos de coeficiente de determinação maiores que 0,80 e seu RMSE equivaleram a valores menores que 25%.

Outros trabalhos encontraram respostas positivas para a estimativas do conteúdo de clorofila nas folhas, como é o caso em respostas para a cultura do gergelim (RIGON et al., 2012) e em fruteiras (JESUS; MARENCO, 2008) que os coeficientes de determinação, para diferentes fruteiras, variaram para as espécies estudadas, no entanto, a estimativa clorofila corresponderam a 0,67 para o cupuaçú, 0,80 para urucum e o limão e 0,92 para araçá-boi. Com isso, fica evidente a capacidade de precisão dos índices de nitrogênios criados nesta pesquisa, levando em consideração que os demais trabalhos que utilizaram um equipamento portátil obtiveram coeficientes de determinação semelhantes, possibilitando assim uma criação de um novo equipamento que seja utilizado para estimar nitrogênio nas folhas diagnósticos da cana-de-açúcar sem que haja necessidade de envio das amostras de folhas para laboratórios, que implicará em destruição das mesmas para fins de análise.

O uso dos dados estimados para N e entre outros parâmetros podem ser aplicados no sensoriamento remoto pelo fato de que a copa das plantas se caracteriza como uma grande folha comparada a folha analisada pelo espectrorradiômetro. Essa teoria é conhecida da “Big Leaf” e possibilita o uso da técnica da espectrorradiometria para fins do sensoriamento remoto.

4.3.2 Índice de biomassa da cana-de-açúcar

4.3.2.1 Seleção de comprimentos sensíveis para a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA)

A matéria seca da parte aérea da planta (MSPA ou biomassa) variou no decorrer do tempo o seu conteúdo de 8,20 a 410 g planta⁻¹ para os tempos de 45 e 235 dias respectivamente.

Indiferente das concentrações de N nas folhas, a relação das refletâncias de todos os comprimentos de onda com parâmetro físico da planta, que neste caso é a biomassa,

mostrou que a banda de comprimentos que melhor representa essas mudanças na biomassa da cana-de-açúcar no decorrer do tempo, consiste na faixa do visível, podendo ser dividido em duas bandas, sendo que a primeira vai do comprimento 465-507 nm e segunda banda definida foi a partir do comprimento de onda dos 562-724 nm. Ambas as bandas de comprimentos de ondas são conhecidas como forte influência das características biofísicas das plantas. Segundo Yuan & Zhang (2007) a diminuição da refletância de forma ordenada ocorre com a diminuição da biomassa, principalmente no comprimento de onda do 570 nm.

Os comprimentos de onda do visível, principalmente na região do vermelho (630 a 690 nm) a qual está relacionada com a absorção da radiação eletromagnética pelos pigmentos da vegetação, juntamente aos comprimentos de onda do infravermelho próximos (720-1.100 nm), mostram sensibilidade na estimativa da produção da biomassa quando se utiliza em normalização, como é o caso do índice NDVI, que vem sendo utilizado, na grande maioria dos estudos, para avaliar e estimar a biomassa e o estágio de desenvolvimento da planta (GROHS et al., 2009; BREDEMEIER et al., 2013).

Neste trabalho o comprimento de onda que melhor representou a variação da biomassa correspondeu ao comprimento do 676 nm utilizando a transformação $(1/x)$ com um coeficiente de correlação (r) aproximadamente de 0,734, correspondendo ao comprimento do vermelho, que é utilizado em muitos trabalhos para determinar as condições biofísicas da vegetação em normalizações com os comprimentos de onda do infravermelho próximo. Foi observado que dois picos nos coeficientes de correlações foram registado na banda do visível, sendo a primeira com r de 0,68 na região espectral do azul (440- 480 nm) e a segunda com 0,73 na região espectral do vermelho (Figura 5); mostrando uma maior sensibilidade para a variação da produção de biomassa da cana-de-açúcar.

