

INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
AGRONOMIA

SENSORES PARA ESTIMATIVA DE NITROGÊNIO E  
PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES EM SORGO  
SACARINO

Autor: Warlles Domingos Xavier

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

Rio Verde – GO

Agosto – 2021

INSTITUTO FEDERAL GOIANO CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
AGRONOMIA

SENSORES PARA ESTIMATIVA DE NITROGÊNIO E  
PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES EM SORGO  
SACARINO

Autor: Warlles Domingos Xavier

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

Coorientadora: Profa. Dra. Virgínia Damin

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias – Agronomia no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde. Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO

Agosto – 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

Xs Xavier, Warlles Domingos  
SENSORES PARA ESTIMATIVA DE NITROGÊNIO E  
PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES EM SORGO SACARINO /  
Warlles Domingos Xavier; orientador Gustavo  
Castoldi; co-orientadora Virgínia Damin. -- Rio  
Verde, 2021.  
89 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia)  
-- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Nitrogênio. 2. Teor de clorofila. 3.  
Clorofilômetro portátil. 4. Produtividade de massa  
seca. I. Castoldi, Gustavo, orient. II. Damin,  
Virgínia, co-orient. III. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- Tese  Artigo Científico  
 Dissertação  Capítulo de Livro  
 Monografia – Especialização  Livro  
 TCC - Graduação  Trabalho Apresentado em Evento  
 Produto Técnico e Educacional - Tipo: \_\_\_\_\_

Nome Completo do Autor: **WARLLES DOMINGOS XAVIER**

Matrícula: **2016202320140050**

Título do Trabalho: **SENSORES PARA ESTIMATIVA DE NITROGÊNIO E PIGMENTOS FOTOSINTETIZANTES EM SORGO SACARINO**

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: **09/09/2021**

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

**Rio Verde - GO, 09/10/2021.**

Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 68/2021 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## **ATA Nº/79**

### **BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE**

Aos nove dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e um, às 07:30h (sete horas e trinta minutos), reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Orientador), Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno), Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares (Avaliador interno), Prof.<sup>a</sup> Dra. Virgínia Damin (Avaliadora externa), Prof.<sup>a</sup> Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Avaliadora externa), Prof. Dr. Carlos Antonio Costa do Nascimento (Avaliador externo), sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência do IF Goiano - Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **WARLLES DOMINGOS XAVIER**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Gustavo Castoldi, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o autor da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora em três vias de igual teor.

Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Presidente)

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno)

Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares (Avaliador interno)

Prof.<sup>a</sup> Dra. Virgínia Damin (Avaliadora externa)

Prof.<sup>a</sup> Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Avaliadora externa)

Prof. Dr. Carlos Antonio Costa do Nascimento (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Virgínia Damin, Virgínia Damin - Outros - Instituto Federal Goiano (1)**, em 18/08/2021 09:13:56.
- **Mellissa Ananias Soler da Silva, Mellissa Ananias Soler da Silva - Professor Avaliador de Banca - Embrapa Arroz e Feijão (00348003001435)**, em 11/08/2021 12:31:49.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - UCPG-RV**, em 09/08/2021 15:26:27.
- **Frederico Antonio Loureiro Soares, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 09/08/2021 14:39:27.
- **Carlos Antonio Costa do Nascimento, Carlos Antonio Costa do Nascimento - Outros - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1)**, em 09/08/2021 13:39:29.
- **Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 09/08/2021 13:28:39.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 297296  
Código de Autenticação: a354361c6f



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3620-5600

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser fiel em todos os momentos da minha caminhada.

A toda a minha família pelo apoio e, principalmente, pelo amor incondicional.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, em especial ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, por fornecer infraestrutura necessária para o desenvolvimento da pesquisa e para minha formação profissional.

À Fapeg e ao Projeto Nucleus, pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro para realização da pesquisa durante o período do doutorado.

À Escola de Agronomia da UFG, campus Goiânia e a Embrapa Arroz e Feijão, pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho de tese, no âmbito do projeto Nucleus, pelo apoio na condução dos experimentos e análises laboratoriais.

Ao professor Dr. Gustavo Castoldi, pelos ensinamentos, incentivo, orientação concedida e pelo exemplo de dedicação e seriedade com o qual conduz seus trabalhos. Tê-lo como orientador, foi mais que um privilégio para mim.

Ao professores Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues e a Dra. Virgínia Damin, pela orientação, disposição e pelo aprendizado adquirido durante o curso.

Agradeço a todos que colaboraram, de forma direta ou indireta, na execução deste trabalho.

A todos, obrigado.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

**Warlles Domingos Xavier** – Nascido em Alto Araguaia - MT em 26/01/1988, graduado em Agronomia em 2012 pela Universidade Estadual de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Cáceres. Durante sua graduação em agronomia, foi bolsista de iniciação científica (PIBIC), e desenvolveu trabalhos relacionados à avaliação dos atributos físicos do solo em diferentes manejos e sistemas de uso agrícola, envolvendo avaliações de resistência mecânica à penetração no solo e curva de retenção de água em ambientes compactados. Possui mestrado em agronomia pela Universidade Federal de Goiás (UFG), campus Jataí, com trabalhos relacionados ao manejo da adubação potássica em sistemas de alto potencial produtivo sob o cultivo em sucessão de soja e milho. Durante sua graduação e pós-graduação em agronomia, participou de vários congressos, reuniões e simpósios correlatos as práticas agrícolas e manejos sustentáveis. Foi professor convidado nos Programas de Pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho e Especialização em Solos e Nutrição de Plantas do Centro Universitário de Mineiros (Unifimes), onde é membro do Comitê Avaliador da Revista Interação Interdisciplinar. Atualmente, é doutorando em ciências agrárias (agronomia) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, com pesquisas relacionadas à estimativa indireta do status de nitrogênio nas folhas do sorgo sacarino por meio de leituras com sensores de pigmentos fotossintetizantes, em diferentes estádios de desenvolvimento da planta e tipos de solo.

## ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	x
RESUMO GERAL .....	i
GENERAL ABSTRACT .....	i
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 O sorgo sacarino.....	3
2.2 Adubação nitrogenada no sorgo sacarino .....	5
2.3 Uso de medidores portáteis de clorofila no manejo da adubação nitrogenada ..	7
2.4 Referências Bibliográficas .....	9
3. OBJETIVOS .....	16
4. CAPÍTULO I .....	17
Medidor portátil de clorofila na avaliação indireta de pigmentos fotossintetizantes e do teor de nitrogênio em sorgo sacarino.....	17
Resumo.....	17
Abstract .....	18
4.1. Introdução .....	18
4.2. Material e Métodos .....	20
4.3. Resultados e Discussão .....	23
4.3.1 Parâmetros avaliados após a adubação de semeadura (V5) .....	23
4.3.1.1 Relação entre os índices de clorofila (método destrutivo e não destrutivo e efeitos das doses de N na planta .....	23
4.3.1.2 Biomassa e teor de clorofila em resposta a adubação com N.....	25
4.3.2 Parâmetros avaliados após a aplicação de N em cobertura (V9).....	27

4.3.2.1 Relação entre os índices de clorofila (método destrutivo e não destrutivo) e efeitos das doses de N na planta.....	27
4.3.2.2 Biomassa e conteúdo de clorofila em resposta a adubação com N.....	30
4.3.3 Análises biométricas e de produtividade (colheita).....	33
4.4. Conclusões .....	36
4.5. Agradecimentos.....	36
4.5. Referências Bibliográficas .....	36
5. CAPÍTULO II .....	43
Estádio de desenvolvimento e medidor portátil de clorofila mais eficiente na avaliação indireta de pigmentos fotossintéticos no sorgo sacarino.....	43
Resumo.....	43
Abstract .....	44
5.1. Introdução .....	45
5.2. Material e métodos.....	47
5.3. Resultados e discussão .....	49
5.3.1 Conteúdo de clorofila extraível, teor de N e biomassa total após doses de N.....	49
5.3.2 Relação entre clorofila extraível em DMSO e leituras com sensores .....	53
5.3.3 Relação entre os sensores em diferentes estádios fenológicos.....	56
5.3.4 Estimativa de produção de biomassa com sensores portáteis.....	58
5.4. Conclusões .....	60
5.5. Agradecimentos.....	61
5.6. Referências bibliográficas .....	61
6. CONCLUSÃO GERAL .....	69

## ÍNDICE DE TABELAS

### CAPÍTULO I - MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA NA AVALIAÇÃO INDIRETA DE PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES E DO TEOR DE NITROGÊNIO EM SORGO SACARINO

<b>Tabela 1.</b> Principais características químicas e texturais do solo da área experimental.	20
<b>Tabela 2.</b> Correlação de Pearson ( $r$ ) entre clorofila $a$ (Chlor $a$ ), $b$ (Chlor $b$ ) e clorofila total (Chlor total) determinada pelas leituras do ClorofiLog <sup>®</sup> e método destrutivo (DMSO), teor de N, massa seca e doses de N nas folhas do sorgo sacarino em estágio V5.....	24
<b>Tabela 3.</b> Índice de clorofila $a$ (Chlor $a$ ), $b$ (Chlor $b$ ) e clorofila total (Chlor tot) determinado pelas leituras do ClorofiLog <sup>®</sup> e massa seca total (MST) no sorgo sacarino em estágio V5 .....	25
<b>Tabela 4.</b> Dispersão dos dados e correlação de Pearson ( $r$ ) entre os índices de clorofila $a$ (Chlor $a$ ), $b$ (Chlor $b$ ) e clorofila total (Chlor total) determinada pelas leituras em espectrofotômetro (DMSO), ClorofiLog <sup>®</sup> , teor de N, produção de massa seca e doses de N nas folhas do sorgo sacarino.....	28
<b>Tabela 5.</b> Altura de plantas (AP), diâmetro de colmo (DC), produção de massa fresca (PMF), produção de massa seca (PMS), acúmulo de N na planta (AN), produção de etanol (PE), umidade do colmo (UC) e °Brix do caldo do sorgo sacarino na colheita.....	34

## CAPÍTULO II - ESTÁDIO DE DESENVOLVIMENTO E MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA MAIS EFICIENTE NA AVALIAÇÃO INDIRETA DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS NO SORGO SACARINO

<b>Tabela 1.</b> Principais características químicas e texturais do solo da área experimental.....	47
<b>Tabela 2.</b> Correlação de Pearson (r) entre o conteúdo de clorofila total determinada pelas leituras no espectrofotometro em estágio V10 e clorofila total (Chlor total) determinada pelas leituras de clorofila total do ClorofiLog <sup>®</sup> , índice SPAD <sup>®</sup> , índice Dualex <sup>®</sup> , índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.....	54
<b>Tabela 3.</b> Correlação de Pearson (r) entre o teor de N determinada em estágio V10 e leituras de clorofila total (Chlor total) determinadas pelo ClorofiLog <sup>®</sup> , índice SPAD <sup>®</sup> , índice Dualex <sup>®</sup> , índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.....	55
<b>Tabela 4.</b> Correlação de Pearson (r) entre doses de N e leituras de clorofila total (Chlor total) determinada pelo ClorofiLog <sup>®</sup> , índice SPAD <sup>®</sup> , índice Dualex <sup>®</sup> , índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.....	56
<b>Tabela 5.</b> Correlação de Pearson (r) entre a produção de massa seca total determinada em estágio V10 e leituras de clorofila total (Chlor total) determinada pelo ClorofiLog <sup>®</sup> , índice SPAD <sup>®</sup> , índice Dualex <sup>®</sup> , índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.....	58
<b>Tabela 6.</b> Correlação de Pearson (r) entre os índices de clorofila total dos sensores ClorofiLog <sup>®</sup> , SPAD <sup>®</sup> , Dualex <sup>®</sup> , índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I - MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA NA AVALIAÇÃO  
INDIRETA DE PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES E DO TEOR DE  
NITROGÊNIO EM SORGO SACARINO

- Figura 1.** Precipitação (mm) e temperatura média mensal observadas na área experimental em Rio Verde, GO, Brasil.....21
- Figura 2.** Teores de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total (A) determinados pelo método destrutivo e teor de N (B) em folhas de sorgo sacarino em estágio V5 em função de doses de N aplicadas na semeadura da cultura.....26
- Figura 3.** Dispersão dos dados e correlação de Pearson (*r*) entre os teores de clorofila *a* (A), *b* (B) e total (C) determinados via leitura em espectrofotômetro, índice ClorofiLog<sup>®</sup> e teor de N (D) em folhas de sorgo sacarino.....28
- Figura 4.** Índice ClorofiLog<sup>®</sup> para clorofila *b* (A) e teor de clorofila total determinados via leitura em espectrofotômetro (B) em folhas de sorgo sacarino em estágio V9 em função de doses de N aplicadas em cobertura.....31
- Figura 5.** Massa seca de colmos (A) e massa seca total (B) do sorgo sacarino em estágio V9 em função de doses de N aplicadas na semeadura e em cobertura.....32

CAPÍTULO II - ESTÁDIO DE DESENVOLVIMENTO E MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA MAIS EFICIENTE NA AVALIAÇÃO INDIRETA DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS NO SORGO SACARINO

**Figura 1.** Teores médios de N-foliar (A), N-total (B), pigmentos de clorofila total (C) e massa seca total (D) da cultura do sorgo sacarino, aos 53 DAS em função da aplicação de doses de N em diferentes classes de solo da região central do Brasil.....50

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Al	alumínio	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
Are	areia	%
Arg	argila	%
Ca	cálcio	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
CCF	carta de cores de folhas	-----
CTC	capacidade de troca catiônica	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
DAE	dias após a emergência	dias
DMSO	dimetilsulfóxido	-----
H	hidrogênio	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
K	potássio	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
KCl	cloreto de potássio	$\text{kg ha}^{-1}$
LVw	Latossolo Vermelho ácrico	-----
LVd	Latossolo Vermelho distrófico	-----
Mg	magnésio	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$
M.S	massa seca	$\text{kg ha}^{-1}$
M.O	matéria orgânica	$\text{g kg}^{-1}$ ou $\text{Mg ha}^{-1}$
N	nitrogênio	-----
Nm	nanômetros	-----
NQo	Neossolo Quartzarênico	-----
NBPT	tiofosfato de N triamida	
P	fósforo	$\text{mg dm}^{-3}$
pH	potencial hidrogeniônico	-----
Prof.	profundidade	m
SB	soma de bases	%
SS	supersimples	-----
V	saturação por bases	%

## RESUMO GERAL

XAVIER, WARLLES DOMINGOS. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, maio de 2021. **Sensores para estimativa de nitrogênio e pigmentos fotossintetizantes em sorgo sacarino.** Orientador: Dr. Gustavo Castoldi; Coorientadora: Dra. Virgínia Damin.

No Brasil, dentre as diversas matérias-primas renováveis disponíveis para produção de etanol, especial destaque vem sendo dado a cultura do sorgo sacarino. No entanto, a recomendação da adubação para a cultura ainda carece de muitas informações, especialmente para o nitrogênio. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a estimativa indireta do “status” de nitrogênio em sorgo sacarino por meio de leituras com sensores portáteis de clorofila. O primeiro experimento foi conduzido na safra 2017/18, em área experimental pertencente à Nexsteppe Sementes do Brasil LTDA, no município de Rio Verde – GO, sob Latossolo Vermelho distrófico, com fertilidade do solo construída. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas 5 x 5 e quatro repetições. As parcelas foram constituídas por cinco doses de N (fonte ureia) aplicadas no plantio (0; 15; 30; 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de N), com complementação em cobertura, compondo as subparcelas (0; 100; 200; 300 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N), aplicados quando do estágio V5 de desenvolvimento da cultura. O segundo experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Escola de Agronomia da UFG, campus Samambaia em Goiânia. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente ao acaso, com esquema fatorial 3 x 6, e cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos de três tipos de solo: Latossolo Vermelho ácrico, Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico, e seis doses de N (fonte ureia): 0; 50; 100; 150; 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicados em cobertura em estágio V3 de desenvolvimento das plantas. As leituras foram tomadas nos estádios V5 e V9, no

primeiro ensaio, e nos estádios V6, V8 e V10 no segundo ensaio, em que foram utilizados os aparelhos portáteis ClorofiLog<sup>®</sup> (Falker, Brazil), SPAD-502<sup>®</sup> (Minolta, Japan) e Dualex<sup>®</sup> (Force-A, France). Após as leituras foram coletadas amostras de discos foliares para análise de pigmentos pelo método destrutivo em DMSO e amostras de folhas para determinação do conteúdo de N total nos tecidos das plantas. As leituras efetuadas com os medidores portáteis de clorofila, com objetivo de verificar as respostas às aplicações de N, não são muito precisas em estádios iniciais de desenvolvimento do sorgo. Os medidores portáteis de clorofila ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD-502<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> podem ser ferramentas úteis e confiáveis para a determinação indireta dos teores de N em folhas do sorgo, uma vez que os resultados de clorofila total apresentaram correlação muito forte com os conteúdos de N foliares e forte para os pigmentos fotossintetizantes obtidos pelo método destrutivo a partir do estágio V8. Em solo de textura arenosa, as leituras com os medidores portáteis de clorofila SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> estimaram com alta precisão os índices de produção de massa seca em plantas com seis folhas completamente desenvolvidas. Em estágio V10 o melhor desempenho do sorgo sacarino, considerando a produção de massa seca, o conteúdo de N foliar e clorofila total obtidos pelo método destrutivo foram atingidos com a aplicação média em cobertura de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N nos diferentes tipos de solo.

Palavras-chave: Nitrogênio; Teor de clorofila; Clorofilômetro portátil; Produtividade de massa seca.

## GENERAL ABSTRACT

XAVIER, WARLLES DOMINGOS. Goiano Federal Institute - Campus of Rio Verde - GO, May 2021. **Sensors for estimation of nitrogen and photosynthetic pigments in in sweet sorghum.** Advisor: PhD Gustavo Castoldi; Co-advisors: PhD Virgínia Damin.

In Brazil, among the various renewable raw materials available for ethanol production, special emphasis has been given to the culture of sweet sorghum. However, the fertilization recommendation for crop still lacks much information, especially for nitrogen. Thus, the objective of this work is to evaluate the indirect estimation of nitrogen “status” in leaves of sweet sorghum through readings with portable chlorophyll sensors. The first experiment was carried out in the 2017/18 season in an experimental area belonging to Nexsteppe Sementes do Brasil LTDA, in the municipality of Rio Verde – GO, under a dystrophic Red Latosol with constructed soil fertility. The experimental design was randomized blocks, with 5 x 5 split plots and four replications. The plots consisted of five N doses (urea source) applied at sowing, with: 0; 15; 30; 45 and 60 kg ha<sup>-1</sup> of N, and in topdressing in the subplots with: 0; 100; 200; 300 and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N, applied at sowing at stage V5 of crop development. The second experiment was carried out in greenhouse at the UFG agronomy school, campus Goiânia. The experimental design was completely randomized blocks, with a 3 x 6 factorial scheme and five replications. The treatments consisted of three types of soil, with: LVw – Acrustox, RQo – Quartzpsammment and LVd – Haplustox and six N doses (urea source) with: 0; 50; 100; 150; 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> of N, applied in topdressing at stage V3 of plant development. The readings were taken at stages V5 and V9, in the first trial, and at stages V6, V8 and V10 in the second trial, where the portable devices ClorofiLog® (Falker, Brazil), SPAD-502® (Minolta, Japan) and

Dualex<sup>®</sup> (Force-A, France) were used. After the readings, leaf disc samples were collected for pigment analysis by the destructive method in DMSO and leaf samples to determine the total N content in plant tissues. The readings taken with portable chlorophyll meters, to verify the responses to fertilization with N doses, are not very accurate in the initial stages of sorghum development. The portable chlorophyll meters ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD-502<sup>®</sup> and Dualex<sup>®</sup> can be useful and reliable tools for the indirect determination of N contents in sorghum leaves since the total chlorophyll results were very strongly correlated with the N contents and for photosynthetic pigments obtained by the destructive method from the V8 stage of plant development. In sandy textured soil, the readings with the portable chlorophyll meters SPAD<sup>®</sup> and Dualex<sup>®</sup> estimated with high precision the dry mass production indices in plants with six fully developed leaves. In stage V10, the best performance of sweet sorghum, considering the dry mass production, the N content of leaf and total chlorophyll obtained by the destructive method were reached with the average application in topdressing of 200 kg ha<sup>-1</sup> of N in different types of soil.

**Key words:** Nitrogen. Chlorophyll content. Portable chlorophyll meter. Dry mass productivity

## 1. INTRODUÇÃO

Frente às limitações mundiais das reservas de petróleo, instabilidade geopolítica em regiões produtoras e, as recorrentes discussões sobre o aumento do aquecimento global, com vistas, a diminuição das emissões de gases causadores do efeito estufa, mundialmente, tem ocorrido grande interesse por novas fontes de matérias-primas com potencial para a cogeração de energia (MAY et al., 2013). Aliado a isso, há também a necessidade em aumentar a produção de energia mundial em 57% até 2025, com base em dados de 2002, para abastecer o rápido crescimento de economias emergentes como China e Índia (RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, 2017).

Neste sentido, os biocombustíveis apresentam oportunidades promissoras, visto que sua utilização representa uma alternativa para se obter uma matriz energética renovável, sustentável, acessível e eficaz. Além de fomentar a viabilidade para aquecimento da economia agrícola (AKINCI et al., 2008).

No Brasil, o desenvolvimento do setor sucroenergético é proveniente, principalmente, do cultivo da cana-de-açúcar. O etanol produzido através da fermentação de seu caldo representa um caso de sucesso tecnológico para o país, com um potencial de utilização de 15,7% de um total de 44,7% da energia renovável em sua matriz energética, sendo o estado de São Paulo o principal produtor de etanol, seguido pelo estado de Goiás (CONAB, 2019a). No entanto, o país ainda apresenta problemas para o abastecimento de sua demanda interna, cujas medidas para solução, entre outras, é a pesquisa e o desenvolvimento de novas fontes de matérias-primas (base genética diversificada), mais adaptáveis as diversas condições de solo e clima, promovendo alternativa ao monocultivo da cana-de-açúcar e impulsionando o desenvolvimento social e econômico de outras regiões.