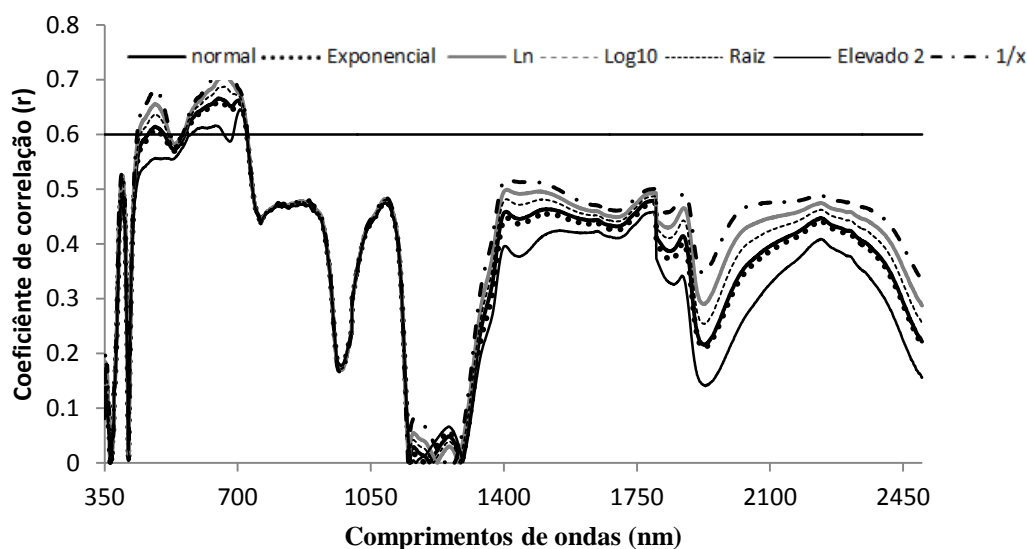


Figura 5. Coeficiente de correlação (r) dos comprimentos de onda em relação a produção de biomassa da cana-de-açúcar no decorrer do ciclo e cultivada em um latossolo amarelo

4.3.2.2 Novos índices para biomassa da cana-de-açúcar

Ao utilizar o programa (*correlator*), para gerar os índices e estabelecer coeficiente de determinação (r^2) com limite mínimo de 0,7 para melhor explicação dos modelos com as variações dos teores de N nas folhas foi criado em torno de 12 modelos com $R^2 > 0,7$; sendo os quatro melhores descritos na (Tabela 3).

O programa *correlator* não chegou a desenvolver índices com quatro parâmetros, mas só observando os novos índices criados (2 parâmetros), é possível ver o potencial uso do programa na criação dos índices de vegetação. Todos os modelos encontrados possui como transformação a razão inversa ($1/x$), na qual se destaca o primeiro modelo com R^2 de 0,718 e em relação aos comprimentos de ondas envolvidos, correspondeu à banda visível especificamente a banda do azul (440 – 485 nm) (Tabela 3).

Ao utilizar os comprimentos que mostraram com coeficientes de determinação maiores na região espectral do azul e do vermelho (Figura 5), podemos verificar que os modelos criados (Figura 6 C e D), mesmo não tendo coeficientes maiores que os criados pelo programa *correlator*, possui grande potencial no seu uso devido que os comprimentos envolvidos podem ser encontrados em bandas de satélites conhecidos, como é o caso do: LANDSAT 8 sensor OLI cujas bandas 2 e 4 correspondem a faixas de comprimentos de (450–510 nm) e (640–690 nm), respectivamente. Além do

LANDSAT outros satélites gratuitos e pagos (Rapideye e Quickbird) encontram as faixas correspondendo aos comprimentos envolvidos nos novos modelos.

Pesquisa realizada por Yuan & Zhang (2007) estudando comportamento espectral de uma espécie aquática (*Vallisneria spiralis*) em relação à produção de biomassa, também encontrou respostas lineares com as faixas de comprimentos de onda do visível (500- 650nm) e infravermelho próximo (700-900nm).

Tabela 3. Novos índices para biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de N e cultivada em um latossolo amarelo

Parâmetros	Região sensível (nm)	Modelo	r	R ²
1-Parâmetro	R465-507		≥ 0,6	
	R562-727		≥ 0,6	
2-Parâmetros		(1/465)-(1/474)		0.718
		(1/475)-(1/465)		0.710
		(1/465)-(1/479)		0.706
		(1/464)-(1/474)		0.704

O comportamento dos índices em relação à produção de biomassa foi ajustado em um modelo linear com coeficientes de determinações equivalentes a 0,718, 0,710, 0,538 e 0,672 (Figura 6).