Neste contexto, dentre as diversas matérias-primas renováveis disponíveis para produção de etanol, o sorgo sacarino vem recebendo, destaque por apresentar maior flexibilidade de adaptação, sendo muito responsiva a investimentos tecnológicos, com elevada produtividade de colmos e consideráveis teores de açúcares diretamente fermentáveis sacarose, glicose e frutose (SIPOS et al., 2009). Assim, o sorgo sacarino pode ser uma alternativa viável para aumentar a cerca de 50% a quantidade produzida de etanol anualmente no Brasil (KLINK, 2010). Atrelado há não necessidade de mudanças estruturais e logísticas do parque industrial e operacional das usinas, por permitir que sua colheita seja realizada com os mesmos implementos utilizados para a cana-de-açúcar.

Além disso, a ociosidade das usinas na entressafra da cana-de-açúcar, revelou-se uma nova oportunidade para a indústria sucroenergética, permitindo o aumento da produção de etanol numa mesma área, com a introdução do sorgo sacarino em sucessão ou em rotação com a cana-de-açúcar (CUNHA e SEVERO FILHO, 2010).

Concomitantemente às projeções otimistas, sobre o potencial produtivo do sorgo sacarino, informações detalhadas sobre o desenvolvimento de técnicas de manejo cultural mais adequadas ainda são incipientes, sobretudo no âmbito da adubação, visto que as recomendações existentes estão obsoletas e não atendem mais a demanda nutricional da cultura, constituída principalmente por híbridos (MAY et al., 2013). Assim, para que o interesse na cultura aumente, questões sobre a viabilidade técnica da produção de etanol no país devem ser elucidadas, principalmente, no âmbito do balanço energético, que em tese, depende de fatores como a produtividade da cultura e do menor consumo de fertilizantes, sobretudo os nitrogenados, que apresentam altos índices de poluição ambiental (SOARES, 2011; SILVA, 2017).

Na agricultura moderna, o uso de sensores, como os medidores portáteis de clorofila, é uma das técnicas mais estudadas para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio. Além de ser uma constituinte das proteínas que participam do metabolismo dos carboidratos, quase 70% do N das plantas é incorporado às enzimas relacionadas aos cloroplastos que realizam a fotossíntese. Assim, existe uma interdependência entre os compostos em N e a clorofila das plantas (SINGH et al., 2012).

Dessa forma, é possível estimar o conteúdo relativo de N nas folhas das plantas por meio de dispositivos portáteis e, com isto, contribuir para a diminuição da sub ou superutilização de fertilizantes nitrogenados (SANT'ANA et al., 2010). Após a calibração adequada do medidor de clorofila, é possível estimar o estado de N nas

plantas e usar as informações para tomar decisões sobre quando e quanto de N aplicar. No entanto, para o sorgo sacarino faltam informações sobre a eficácia destas ferramentas.

Assim, torna-se necessário a realização de estudos que possam aumentar a eficiência de aproveitamento da adubação nitrogenada, com vistas a estimular o interesse do setor produtivo de etanol na cultura do sorgo sacarino. Com este trabalho objetivou avaliar a estimativa indireta do “status” de nitrogênio nas folhas do sorgo sacarino por meio de leituras com sensores de pigmentos fotossintetizantes em diferentes estágios da planta e tipos de solo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O sorgo sacarino

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma gramínea tropical, monocotiledônea da família Poaceae, originário da África e, atualmente cultivado em diversas regiões do mundo. É uma planta C4, de dias curtos e taxa fotossintética extremamente eficiente (PONTES, 2013). Suas principais características residem em maior tolerância ao déficit hídrico, por apresentar sistema radicular profundo e ramificado, e maior eficiência no uso da água quando comparado as culturas de cana-de-açúcar e milho (YING et al., 2010), podendo assim, ser cultivado em ampla faixa edafoclimática.

O sorgo sacarino é uma cultura de ciclo rápido (variando de 90 a 120 dias), altamente responsiva a adubação e a temperatura ideal para seu desenvolvimento está a cerca de 33° e 34° C. O caule pode atingir até quatro metros de altura e, é dividido em nós e entrenós, podendo ter vários caules por pé (perfilhamento) (DINIZ, 2010). Seus colmos são suculentos e ricos em sacarose, glicose e frutose (WU et al., 2010), com °Brix podendo variar de 14 a 22%, de modo que podem ser fermentados para produção de etanol (DUTRA et al., 2013; REGASSA; WORTMANN, 2014).

O potencial produtivo a partir dos açúcares fermentáveis do sorgo sacarino rende a cerca de 4.000 litros de etanol por hectare (REIS, 2014). Considerando dois ciclos de cultivo no mesmo ano, isso representaria rendimento a cerca de duas vezes o potencial de produção de etanol a partir de grãos de milho ou ainda 30% maior do que a média da cana-de-açúcar brasileira, que é de aproximadamente 6.000 L ha<sup>-1</sup>. Na China, a cultura

açucareira, experimentalmente, apresentou resultados de 50 a 60 t ha<sup>-1</sup> de matéria verde e de 6.000 a 7.000 L ha<sup>-1</sup> de etanol com o aproveitamento dos colmos e dos grãos (WANG et al., 2007; YANG et al., 2018).

Outra característica que merece destaque é sua flexibilidade de plantio, sendo, portanto, cultivado em rotação com culturas graníferas como o milho ou soja (mesmos implementos agrícolas), ou em sucessão a cana-de-açúcar (compatibilidade nas destilarias).

Com relação a cana-de-açúcar, não há a necessidade de mudanças estruturais e logísticas do parque industrial e operacional das usinas, pelo fato desta cultura permitir que sua colheita seja realizada com os mesmos implementos. A época ideal de colheita ocorre justamente na entressafra de cana-de-açúcar, quando a produção de etanol por hectare é máxima no sorgo e da cana-de-açúcar ainda está muito abaixo do seu potencial máximo (MAY et al., 2013).

A comparação das características agroindustriais da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino demonstra que, embora o sorgo apresente algumas características inferiores aos da cana-de-açúcar, como: produtividade (55 t ha<sup>-1</sup>), °Brix (18%), açúcares redutores totais (14,5%), sacarose (10,5%), produção de etanol (4.000 L ha<sup>-1</sup>) e fibras (16%), deve-se considerar que a espécie tem um ciclo menor que possibilita o seu cultivo em duas safras no ano, com menores requerimentos de fertilizantes (GOMES, 2014).

No Brasil, o sorgo sacarino ganhou significativo destaque a partir da década de 1970, sobretudo, com a iniciativa da Embrapa, que iniciou um programa de desenvolvimento de cultivares. Em parceria com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), África e Índia foram introduzidos no Brasil 50 genótipos de sorgo sacarino. Já em 1987, surgem as primeiras variedades brasileiras desenvolvidas com potencial para produção de etanol (BRS 506 e BRS 507, e o híbrido BRS 601). Contudo, com o final do programa Proálcool e da existência da política nacional direcionada para grandes destilarias, o foco das pesquisas com sorgo sacarino foi redirecionado para a produção de cultivares forrageiras (PARRELLA, 2011). Desde então, o cultivo do sorgo sacarino tem encontrado algumas barreiras para se estabelecer como cultura comercial no Brasil.

Depois de 20 anos, já em 2008, a Embrapa retomou as atividades do programa de desenvolvimento de cultivares de sorgo sacarino, por causa ao potencial desta cultura na geração de energia renovável e pela grande demanda por matéria-prima alternativa para a produção de etanol nas grandes destilarias. Devido aos avanços nas pesquisas e a

aplicação de tecnologias adequadas, outras potencialidades do sorgo sacarino têm despertado grande interesse das usinas sucroenergéticas (MIRANDA et al., 2012): os coprodutos gerados como a produção de grãos e o próprio bagaço apresentam qualidades interessantes para alimentação animal e/ou cogeração de energia para industrialização, respectivamente, podendo viabilizar projetos de produção diversificada, e ainda aumentar a eficiência das usinas.

Apesar destas vantagens, a quantidade de informações existentes sobre o manejo da adubação do sorgo sacarino ainda é limitada, sobretudo, para o N, que dificulta as recomendações para a cultura. Além disso, ainda são poucas as informações científicas sobre as exigências nutricionais da cultura (SANTOS et al., 2015).

## 2.2 Adubação nitrogenada no sorgo sacarino

O nitrogênio (N) é indispensável as culturas agrícolas por sua participação direta na formação de proteínas, núcleo proteínicas e outros compostos, tais como aminas, aminoácidos e polipeptídeos, que têm importantes papéis funcionais e estruturais nas plantas (MARSCHNER, 1995). O fornecimento adequado de N promove alterações na morfologia das plantas, principalmente na fase vegetativa refletindo em incremento na área foliar, da produção de gemas vegetativas, aumento no perfilhamento (gramíneas) e, conseqüentemente, influencia na qualidade do produto colhido (MALAVOLTA, 2006).

Além de ser menos exigente em N que o milho e a cana-de-açúcar, o sorgo sacarino apresenta alta eficiência de utilização desse nutriente (SAWARGAONKAR et al., 2013). A cultura também tem sido citada como cultura de alta adaptabilidade as condições de solo de baixa fertilidade (RIBEIRO, 2013); no entanto, de acordo com Rezende (2017), o sorgo sacarino responde intensamente a adição de fertilizante, principalmente N. Para esse autor, apesar do sorgo sacarino ser uma espécie rústica e possuir ampla faixa de adaptação edafoclimática, a cultura responde positivamente à adubação nitrogenada e por isso o manejo da fertilidade do solo deve atender à demanda nutricional da cultura. Entretanto, é interessante que se eleve a produtividade de colmo com uso sustentável de fertilizante, uma vez que o balanço energético positivo é extremamente importante, principalmente, para cultura destinada a produção de biocombustível (BRANCO, 2013).

A premissa da eficiência do uso de N estabelece a relação entre o aumento de produção das culturas por unidade de nutriente aplicado ou absorvido. Nos últimos

anos, este parâmetro tem adquirido maior relevância para a agricultura brasileira e mundial, em função do aumento dos custos de produção e das pressões sociais sobre a agricultura para a redução do impacto ambiental (LOPES; GUILHERME, 2016; HICKMANN, 2014).

Para a cultura do sorgo sacarino, os estudos ainda são recentes e os resultados disponíveis apresentam alguma inconsistência, variando muito entre híbridos e cultivares. Para Zegada-Lizarazu e Monti (2012), doses elevadas de N ( $> 180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) podem aumentar o crescimento vegetativo e assim reduzir a concentração de açúcar, como geralmente ocorre para culturas produtoras de açúcares. Por outro lado, doses insuficientes de N também têm se refletido em baixa qualidade industrial das plantas, aumentando o teor de fibra e diminuindo a concentração de sacarose nos colmos, que passa a ser acumulada nas folhas (MAZONI; BURJAILI; PAGOTTO, 2013).

Rao (2013) determinou que a dose de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de K, com colheita quando as plantas de sorgo sacarino estavam em estágio de maturação fisiológica proporcionaram máximos rendimentos agrônômico e industrial. Para o autor, aplicações superiores a estas doses não contribuíram para a melhoria da qualidade tecnológica do sorgo sacarino, embora não evidenciam sintomas de toxidez e redução na produtividade de colmos. Autores como Sawargaonkar et al. (2013) encontraram que a aplicação de N teve efeito significativo sobre o conteúdo de açúcar, produção de colmo verde, produção de caldo e na produção potencial de etanol, aumentando em 27%, 35%, 38% e 56%, respectivamente, em relação ao controle, na dose de  $90 \text{ kg de N por ha}^{-1}$ . Desta forma, os resultados mostram que a fertilização moderada parece ser muito mais adequada para a alta produção de etanol na cultura do sorgo sacarino.

Segundo Sinare et al. (2006), a aplicação de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, com 30% de N no plantio, 35% com 25 dias após o plantio, e 35% com 50 dias após o plantio, elevou a produtividade de colmos e os valores de °Brix no sorgo sacarino. A alta eficiência no aproveitamento do N pela cultura foi demonstrada por Reddy et al. (2008), que observaram que as doses de N pouco influenciam na altura das plantas e no °Brix do sorgo sacarino, porém, a aplicação de  $18 \text{ kg ha}^{-1}$  de N no sulco e  $46 \text{ kg ha}^{-1}$  de N a lanço em cobertura resultaram em maiores incrementos nos teores de açúcares dos colmos.

Pesquisas desenvolvidas pela Embrapa, com base em dados de extração de nutrientes, recomendam para produção de  $50 \text{ t ha}^{-1}$  de massa verde de colmo, em solos de adequada fertilidade, a aplicação de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N no plantio e  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em

cobertura quando as plantas estiverem no estágio V4 a V6 de desenvolvimento (SANTOS et al. 2014).

Vale ressaltar que doses superdimensionadas de N podem prolongar a fase vegetativa do sorgo sacarino, reduzindo as concentrações de açúcares em seus colmos. Isso se dá porque o acúmulo de glicose, frutose e sacarose tem sido relacionado com a redução na atividade fotossintética, principalmente, quando se inicia a fase de maturação fisiológica dos grãos (JANG e SHEEN, 1994). É importante mencionar ainda que uma adubação adequada de N pode minimizar as principais perdas (volatilização, desnitrificação e lixiviação) e aumentar sua eficiência em até 80%, além de mitigar prejuízos ecológicos (KESSEL et al., 1993; GOSH e BAHT, 1998).

Mesmo com elevado potencial de produção. A recomendação de adubação, principalmente para nitrogênio, tem sido baseada e adaptada das recomendações para o milho, sorgo forrageiro e sorgo granífero e sabe-se que as exigências do sorgo sacarino com relação ao N são diferentes, quando comparadas a outras culturas, sendo necessário rever e complementar as informações já existentes.

Nesse âmbito, a obtenção de informações mais assertivas no tocante à adubação nitrogenada é fator chave para o sucesso do cultivo do sorgo sacarino. A obtenção de qualquer avanço na temática certamente contribuirá para o aumento do interesse no cultivo do sorgo sacarino, aumento da produtividade e, sobretudo, aumento da eficiência produtiva da cultura.

### 2.3 Uso de medidores portáteis de clorofila no manejo da adubação nitrogenada

A estimativa do teor de clorofila permite identificar possíveis deficiências nutricionais nas plantas, sobretudo de N. Isso porque o teor de clorofila da folha se correlaciona linearmente com o teor de N na planta, e este com o rendimento das culturas. Isto se deve ao fato de 50 a 70% do N total das folhas ser integrante de compostos proteicos associados aos cloroplastos (LARCHER, 2006). Assim, em condições de deficiência de N, a alocação de N para síntese de pigmentos diminui, reduzindo os teores de clorofila (SORATTO et al., 2004; BARBOSA FILHO et al., 2009), que estão estreitamente relacionados à atividade fotossintética das plantas.

Desta forma, sensores para estimativa de clorofila (clorofilômetros e fluorômetros) têm sido utilizados com o objetivo de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Para os clorofilômetros, como o SPAD-502 (Minolta, Japão) e o

ClorofiLOG1030 (Falker, Brasil), os dados relativos são calculados com base na quantidade de luz transmitida pela folha em duas ou três regiões de comprimento de onda, fornecendo uma leitura estimada de clorofila a, b e carotenoides (SALLA et al., 2007). De acordo com Markwell et al. (1995), o clorofilômetro SPAD-502 utiliza dois diodos emissores de luz nas faixas de 650 e 940 nm, enquanto o ClorofiLOG1030 opera em 635, 660 e 850 nm.

As moléculas de clorofila apresentam alta absorvância da luz emitida a 650 nm. Dessa forma, é possível quantificar indiretamente o teor de clorofila, considerando a quantidade de luz incidente na folha e a quantidade de luz transmitida, que não foi absorvida pelas moléculas de clorofila. No pico de 940 nm, a absorvância pela folha é desprezível, e serve como fator de correção para compensar a absorção de fótons em 650 nm por moléculas do tecido foliar desprovidas de clorofila (JESUS E MARENCO, 2008).

Uma outra forma indireta de se determinar o teor de clorofila nas plantas é com base na refletância da luz a partir do dossel. Além da radiação refletida, as folhas geralmente emitem luz fluorescente cuja intensidade é indicadora da concentração de clorofila nas folhas. Um clorofilômetro que utiliza a fluorescência da clorofila é o Dualex (FORCE-A, France), equipamento portátil, de fácil manuseio, que fornece a eficiência quântica do PSII. Esse índice precisa ser devidamente calibrado no espaço, tempo e ambiente, para ter utilidade na avaliação dos pigmentos fotossintetizantes da folha e, conseqüentemente, no estado de N na planta (FONTES, 2016). O aparelho utiliza esses índices para calcular o Índice de balanço do nitrogênio (IBN). O IBN é um índice obtido pela relação entre clorofila e flavonoides e corresponde à proporção relativa do carbono das folhas alocado como clorofila e polifenóis (DEMOTES-MAINARDI et al., 2008).

O Dualex é constituído de dois diodos, que emitem pulsos de luz com frequência de 1 kHz, com duração de meio segundo. As fontes de luz são ativadas alternadamente, de modo que a folha recebe feixes de luz alternados de dois comprimentos de onda, um na faixa do UV, de 375 nm, e o outro na faixa do vermelho, de 650 nm. Os fenóis são substâncias que têm picos típicos de absorção de luz UV-B e UV-A (CEROVIC et al., 2002) e vão absorver a luz emitida pelo feixe de 375 nm. Os feixes de luz UV não absorvidos pelos polifenóis irão atravessar o mesófilo e excitar a molécula de clorofila. Desse modo, o teor de fenóis é calculado indiretamente. O outro comprimento de onda, de referência (650 nm) atravessa a epiderme sem ser absorvido pelos polifenóis,

atingindo as moléculas de clorofila no mesófilo (BILGER et al., 2001; OUNIS et al., 2001). Assim, a intensidade da fluorescência pode ser correlacionada ao teor de clorofila da folha.

Follett et al. (1992), avaliaram a relação entre produtividade e acúmulo de N nas folhas de trigo utilizando um clorofilômetro SPAD. Para estes autores, é possível gerar modelos matemáticos que correlacionam os resultados das leituras foliares com a produção de grãos e a disponibilidade de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  no solo. Entretanto, em um sistema aberto de cultivo, fatores bióticos e abióticos podem afetar sua precisão.

No milho, Lu e Zhang (2000) observaram em plantas deficientes de N uma redução na relação Fv/Fm em resposta da redução da fluorescência máxima (Fm). Alguns autores têm demonstrado que a redução da capacidade de assimilação de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, em plantas deficientes em N, tem inibido a síntese de várias enzimas-chave envolvidas no ciclo de Calvin-Benson, como na atividade da Rubisco (Ribulose 1,5 bifosfato carboxilase). Para tanto, resultados obtidos com medidores portáteis de fluorescência têm mostrado ser uma ferramenta útil e fundamental para avaliar o funcionamento do PSII, (SUGIHARTO ET AL., 1990; LU E ZHANG, 2000).

McMurtrey et al. (1994), compararam a fluorescência e a refletância como métodos de determinar estresse em milho adubado com diferentes doses de N. As diferenças significativas pelos diferentes níveis de adubação nitrogenada em plantas de milho, indicam que distinguir plantas com deficiência grave N, a partir de plantas bem fertilizadas, é possível tanto com fluorescência quanto com refletância. Esses resultados mostram que combinações de parâmetros de fluorescência e refletância podem melhorar modelos para detecção de estresse da planta.

Assim, a utilização de medidores de clorofila pode ser importante ferramenta no diagnóstico prévio de uma possível deficiência de N, e ainda auxiliar o produtor no manejo da adubação nitrogenada. Contudo, até o momento não se tem reportado as concentrações de pigmentos fotossintéticos para a cultura do sorgo sacarino.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINCI B.; KASSEBAUM P.G.; FITCH J.V.; THOMPSON R.W. The role of bio-fuels in satisfying US transportation fuel demands. **Energy Policy**. v. 36, p. 3485-3491, 2008.

- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, p. 1-15, 1949.
- BARBOSA FILHO, M.P.; COBUCCI, T.; FAGERIA, N.K.; MENDES, P.N. Época de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado monitorada com auxílio de sensor portátil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 425 - 431, 2009.
- BILGER, W.; JOHNSEN, T.; SCHREIBER, U. UV-excited chlorophyll fluorescence as a tool for the assessment of UV-protection by the epidermis of plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, p. 2007-2017, 2001.
- BRANCO, S.M. **Energia e Meio Ambiente**. Ed. Moderna, 2013.
- CEROVIC, Z.G.; OUNIS, A.; CARTELAT, A.; LATOUCHE, G.; GOULAS, Y.; MEYER, S.; MOYA, I. The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the nondestructive in situ assessment of UV-absorbing compounds in leaves. **Plant Cell and Environment**, v. 25, p. 1663–1676, 2002.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Levantamentos de Safra: cana-de-açúcar**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília: CONAB, 2019a. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 02 de setembro de 2020.
- CUNHA, S. P.; SAVERO FILHO, W. A. Avanços tecnológicos na obtenção de etanol a partir de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Tecnológica**, v. 14, p. 69-75, 2010.
- DEMOTES-MAINARD, S.; BOUMAZA, R.; MEYER, S.; CEROVIC, Z.G. Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents. **Scientia Horticulturae**, v. 115, p. 377-385, 2008.
- DINIZ, G.M.M. **Produção de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)**: Aspectos gerais. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, p. 22, 2010.
- DUTRA, E. D.; DUTRA, E.D.; BARBOSA NETO, A.G.; SOPUZA, R.B.; MORAIS JÚNIOR, J.N.T.; MENEZES, R.S.C. Ethanol Production from the Stem Juice of

Different Sweet Sorghum Cultivars in the State of Pernambuco, Northeast of Brazil. **Sugar Tech**, v. 15, n. 3, p. 316–321, 2013.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) par Windows 4.0. In: Reunião anual da região brasileira da sociedade internacional de biometria, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, p. 255-258, 2000.