A utilização de comprimentos isolados para poder estimar a biomassa da cana-de-açúcar respondeu 53% de toda a mudança na produção da biomassa com a cultura, no entanto, a utilização de novos índices possibilitou uma melhor resposta correspondendo a modelos que explicam acima de 65%.

Molin et al., (2010) utilizando sensor ótico para registrar o comportamento espectral e NDVI como índice de vegetação também encontrou respostas lineares positivas em relação a produção final de colmos da cana-de-açúcar e seus coeficientes de determinação variaram de 0,74 e 0,93.

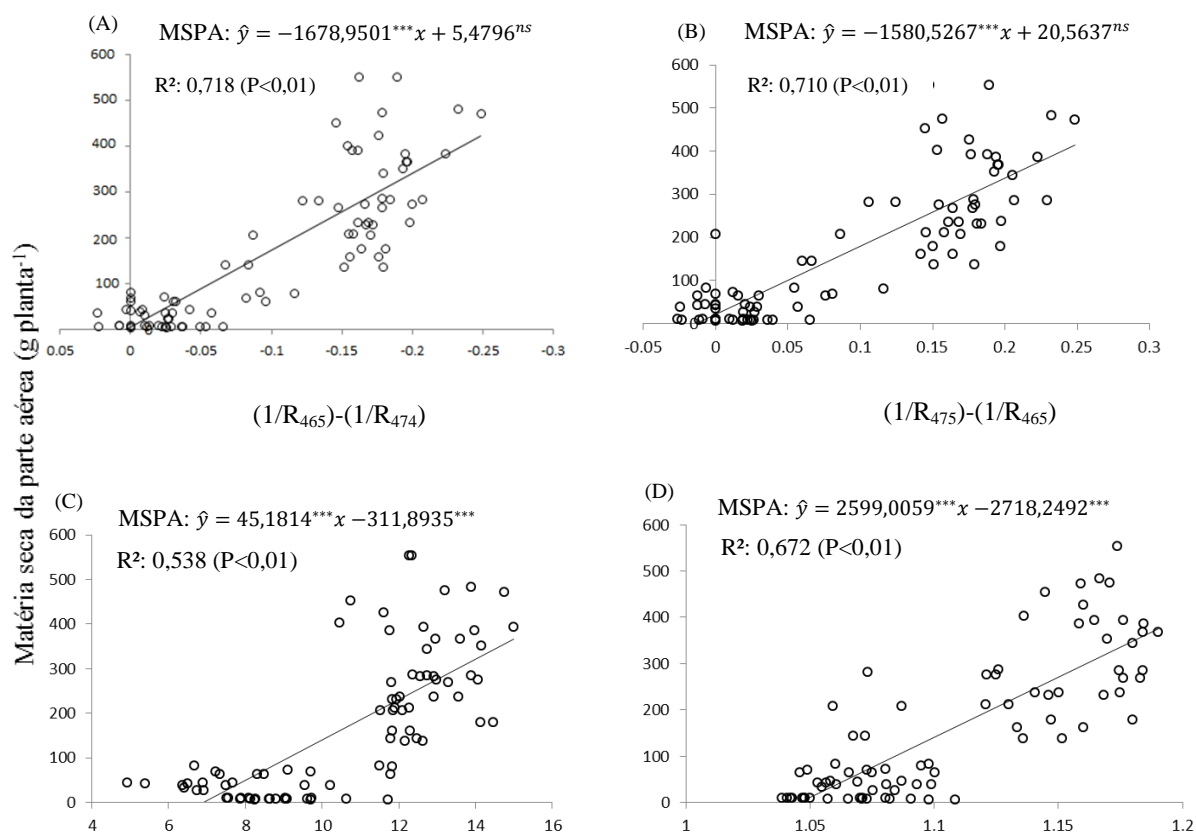


Figura 6. Relação entre matéria seca da parte aérea (MSPA ou biomassa) e novos índices com dois parâmetros: (A e B) índices com dois parâmetros do comprimento de onda do azul; (C e d) índice com um e dois parâmetros, respectivamente. ^{ns} não significativo, *,** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade

A maioria dos estudos envolvendo índice de vegetação para estimar biomassa é utilizada, na grande maioria, em espécies florestais; no entanto, esses estudos têm sido pouco utilizados para culturas agrícolas. Dentre os índices que mais utilizam, destaca-se o NDVI. Com isso, há uma maior necessidade para a criação de novos índices que possam estimar os comportamentos biofísicos de culturas agrícolas, como destaque a cana-de-açúcar por ser um dos carros chefes da economia brasileira.