FASABI, J.A.V. **Carências de macro e micronutrientes em plantas de malva (*Urena lobata*), variedade BR-01**. 90 f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém, 1996.

FOLLET, R. H.; FOLLET, R. F.; HALVARSON, A. D. Use a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, p. 517-697, 1992.

GOMES, S.C.M.P. **Produção de etanol utilizando mix de sorgo sacarino e cana-de-açúcar em processo de maturação**. 2014.51f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2014.

GOSH, B.C.; BHAT, R. Environmental hazards of nitrogen loading in wetland rice fields. **Environment Pollut**, v. 102, p. 123-126, 1998.

HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais**. 2014. 159f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**, v. 57, p. 1332-1334, 1979.

JANG, J.G.; SHENN, J. Sugar sensing in higher plants. **Plant Cell**, v. 6, p. 1665-1679, 1994.

- JESUS, S.V.; MARENCO, R.A. O SPAD-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. **Acta Amazonica**, v.38, n.4, p.815-818, 2008.
- KESSEL, C.V.; PENNOCK, D.J.; FARREL, R.E. Seasonal variation in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale. **Soil Science American Journal**, v. 57, p. 988-955, 1993.
- KLINK, U. **Melhoramento genético do sorgo para a produção de etanol**. 2010. Disponível em: <[http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2010/simposio\\_agroenergia/palestras/11\\_quarta/Manha/Urubatan%20Klink](http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2010/simposio_agroenergia/palestras/11_quarta/Manha/Urubatan%20Klink)>. Acesso em: 14 de junho 2019.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: Rimas Artes, p. 531, 2006.
- LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v.137, p.1-72, 2016.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**, São Paulo: Agronômica Ceres, p. 638, 2006.
- MAY, A., SILVA, D.D., SANTOS, F.C. **Cultivo do sorgo biomassa para cogeração de energia elétrica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 65, 2013. (Documentos, 152).
- MAY, A.; MENDES, S.M.; SILVA, D.D.; PARRELLA, R.A. C.; MIRANDA, R.A.; SILVA, A.F.; PACHECO, T.F.; AQUINO, L.A.; COTA, L.V.; COSTA, R.V.; KARAM, D.; PARRELLA, N.N.L.D.; SCHAFFERT, R.E. **Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 36p. (Circular Técnica, 186).
- MAZONI, D.F.; BURJAILI, I.T.; PAGOTTO, A.L. Adubação e nutrição com macronutrientes. In: TASSO JÚNIOR, L.C.; SILVA NETO, H.F.; NOGUEIRA, G.A.; MARQUES, M.O (Ed.). **Nutrição e adubação em cana-de-açúcar**. Sertãozinho: CANOESTE, p. 97-145, 2013.
- MIRANDA, R. A.; GARCIA, J. C.; CRUZ, J. C.; DUARTE, J. O. Grande oportunidade à cultura marginal. **A Granja**, p. 46-48, 2012.

- OUNIS, A.; CEROVIC, Z.G.; BRIANTAIS, J.M.; MOYA, I. Dual excitation FLIDAR for the estimation of epidermal UV absorption in leaves and canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 33–48, 2001.
- PARRELA, R. A. da C. Melhoramento genético do sorgo sacarino. **Agroenergia em revista**, n. 3, p. 8-9, 2011.
- RAO, R.S. **Influence of nitrogen, potassium levels and stages of harvest on sweet sorghum**. 2013. 119 f. Tese (Doutorado em Filosofia). Acharya N. G. Ranga Agricultural University, Hyderabad, 2013.
- REDDY, P.S.; REDDY, B.V.S.; KUMAR, A.A.; RAO, P.S. Standardization of nitrogen fertilizer rate for sugar yield optimization in sweet sorghum. **Journal of SAT Agricultural Research**, v. 6, p. 1-4, 2008.
- REGASSA, T. H.; WORTMANN, C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 64, p. 348-355, 2014.
- REIS, R.M. **Produtividade e manejo de plantas daninhas no sorgo sacarino cultivado em diferentes arranjos de plantas**. 2014. 56f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **World Fuel Ethanol Production**. 2017. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>>. Acesso em: 22 de novembro de 2020.
- REZENDE, M. L.; RICHARDSON, J. W. Risk analysis of using sweet sorghum for ethanol production in southeastern Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 100-107, 2017.
- RIBEIRO, M. N. **Comercialização de energia eólica no Brasil: desenvolvimento de sistemas de apoio em leilões para agentes geradores**, 2013. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ROONEY, W. L., BLUMENTHAL, J., BEAN, B., MULLET, J. E. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels*, **Bioproducts and Biorefining**, v. 1, n. 2, p. 147-157, 2007.

- SALLA, L.; RODRIGUES, J. C.; MARENOS, R. A. Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com SPAD-502. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, p. 59-161, 2007.
- SANT'ANA, E V P.; SANTOS, A B.; SILVEIRA, P M. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura spad e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 4, p. 491-496, 2010.
- SANTI, A.; CAMARGOS, S.L.; SCARAMUZZA, L. M. P.; SCARAMUZZA, J. F. Deficiências de macronutrientes em sorgo. **Ciências Agrárias**, v. 30, n. 2, p. 228-233, 2006.
- SANTOS, F. C. et al. Adubações nitrogenada e potássica no sorgo biomassa - produtividade e qualidade de fibra. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2014.
- SANTOS, R.F.; PLACIDO, H.F.; GARCIA, E.B.; CANTÚ, C.; ALBRECHT, A.J.; FRIGO, K.D.A. Sorgo sacarino na produção de agroenergia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 1- 2, 2015.
- SAWARGAONKAR, G. L.; PATIL, M. D.; PAVANI, E.; REDDY, B. V. S. R.; MARIMUTHU, S. Nitrogen response and water use efficiency of sweet sorghum cultivars. **Field Crops Research**. v. 149, p. 245-251, 2013.
- SIGMAPLOT. For windows, version 9.01. **Systat Software**, 2004.
- SINARE, B. T.; WANI, A. G.; ANDHALE, R. P.; SHETE, B. T. Response of sweet sorghum to split application of nitrogen. **Annals of Plant Physiology**, v. 20, n. 2, p. 220-222, 2006.
- SINGH, M.P., J.E. ERICKSON, L.E. SOLLENBERGER, K.R. WOODARD, J.M.B. VENDRAMINI, AND J.R. FEDENRO. Mineral composition and biomass partitioning of sweet sorghum grown for bioenergy in the southeastern USA. **Biomass and Bioenergy**. v. 47, p. 1-8, 2012.
- SILVA, D. F. Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e nitrificação na cultura do abacaxi. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64 n. 3, 2017.

- SIPOS, B.; Reczey, J.; Somorai, Z.; Kadar, Z.; Dienes, D.; Reczey, K.; Sweet sorghum as feedstock for ethanol production: enzymatic hydrolysis of steam-pretreated bagasse. **Appl Biochem Biotechnol.** v. 153, p. 151-162, 2009.
- SOARES, J. R. **Efeito de inibidores de urease e de nitrificação na volatilização de NH<sub>3</sub> pela aplicação superficial de ureia no solo.** 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2011.
- SORATTO, R.P.; CARVALHO, M.A.C.; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v.39, n. 9, p. 895 - 901, 2004.
- SOUSA. D. M. G. de & LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2 ed. Brasília- DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 416, 2004.
- VELOSO, C. A. C. **Deficiências de macro e micronutrientes e toxidez de alumínio e manganês na pimenteira-do-reino (*Piper nigrum* L.).** Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, p. 145, 1993.
- WANG, J.C.; DAI, L.; TIAN, Y.S.; QIN, S.P. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.** v. 23, p. 276-282, 2007.
- WU, X.; STAGGENBORG, S.; PROPHTER, J. L.; ROONEY, W. L. Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. **Industrial Crops and Products.** v. 31, p. 164-170, 2010.
- YANG, X.; LI, M.; LIU, H.; REN, L.; XIE, G. Technical Feasibility and Comprehensive Sustainability Assessment of Sweet Sorghum for Bioethanol Production in China. **Sustainability,** v.10, n.2, p. 731, 2018.
- YING, G.; HU, S.; LI, Y.; CHEN, D.; ZHU, B.; SMITH, K. M. Optimization and analysis of a bioethanol agro-industrial system from sweet sorghum. **Renewable Energy.** v. 35, p. 2902-2909, 2010.

## 4. OBJETIVOS

### Geral

Avaliar o uso de medidores portáteis de clorofila na estimativa de nitrogênio e pigmentos fotossintetizantes em sorgo sacarino cultivado em diferentes tipos de solo.

### Específicos

1. Buscar correlações próximas entre as leituras obtidas com os medidores portáteis e o conteúdo de clorofila estimada pelo método clássico de determinação em laboratório;
2. Determinar qual medidor portátil de clorofila que melhor se correlaciona com o teor de N nas folhas (método destrutivo) e em qual estágio de desenvolvimento da planta a previsibilidade é mais assertiva;
3. Avaliar o potencial produtivo do sorgo sacarino em resposta a aplicação de doses de N;

## 5. CAPÍTULO I

(Artigo publicado conforme as normas da Sugar Tech)

### **Medidor portátil de clorofila na avaliação indireta de pigmentos fotossintetizantes e do teor de nitrogênio em sorgo sacarino**

**Resumo:** Os medidores portáteis de clorofila podem ser uma ferramenta útil para a determinação de nitrogênio (N) em lavouras, particularmente naquelas que mostram alta correlação entre os níveis de N nos tecidos das plantas e as leituras de clorofila. No entanto, faltam informações sobre essas correlações em algumas culturas, como o sorgo sacarino. O objetivo deste estudo foi determinar a relação entre os pigmentos fotossintéticos extraídos em dimetilsulfóxido (DMSO) e o teor de N nas folhas com as leituras de clorofila de um medidor portátil (ClorofiLog<sup>®</sup>), em função da aplicação de doses de N na cultura do sorgo sacarino. O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas, com cinco doses de N aplicadas na semeadura (0, 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de N) na parcela principal e como subparcelas foram consideradas cinco doses de N em cobertura para atingir 0, 100, 200, 300 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Aos 25 e 43 dias após a emergência, foram realizadas leituras do medidor portátil de clorofila, determinações destrutivas dos pigmentos fotossintéticos e do teor de N nas folhas do sorgo. Na colheita, foram determinadas as características biométricas e de rendimento das plantas. O ClorofiLog<sup>®</sup> não foi capaz de estimar o “status” de N no estágio V5, mas pôde avaliar o “status” de N em folhas de sorgo no estágio V9. Na última etapa, o N em cobertura promoveu maiores aumentos na massa seca, no índice de clorofila *b* (obtido via ClorofiLog<sup>®</sup>) e na clorofila total (obtida pelo método destrutivo).

**Palavras-chave:** clorofiLog<sup>®</sup>; Malibu 5010; *Sorghum bicolor*; pigmentos fotossintéticos; adubação nitrogenada.

### **Portable chlorophyll meter for indirect evaluation of photosynthetic pigments and nitrogen content in sweet sorghum**

**Abstract:** Portable chlorophyll meters can be a useful tool for nitrogen (N) determination in crops, particularly in those that show a high correlation between N levels in plants tissues and chlorophyll readings. However, there is a lack of information regarding these correlations in some crops, such as sweet sorghum. The aim of this study was to determine the relationship between the photosynthetic pigments extracted in dimethylsulfoxide (DMSO) and N content in leaves with readings of a portable chlorophyll meter (ClorofiLog<sup>®</sup>), in function of N doses application in sweet sorghum. The experimental design was a split-plot, with five N doses applied at sowing (0, 15, 30, 45 and 60 kg ha<sup>-1</sup> of N) in the main plot and as subplots were considered five topdressing N doses to reach 0, 100, 200, 300 and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N. At 25 and 43 days after emergence, portable chlorophyll meter readings, destructive determinations of photosynthetic pigments and N content in sorghum leaves were measured. At harvesting, biometric and yield characteristics of plants were determined. ClorofiLog<sup>®</sup> was not able to estimate N status at V5 stage, but it can assess the N status in sorghum leaves at V9 stage. At the latter stage, topdressing N promoted greater increases on dry mass, the chlorophyll *b* index (obtained by ClorofiLog<sup>®</sup>) and total chlorophyll (obtained by the destructive method).

**Key words:** clorofiLog<sup>®</sup>; photosynthesis; Malibu 5010; nitrogen fertilization; *Sorghum bicolor*.

#### 5.1. Introdução

A produção de etanol no Brasil depende do cultivo da cana-de-açúcar, sendo importante identificar culturas alternativas que possam ser cultivadas na entressafra (CASTRO et al., 2016). O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) pode ser uma alternativa interessante de matéria-prima para a produção de etanol (ROONEY et al.,

2007), pois possui colmos suculentos, é rico em glicose, sacarose e frutose, e possui uma faixa de °Brix de 14 a 22%. Assim, o caldo resultante pode ser fermentado em etanol. Além disso, o sorgo sacarino pode ser cultivado no final da primavera e início do verão (entressafra da cana-de-açúcar), garantindo o suprimento de matéria-prima para as indústrias por um período mais longo (WU et al., 2010).

Para que o cultivo do sorgo sacarino seja aumentado, é importante que lacunas de seu manejo sejam preenchidas. No âmbito da adubação, estudos relacionados à nutrição ainda são escassos, e, muitas vezes, as recomendações são feitas com base na cultura do milho (SANTOS et al., 2015). Sabe-se que o N é um dos nutrientes que mais tem limitado o potencial de rendimentos das culturas, no sorgo sacarino, a obtenção de informações mais conclusivas no tocante à adubação nitrogenada certamente contribuirá para o aumento do interesse na cultura, aumento da produtividade e, sobretudo, aumento da eficiência produtiva.

Para a cultura, estudos específicos são recentes e os resultados são diversos. Sawargaonkar et al. (2013) relataram que altas doses de N podem aumentar o crescimento vegetativo e reduzir a concentração de açúcar nos colmos. Por outro lado, alguns resultados mostram aumento linear na produtividade do sorgo sacarino aumentando as doses até 200 kg ha<sup>-1</sup> de N (SANTOS et al., 2015). Outros resultados destacaram a baixa demanda de N pela cultura (BARBANTI et al., 2006).

Na agricultura moderna, o uso de sensores, como medidores portáteis de clorofila, é uma das técnicas mais estudadas para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio. Além de ser uma constituinte das proteínas que participam do metabolismo dos carboidratos, quase 70% do N das plantas é incorporado às enzimas relacionadas aos cloroplastos que realizam a fotossíntese. Assim, existe interdependência entre os compostos em N e a clorofila das plantas (SINGH et al., 2012).

Alguns pesquisadores demonstraram a existência de uma relação entre o índice de clorofila e o “status” de N nas folhas de várias espécies, como citros (JIFON et al., 2005), café (TORRES NETTO et al., 2005), milho (AMARANTE et al., 2010; KALAJI et al., 2017), trigo, arroz e aveia (ARGENTA et al., 2001). Uma boa associação entre o índice do medidor de clorofila SPAD-502 e o teor de clorofila (obtido pelo método destrutivo) em plantas, também, tem sido relatada em algumas culturas, como cana-de-açúcar (JANGPROMMA et al., 2010), soja (RODRIGUEZ-LUCENA et al., 2010) e feijão comum (SILVEIRA et al., 2003).

Dessa forma, é possível estimar o conteúdo de N foliar e selecionar as doses adequadas de N por meio de dispositivos portáteis como o ClorofiLog<sup>®</sup>. No entanto, para o sorgo sacarino faltam informações sobre a eficácia desta ferramenta. Este dispositivo utiliza fotodiodos emitidos em três comprimentos de onda: dois emitem dentro da banda do vermelho, próximo aos picos de cada tipo de clorofila ( $\lambda = 635$  e  $660$  nm) e um no infravermelho próximo ( $\lambda = 880$  nm). Dessa forma, um sensor inferior recebe a radiação transmitida pela estrutura foliar e, a partir desses dados, o dispositivo fornece os índices relativos de clorofila (FALKER, 2008).

Após a calibração adequada do medidor de clorofila, é possível estimar o estado de N nas plantas e usar as informações para tomar decisões sobre quando e quanto N aplicar. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi determinar a relação entre os pigmentos fotossintéticos extraídos em DMSO e o teor de N das folhas com as leituras obtidas no clorofilômetro portátil (ClorofiLog<sup>®</sup>), em função da aplicação de doses de N no sorgo sacarino.

## 5.2. Material e Métodos

### 5.2.1 Área experimental

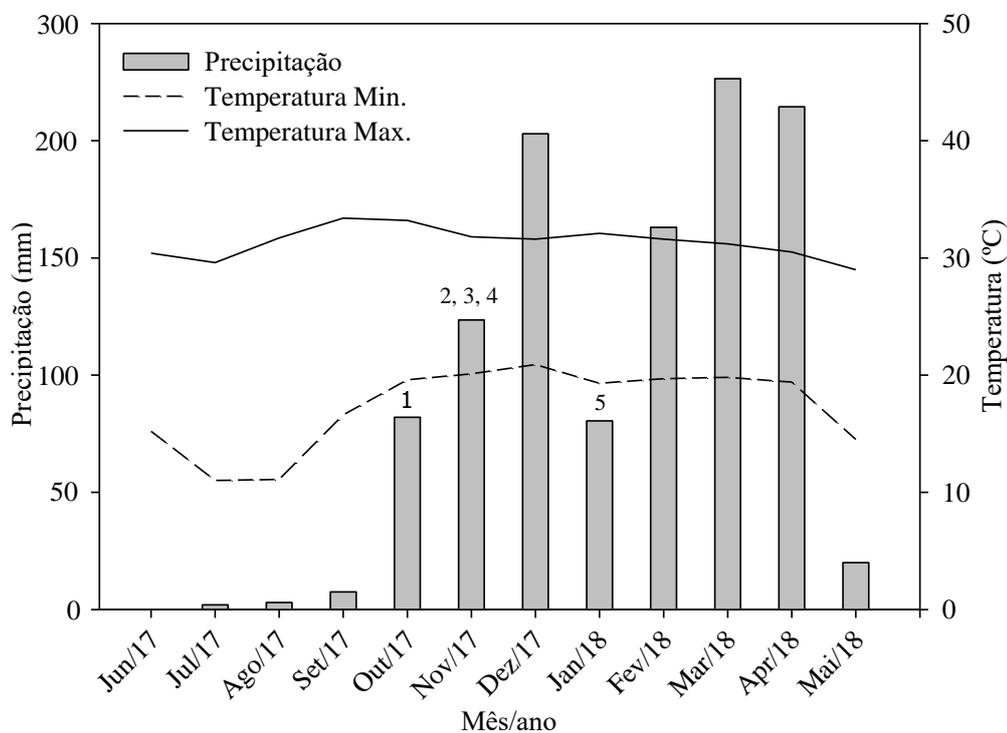
O experimento foi conduzido na área experimental da Nexsteppe Sementes do Brasil, em Rio Verde - GO, Brasil ( $17^{\circ} 47'50''S$ ,  $50^{\circ} 54'0''W$  e altitude de 730 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima regional é de Savana Tropical (AW) com inverno seco e verão chuvoso. Antes do plantio, a amostragem do solo foi realizada a 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade para avaliar os atributos químicos e o teor de argila (Tabela 1) e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018).

**Tabela 1.** Principais características químicas e texturais do solo da área experimental.

Prof.	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	Arg	Are	Si
m	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> -----			-----			----- % -----			
0-0,2	5,6	40,6	14,1	0,3	2,6	1,2	3,1	4,1	7,0	56	45	34	21
0,2-0,4	4,9	31,4	12,6	0,1	1,5	0,5	4,1	2,1	6,2	36	48	37	15

### 5.2.2 Design experimental e procedimentos

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas foram constituídas de cinco doses de N aplicadas na sementeira (0, 15, 30, 45 e 60 kg ha<sup>-1</sup>), e as subparcelas, por cinco doses de N em cobertura (equivalentes para completar a dose final para 0, 100, 200, 300 e 400 kg ha<sup>-1</sup>), aplicados manualmente ao lado da linha de sementeira, sem incorporação, aos 26 Dias Após a Emergência (DAE) das plântulas, utilizando como fonte a ureia (45% de N). Cada parcela foi composta por 62,5 m<sup>2</sup> e as subparcelas apresentavam 12,5 m<sup>2</sup>, com espaçamento entre linhas de 0,5 m e população de 120.000 plantas ha<sup>-1</sup>. O híbrido de sorgo sacarino foi o Malibu 5010, da empresa Nexsteppe. A precipitação na área experimental e a variação da temperatura durante o período de condução do estudo estão apresentadas na Figura 1 (INMET, 2018).



- 1 - Aplicação de N no plantio. 2 - Leituras com o medidor de clorofila em estádio V5.  
 3 - Aplicação de N em cobertura no estádio V5. 4 - Leituras com medidor de clorofila em estádio V9.  
 5 - Colheita

**Figura 1.** Precipitação (mm) e temperatura média mensal observada na área experimental em Rio Verde, GO, Brasil.

### 5.2.3 Avaliações

Aos 25 DAE e antes da adubação de cobertura, foram realizadas as leituras com o clorofilômetro portátil (modelo ClorofiLog<sup>®</sup> da Falker, capaz de gerar leituras de clorofila *a*, *b* e total a partir da absorvância de energia nos comprimentos de onda de 650 e 940 nm) quando as plantas se encontravam em estágio V5 de desenvolvimento. Em cada parcela foram tomadas leituras em três plantas, sendo realizadas duas leituras em cada planta – uma em cada lado da nervura central, sempre no terço médio da última folha completamente desenvolvida, que define cada um dos estádios de desenvolvimento.