4.3.2.3. Validação dos novos índices para a biomassa da cana-de-açúcar

Os valores da validação dos índices de biomassa da cana-de-açúcar estão expostos na (Figura 7). Em relação o coeficiente de determinação (R^2), os índices mostraram um aumento em comparação ao R^2 encontrados na criação dos modelos. No entanto os valores de RMSE apresentaram muita variação na estimativa da biomassa.

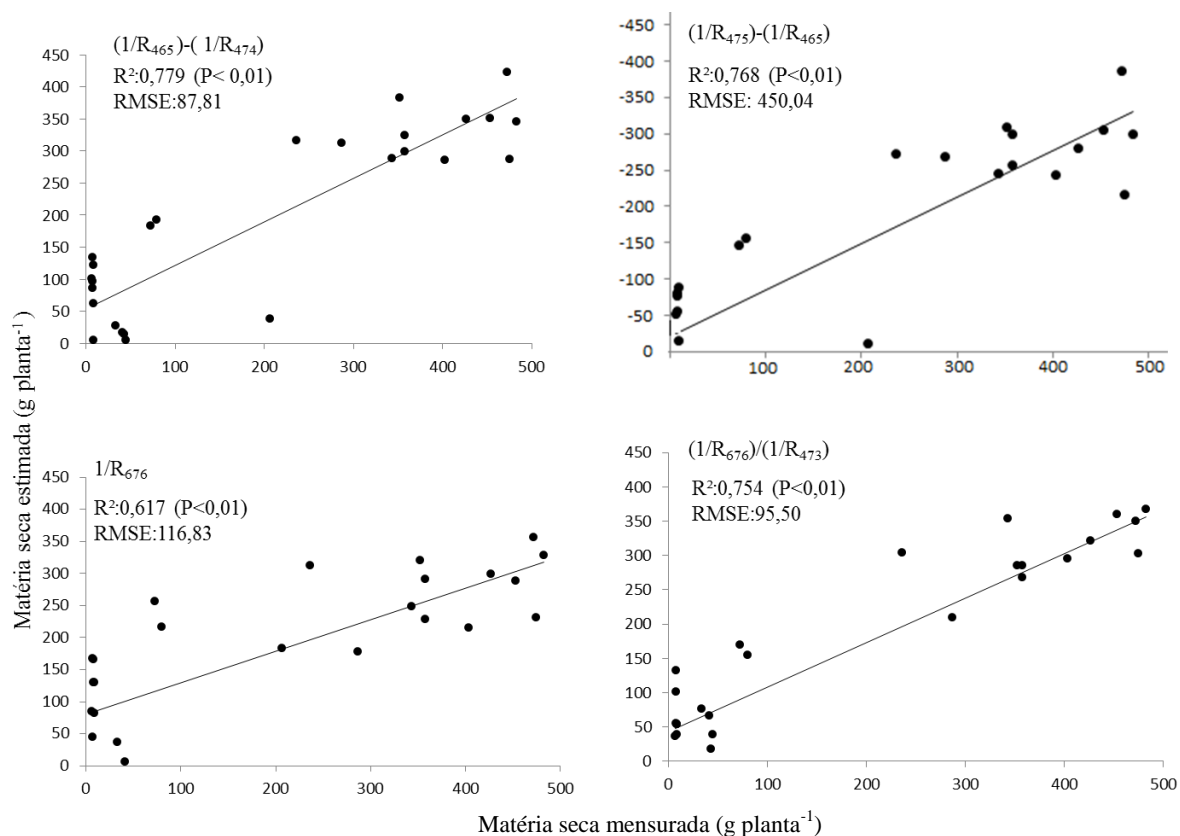


Figura 7. Relação matéria seca da parte aérea (g planta⁻¹) mensurado e o estimando da cana-de-açúcar para um conjunto de dados de amostras (n=28) correspondendo a 25% de todos os dados, utilizando a validação dos índices criados: (A e B) índices com dois parâmetros do comprimento de onda do azul; (C e d) índice com um e dois parâmetros, respectivamente. RMSE= Erro médio da raiz quadrada

Quando se leva em consideração a média de todas as biomassas encontradas mesuradas em relação às médias das biomassas estimadas, o RMSE corresponde a 12,79% de erro; no entanto é necessário mais calibrações em campo para poder haver uma melhor validação dos modelos criados.

4.4 CONCLUSÕES

1. Os comprimentos que melhor responderam a variação da concentração de N nas folhas diagnósticos da cana-de-açúcar encontram-se, na grande maioria, na banda espectral do infravermelho médio, principalmente na faixa de 1415-1478nm com r de 0,854.
2. As diferentes transformações das refletâncias responderam melhor a sensibilidade ao N em comparação com a refletância original.

3. Os modelos criados para a estimativa da concentração de N nas folhas diagnósticos apresentaram coeficientes de determinação (r^2), em média maiores que 0,85, sendo superiores a resultados de trabalhos realizados anteriormente com cana-de-açúcar.
4. Os comprimentos de onda que melhor responderam as mudanças de biomassa da cana-de-açúcar foram na banda do visível (465-507nm e 562-724nm).
5. Foram obtidos modelos que apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,65.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E.M.; AHMED, F. B.; BERG, M. V. D. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede v. 12, p.52–57, 2010.
- AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K.C.A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, p. 2455-2469, 2011.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; BURGOS, N.; LOPES, O.F.; SILVA, F.H.B.B.; MEDEIROS, L.A.R.; MELO FILHO, H.F.R.; PARAHYBA, R.B.V.; CAVALCANTI, A.C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F.B.R.; LEITE, A.P.; SANTOS, J.C.P.; SOUSA NETO, N.C.; SILVA, A.B.; LUZ, L.R.Q.P.; LIMA, P.C.; REIS, R.M.G.; BARROS, A.H.C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Boletim de Pesquisa Embrapa solos, n.11, 2000.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.13, n.2, p. 158-167, 2001.
- ASNER, G.P. **Hyperspectral remote sensing of canopy chemistry, physiology, and biodiversity in tropical rainforests**. In: Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G.A. (Eds.), *Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests*. Taylor and Francis Publishers, London, UK, p. 261–296, 2008.
- BLACKBURN, G.A. Relationship between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of Deciduous Broadleaves. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.70, p. 224-27, 1999.

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

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**, Santa Maria, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.

CPRM- Serviço geográfico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Igarassu**. p.22, 2005.

CURRAN, P. J. Remote Sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 30, p. 271-278, 1989.

DEMATTE, J.A.M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R.; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p. 95-112, 2004.

DONG, T.; LIU, J.; QIAN, B.; ZHAO, T.; JING, Q.; GENG, X.; WANG, J.; HUFFMAN, T.; SHANG, J. Estimating winter wheat biomass by assimilating leaf area index derived from fusion of Landsat-8 and MODIS data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 49, p. 63-74, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas de Solos, 212p, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da agricultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

ESTEVES, B. S.; SOUSA, E.F.; MENDONÇA, J.C.; LOUSADA, L.L.; MUNIZ, R.A.; SILVA, R.M. Variação do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo de cana-de-açúcar no Nordeste Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, p. 663-670, 2012.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E. et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, Cambridge, v. 15, n.9, p.1867-1884, 1994.

FONSECA, E.L.; ROSA, L.M.G.; FONTANA, D.C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p.365-371, 2002.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington v.4, p. 11-20, 1965.

GRANT, L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.22, p.309-322,1987.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p. 101-112, 2009.

GROSSMAN, R. B.; Reinsch, T. G.. *Bulk density and linear extensibility*. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. **Madison, Soil Science of Society of America**, p. 201-228, 2002.