Logo após a realização das leituras com o clorofilômetro portátil, e nos exatos pontos em que elas foram tomadas, discos foliares foram coletados utilizando um perfurador metálico vazado com área de 115 mm<sup>2</sup>. Os discos foliares foram acondicionados em tubos-teste previamente identificados, acondicionados individualmente em papel alumínio para proteção contra a radiação solar e colocados em caixa térmica com gelo seco a fim de prevenir a desnaturação de enzimas. Seguindo a metodologia adaptada por Hiscox & Israelstam (1979). Após a dissolução das amostras, utilizando 5 mL do reagente dimetilsulfóxido (DMSO) e incubação a 70°C por 30 min em banho-maria, procedeu-se a extração e determinação via espectrofotometria dos pigmentos fotossintéticos: clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total.

Imediatamente, após as leituras com clorofilômetro e coleta de discos foliares, realizou-se a amostragem de cinco plantas por parcela, e elas foram levadas para laboratório, separadas em colmo e folhas para posterior secagem em estufa com circulação forçada de ar a 70°C. Após a secagem, determinou-se a massa seca das folhas e colmos, medida em balança semianalítica. Amostras foliares de cinco plantas/parcela foram coletadas, retirando a última folha completamente desenvolvida, e analisadas quanto ao teor de N foliar (MALAVOLTA et al., 1997).

Aos 43 DAE, em estágio V9 de desenvolvimento do sorgo sacarino foram tomadas as mesmas avaliações descritas em V5 com o objetivo de obter respostas quanto ao efeito da adubação nitrogenada realizada em cobertura (subparcelas). A correlação de Pearson (*r*) entre os índices de clorofila *a*, *b* e total também foram avaliadas, comparando as leituras obtidas com o clorofilômetro portátil e o método

destrutivo. Avaliou-se ainda, a correlação entre as leituras obtidas com o clorofilômetro portátil e o teor de N foliar.

Por ocasião da maturidade fisiológica dos grãos, realizou-se a colheita do sorgo sacarino (105 DAE), em que se determinou a altura de plantas, diâmetro de colmo, número de perfilhos, produção de massa fresca, produção de massa seca, acúmulo de N, umidade de colmos, °Brix do caldo e produtividade estimada de etanol.

#### 5.2.4 Análise dos dados

Os dados obtidos no estágio V5 foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA). Análises de regressão foram utilizadas para descrever o efeito das doses de N no conteúdo de clorofila e na massa seca. Os parâmetros usados para escolher o melhor modelo de regressão polinomial foram a significância do teste F ( $P < 0,05$ ),  $R^2$  previsto e ajustado (maior que 0,8) e a independência dos gráficos residuais (incluindo o teste de Durbin-Watson para verificar a correlação entre os resíduos adjacentes). Mais de um modelo atendeu a esses critérios, o modelo com o menor número de parâmetros foi escolhido.

Os dados do estágio V9 foram submetidos à ANOVA como delineamento de parcelas subdivididas com doses basais de N nas parcelas principais e doses de N em cobertura nas subparcelas. Quando não houve efeito de interação, os dados foram analisados por meio de análises de regressão, conforme descrito anteriormente. No entanto, quando as interações foram significativas pelo teste F, elas foram particionadas usando uma metodologia de superfície de resposta e o efeito isolado de cada fator foi desconsiderado. A correlação de Pearson ( $r$ ) entre clorofila *a*, *b* ou clorofila total e leituras do medidor ClorofiLog<sup>®</sup> e N total também foi avaliada por meio do software Sisvar (FERREIRA, 2014).

### 5.3 Resultados e Discussão

#### 5.3.1 Parâmetros avaliados após a adubação de semeadura (V5)

##### 5.3.1.1 Relação entre índices de clorofila (método destrutivo e não destrutivo) e efeitos das doses de N na planta

Aos 25 DAE, não houve correlação entre as doses de N, níveis de N nos tecidos vegetais, massa seca e conteúdo de clorofila *a*, *b* e total, determinado tanto pelas leituras do ClorofiLog<sup>®</sup> quanto pelo método destrutivo (Tabela 2).

**Tabela 2.** Correlação de Pearson (*r*) entre clorofila *a* (Chlor *a*), *b* (Chlor *b*) e clorofila total (Chlor total) determinada pelas leituras do ClorofiLog<sup>®</sup> e método destrutivo (DMSO), teor de N, massa seca e doses de N nas folhas do sorgo sacarino em estágio V5.

	<b>Chlor <i>a</i></b>	<b>Chlor <i>b</i></b>	<b>Chlor total</b>	<b>Massa Seca</b>	<b>Teor de N</b>	<b>Doses de N</b>
<b>Doses de N</b>	-0,05 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-
<b>Teor de N</b>	0,38 <sup>ns</sup>	-0,36 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	-0,31 <sup>ns</sup>	-	-
<b>Chlor <i>a</i> (DMSO)</b>	0,10 <sup>ns</sup>	-	-	0,01 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>
<b>Chlor <i>b</i> (DMSO)</b>	-	0,15 <sup>ns</sup>	-	0,04 <sup>ns</sup>	-0,39 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>
<b>Chlor total (DMSO)</b>	-	-	-0,13 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> = não significativo a 0,05 de probabilidade

Os níveis de clorofila estimados pelo ClorofiLog<sup>®</sup> podem diferir daqueles obtidos por métodos destrutivos, uma vez que a distribuição da clorofila nas folhas pode ser irregular, principalmente em folhas com alto teor de clorofila, resultando na subestimação da clorofila pelo ClorofiLog<sup>®</sup> (UDDLING et al., 2007).

O aumento dos níveis de N no solo pode resultar em maior conteúdo de clorofila nas plantas, uma vez que o N é um componente estrutural das moléculas de clorofila. No entanto, geralmente realiza uma correlação não linear, atingindo um *plateau*, e depois disso o aumento do teor de N nos tecidos da planta não é seguido por aumentos no teor de clorofila (ARGENTA et al., 2001).

Solos com alta matéria orgânica (M.O), conforme observado neste estudo (Tabela 1), geralmente possuem alto teor de N, portanto este *plateau*, pode ser alcançado e a aplicação de N pode não aumentar o teor de clorofila, principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura, quando o N do solo pode atender às necessidades de N da cultura.

Na verdade, o sorgo sacarino tem baixa demanda de N nos estágios iniciais de desenvolvimento (SOARES et al., 2014). Além disso, após a absorção de N pela planta,

a conversão do N em clorofila leva algum tempo. Considerando todos esses fatos, a determinação de N pelo ClorofiLog<sup>®</sup> pode não estar exatamente em estágio V5.

### 5.3.1.2 Biomassa e teor de clorofila em resposta a adubação com N

A aplicação de nitrogênio na semeadura não afetou o acúmulo de massa seca total e o índice de clorofila *a*, *b* e clorofila total estimada pelo ClorofiLog<sup>®</sup> no estágio V5, com média de 6,75 g/planta, 31,5, 6,6 e 38,1 respectivamente (Tabela 3).

A clorofila medida pelo método destrutivo teve pequena diferença entre os tratamentos para os valores de clorofila *a*, *b* e clorofila total. Os maiores valores de clorofila *a* e clorofila total foram encontrados na dose de 25 kg ha<sup>-1</sup> de N.

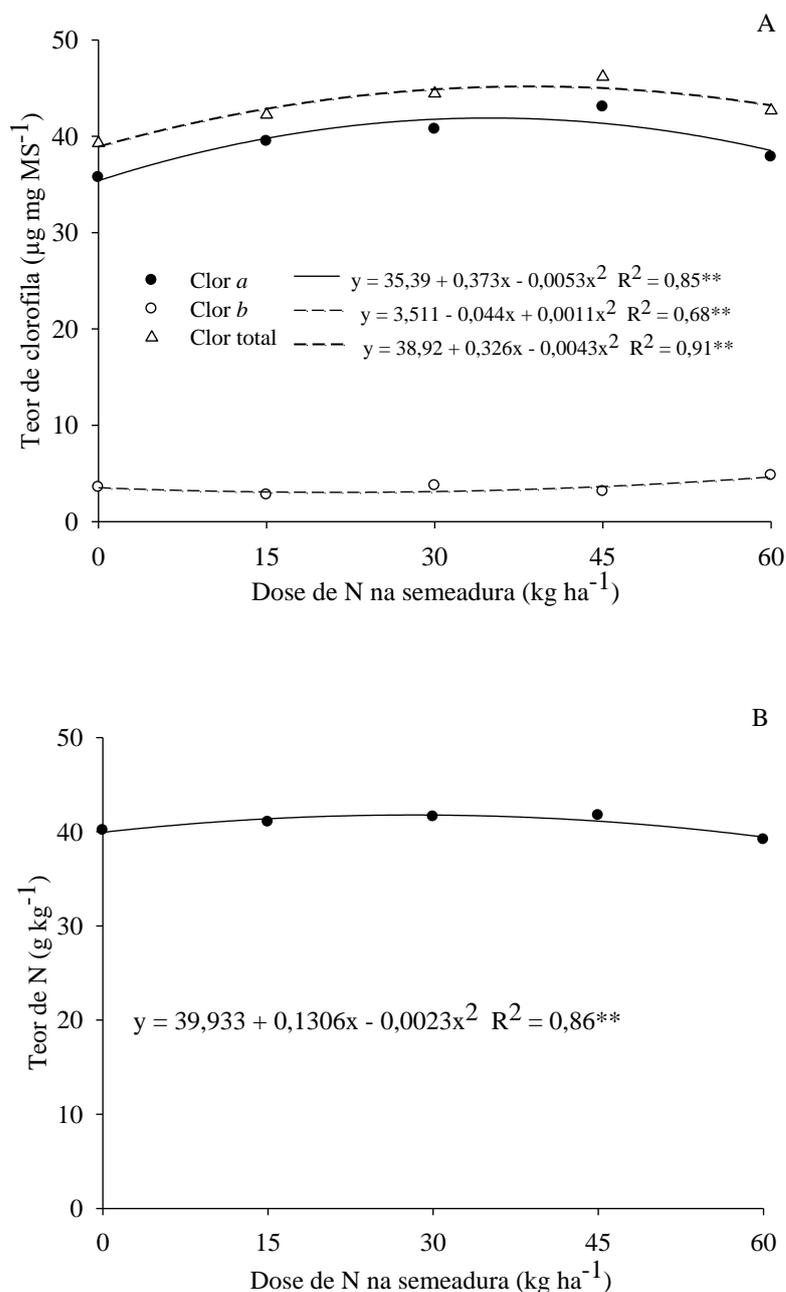
**Tabela 3.** Índice de clorofila *a* (Chlor *a*), *b* (Chlor *b*) e clorofila total (Chlor tot) determinada pelas leituras do ClorofiLog<sup>®</sup> e massa seca total (MST) no sorgo sacarino em estágio V5.