JESSEN, A.; LORENZEN, B.; SPELLING-OSTERGAARD, H.; KLOSTER-HVELPLUND, E. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. **International Journal of Remote Sensing**, Cambridge, v.11, n.10, p.1890-1820, 1990.

JESUS, S.V.; MARENCO, R.A. O SPAD-502 como alternativa para determinação dos teores de clorofila em espécie frutíferas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 815-818, 2008.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.1, p. 155-159, 1970.

KUMAR, L.; SCHIMIDT, K.S.; DURY, S.; SKIDMORE, A.K. Imaging spectrometry and vegetation science. In: VAN DER MEER, F. & JONG, S.M. *Imaging spectrometry*. Dordrecht. The Netherlands: **Kluwer Academic Publishing**. p. 111-155, 2001.

MA, B.L.; DWYER, L. M.; COSTA, C.; COBER, E. R.; MORRISON, M.J. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.1227-1234, 2001.

MALAVOLTA, E. ABC da análise de solo e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: **Ceres**, 1992.

MOLIN, J. P.; FRASSON, F. R.; AMARAL, L. R.; POVH, F.P.; SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a respostas da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n.12, p.1345-1349, 2010.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K.; PRINS, H.H.T. Predicting in situ pasture quality in the kruger national park, South Africa, using continuum-removed absorption features. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.89, p. 394-408, 2004.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, M.B.G.S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.3, p.579-588, 2011

PEÑUELAS, J.; GAMON, J.A.; FREDEEN, A.L.; MERINO, J.; FIELD, C.B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 48, p.135-146, 1994.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índices de vegetação do sensor modis na estimativa da produtividade de agricultura de agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p. 789- 795, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Ed., São José dos Campos-SP, 128p, 2010.

RAIJ, B.van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. eds. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Fundação IAC, 1997. p.233-243. (Boletim,100).

RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; BAYER, C. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.1279-1287, 2004.

RIGON, J.P.G; BELTRÃO, N.E.M.; CAPUANI, S.; BRITO NETO, J.F.; SILVA, F.V.F. Análise não destrutiva de pigmentos fotossintéticos em folhas de gergelim. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 258-261, 2012.

ROSSATO, O.B.; ANDRÉ- SANCHEZ, P.; GUERRA, S.P.S.; CRUSCIOL, C.A.C. Sensores de reflectância e fluorescência na avaliação de teores de nitrogênio, produção de biomassa e produtividade do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.8, p.1133-1141, 2012.

SLANTION, M.R.; HUNT JR., E.R.; SMITH, W.K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, Saint Louis, v.88, n.2, p. 278-284, 2001.

SILVA, D.V. **Métodos não destrutivos para estimativas de clorofilas como indicadores da qualidade de mudas de espécies florestais**. Ílheus-BA: UESC, 2014, p.62. (Dissertação de mestrado).

SILVA, E. A.; MARANGON, G.P.; DESSBESELL, L.; MORAIS, W.W.; LIPPERT, B.D.; PEREIRA, R.S. Caracterização espacial na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 285-292, 2012.

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; RAIJ, B. van.; SILVA, C. A. ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; PÉREZ, D. V.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; ABREU, M. F.; BARRETO, W. O. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. In: SILVA, F. C. (Org). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 2009. p.75-169. (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia).

SOIL SURVERY STAFF.2014. Keys to Soil Taxonomy. 12nd edition. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.

TIAN, Y.C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.X.; HANNAWAY, D.B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.120, p. 299–310, 2011.

YUAN, L.; ZHANG, L. The spectral responses of a submerged plant *Vallisneria spiralis* with varying biomass using spectroradiometer. **Hydrobiologia**, The Hague, v. 579, p. 291-299, 2007.

WU, C.; XIANG, Y.; ZHENG, L. Estimating chlorophyll density of crop canopies using hyperspectral data. **Journal Remote Sensing**, Basel, v. 4, p. 228–232, 2000 (in Chinese with English Abstract).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos com base na nutrição mineral em grandes culturas, como é o caso no Brasil da cana-de-açúcar, utilizando a técnica da espectrorradiometria, ainda caminha lentamente em relação a pesquisas promovidas por outros países; sendo que, essa tecnologia proporciona adquirir informações precisas da nutrição, possibilitando assim um melhor aproveitamento do manejo da adubação. Quando se leva em consideração a nutrição de N, por ser o segundo nutriente mais absorvido pela cana-de-açúcar; estudos com a técnica da espectrorradiometria juntamente com o sensoriamento remoto, podem garantir um melhor desempenho agrícola e industrial quando se trata de um ajuste adequado do manejo da adubação nitrogenada e por garantir uma correção da sua necessidade nutricional no mesmo ciclo.

Para o uso da técnica da espectrorradiometria como alternativa de análise nutricional em cana planta é necessário uma resposta positiva em relação à aplicação da adubação nitrogenada. Na literatura há uma grande discussão em relação à eficiência da adubação nitrogenada em cana planta, pelo motivo de que diversos trabalhos não mostrarem efeitos positivo; no entanto, nesta pesquisa as informações a respeito do efeito da adubação nitrogenada na produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), no teor de N nas folhas diagnósticos (folha +1 e folha+3) e na produtividade agrícola e industrial em cana planta, refutaram esta hipótese mostrando que existe necessidade de aplicação da adubação nitrogenada em cana planta por observar efeitos positivos e que esses efeitos pôde ser detectados pela técnica da espectrorradiometria, o que tornou possível chegar às seguintes considerações:

1. A aplicação de diferentes doses de N promoveu um incremento na produção de MSPA e que conseqüentemente os teores de N nas folhas diagnósticos foram influenciados pela diluição do nutriente; sendo maior observado este efeito aos 135 DAP.
2. Com a diluição do N nas folhas diagnósticos pode determinar o nível crítico através da CDCN que mostrou que teores de N acima de 16 g kg^{-1} aos 135 DAP, há uma queda na produção de MSPA.
3. A dose de N responsável pelo máximo retorno econômico em cana planta para as duas variedades estudada foi de 60 kg ha^{-1} .

4. A exigência nutricional de N para produzir 1 TCH mostrou que na variedade RB92579 a exigência é de 1,48 kg de N, enquanto a variedade RB867515 obteve uma menor exigência de 1,34 kg de N.

5. Quando se trata na detecção das mudanças biofísicas da cana-de-açúcar, a espectrorradiometria foi possível determinar que os comprimentos que melhor responderam a variação do teor de N nas folhas (g kg^{-1} ou %) localizam-se na faixa dos comprimentos de onda do infravermelho médio principalmente os comprimentos entre 1415-1478 nm com uma correlação (r) de 0,854.

6. Os novos índices que representaram a mudança no teor de N nas folhas possuem coeficientes de determinação (r^2), em média, maiores que 0,85; sendo superiores a resultados de trabalhos realizados anteriormente com cana-de-açúcar e que através da resposta do CDCN com nível crítico inferior a 16 g kg^{-1} , pode ser utilizada a técnica com precisão para uma análise nutricional da cultura da cana-de-açúcar.

7. Os comprimentos de ondas que melhor respondeu a mudança da produção de MSPA encontram-se na faixa do visível e ao ser criados novos índices a resposta a essas mudanças pôde ser explicada, em média, a 71%.

Com a criação de novos índices que possui precisões na avaliação nutricional de N em cana-de-açúcar, possibilita o uso dessas informações para a técnica do sensoriamento remoto, que obterá grandes áreas de observações e maior rapidez no diagnóstico nutricional; como também as informações obtidas podem ser utilizadas para uma criação de novo equipamento que realize uma leitura dos teores de N nas folhas diagnósticos sem a necessidade de degradação do material amostrado.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise de variância (ANOVA) da produção de MSPA de duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB867515) submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada

ANOVA Biomassa	
	F
Variedade	0,32
Dose	2,40**
Tempo	3197,3***
Var x Dose	0,96ns
Var x T	7,02***
Dose x T	1,25ns
Var x T x Dose	1,25ns
AIC	-742.9
Modelo	ANTE (1)

^{ns}Não significativo, *** significativo a 1% de probabilidade. AIC: Critério de Informação de Akaike-Ante (1) Ante-Dependence. Obs.: utilizados os dados transformados pela potência de 0,1.

APÊNDICE B – Espectrorradiômetro realizando leituras espectrais na folha diagnóstica da cana-de-açúcar.