Doses de N aplicadas no plantio	Chlor <i>a</i>	Chlor <i>b</i>	Chlor tot	MST
kg ha <sup>-1</sup>	----- Índice ClorofiLog <sup>®</sup> -----			g/planta
<b>0</b>	31,5	6,71	38,2	6,25
<b>15</b>	31,7	6,28	38,0	6,75
<b>30</b>	31,6	6,82	38,4	7,00
<b>45</b>	31,6	6,15	37,8	6,25
<b>60</b>	31,3	7,03	38,3	7,50
<b>Média</b>	31,5 <sup>ns</sup>	6,60 <sup>ns</sup>	38,14 <sup>ns</sup>	6,75 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> = não significativo a 0,05 de probabilidade

O teor de clorofila *b* apresentou o maior teor com aplicação de 20 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura (Figura 2A). Os níveis de nitrogênio variaram de 39,16 a 41,72 g N kg<sup>-1</sup> de massa seca e, portanto, o teor de N nas folhas confirma, em parte, o consumo de luxo pelas plantas (Figura 2B).

O ajuste quadrático da equação revela que a aplicação de 20 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura foi suficiente para manter alto suprimento de N, considerando o teor adequado de N nas folhas de 32,16 até 35,33 para diferentes doses e cultivares de sorgo sacarino conforme proposto por Soares et al. (2014).



**Figura 2.** Teores de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total (A) determinados pelo método destrutivo e teor de N (B) em folhas de sorgo sacarino em estágio V5 em função de doses de N aplicadas na sementeira da cultura.

\*\* regressão significativa à 0,01 de probabilidade.

Esse alto teor de N nos tecidos vegetais pode ser explicado pela alta disponibilidade de N no solo, resultando em maior absorção de N pelas plantas de sorgo (Tabela 1), que se acumula nas organelas das células vegetais, principalmente nos vacúolos, caracterizando o "consumo de luxo" (ARGENTA et al., 2001).

Vários trabalhos relataram que os níveis de clorofila permitem a avaliação indireta do estado de N nas plantas (UDDLING et al., 2007; COELHO et al., 2010; SAMBORSKI et al., 2009), uma vez que este nutriente está envolvido na síntese de aminoácidos, que está associada com os cloroplastos (RAMBO et al., 2004). Além disso, o N é um elemento estrutural nas moléculas de clorofila (SINGH et al., 2012). Assim, muitos estudos têm sido realizados para desenvolver algoritmos que traduzam o valor fornecido pelo sensor portátil em decisões sobre o quanto de N aplicar nas lavouras (RAMIREZ, 2010; SOLARI et al., 2010).

Um estudo recente recomendou 20 a 30 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura para produzir 50 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos de sorgo (massa verde) em solos com altos níveis de fertilidade (SANTOS et al., 2015). Esses resultados corroboram os encontrados neste estudo, e foi verificado que as plantas de sorgo sacarino apresentaram maiores teores de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total mensurada pelo método destrutivo. Esses resultados associados às leituras do ClorofiLog<sup>®</sup> podem indicar as leituras críticas de clorofila, significando os níveis acima daqueles para os quais nenhuma resposta para a aplicação de doses de N é esperada.

### 5.3.2 Parâmetros avaliados após aplicação de N em cobertura (V9)

#### 5.3.2.1 Relação entre os índices de clorofila (método destrutivo e não destrutivo) e efeitos das doses de N na planta

Houve correlação significativa entre os índices de clorofila *a*, *b* e clorofila total estimada pelo ClorofiLog<sup>®</sup> e leituras de clorofila pelo método destrutivo e a produção de massa seca total, com coeficiente de determinação variando de 0,50 a 0,89. No entanto, essas medidas não foram correlacionadas com as doses de N (Tabela 4).

A clorofila total estimada pelo ClorofiLog<sup>®</sup> apresentou correlação positiva com a produção de massa seca e o teor de N nas folhas, com coeficiente de determinação de 0,70 e 0,40, respectivamente. Além disso, o conteúdo de clorofila *a*, *b* e clorofila total, determinado pelo método destrutivo se correlacionaram significativamente com a produção de massa seca (*r* maior que 0,85).

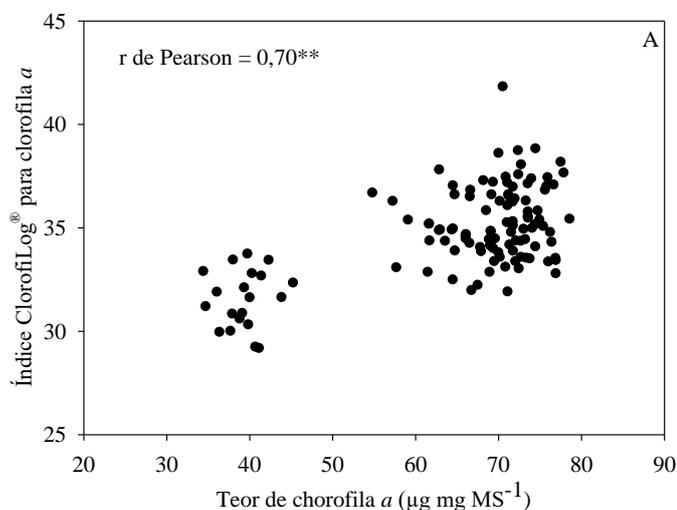
**Tabela 4.** Dispersão dos dados e correlação de Pearson ( $r$ ) entre os índices de clorofila  $a$  (Chlor  $a$ ),  $b$  (Chlor  $b$ ) e clorofila total (Chlor total) determinadas pelas leituras em espectrofotômetro (DMSO), ClorofiLog<sup>®</sup>, teor de N, produção de massa seca e doses de N nas folhas do sorgo sacarino em estágio V9.

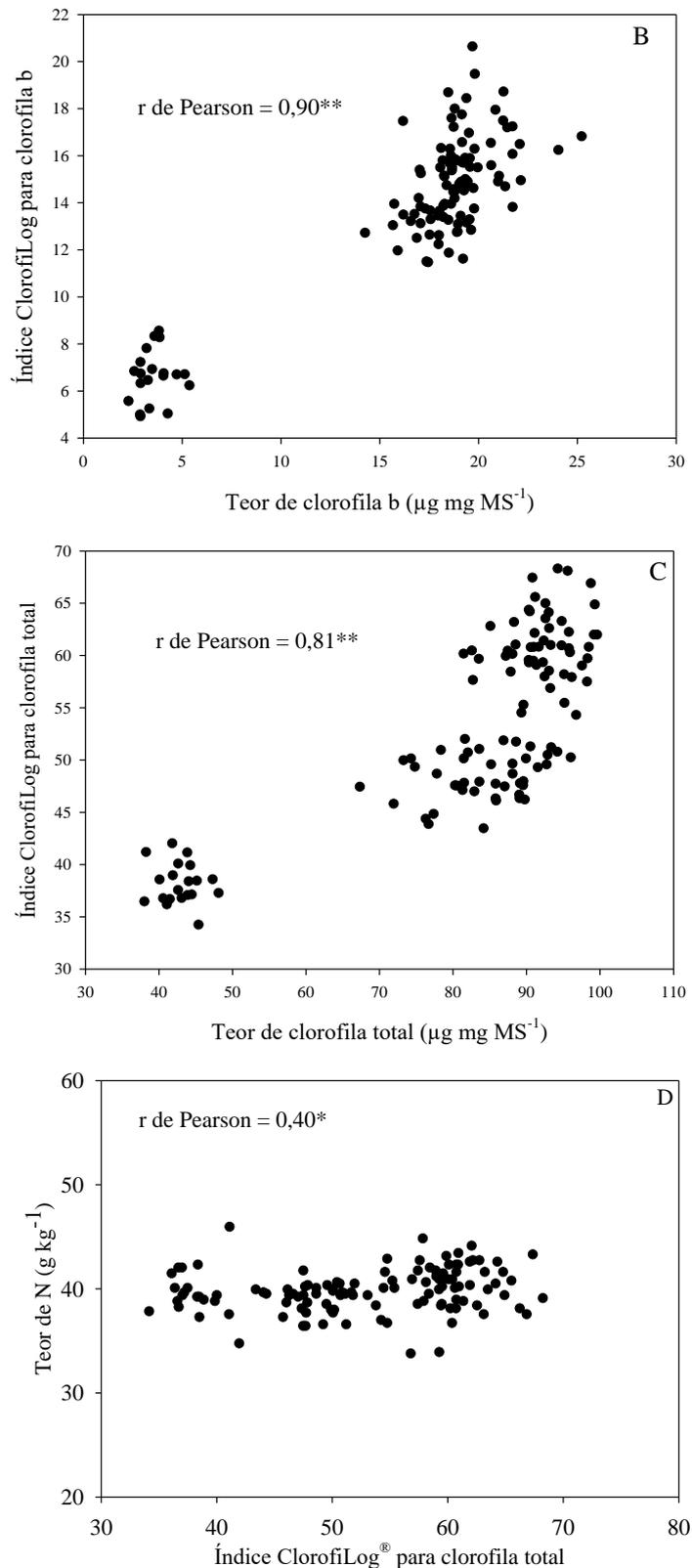
	Chlor $a$	Chlor $b$	Chlor total	Chlor $a$ (DMSO)	Chlor $b$ (DMSO)	Chlor total (DMSO)	Teor de N
<b>Doses de N</b>	0,30 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
<b>Teor de N</b>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	0,40*	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,23 <sup>ns</sup>	-0,19 <sup>ns</sup>	-
<b>Massa seca total</b>	0,50*	0,81**	0,70*	0,85*	0,89**	0,87**	-0,15 <sup>ns</sup>

\* significativo a 0,05 de probabilidade, \*\* significativo a 0,01 de probabilidade, <sup>ns</sup> não significativo a 0,05 de probabilidade

Correlações significativas entre o conteúdo de N nas folhas e leituras do medidor de clorofila foram relatadas para feijão (BARBOSA FILHO et al., 2008; SILVEIRA et al., 2003), batata (COELHO et al., 2010), milho (AMARANTE et al., 2010; KALAJI et al., 2017), trigo (PIAS et al., 2014; CEROVIC et al., 2005) e outras culturas (TORRES NETTO et al., 2005). Nas folhas, 50 a 70% do N são componentes estruturais das moléculas de clorofila ou enzimas relacionadas aos cloroplastos (SINGH et al., 2012).

O ClorofiLog<sup>®</sup> apresentou correlação direta com a clorofila extraível, com coeficiente de determinação de 0,70, 0,90 e 0,81 para clorofila  $a$ ,  $b$  e clorofila total, respectivamente (Figura 3A, B e C).





**Figura 3.** Dispersão dos dados e correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores de clorofila  $a$  (A),  $b$  (B) e total (C) determinada via leitura em espectrofotômetro, índice ClorofiLog<sup>®</sup> e teor de N (D) em folhas de sorgo sacarino.

\*\* correlação significativa a 0,01 de probabilidade

Resultados semelhantes foram obtidos com soja (MARKWELL et al., 1995) e milho (ARGENTA et al., 2001). No entanto, correlação significativa com o “status” de N nas folhas foi observada apenas com a clorofila total (Figura 3D).

De qualquer forma, as leituras de clorofila fornecidas por dispositivos portáteis podem substituir as determinações de N padrão, uma vez que essas medidas têm baixo custo, são mais fáceis de realizar e fornecem quantificação de N em tempo real, permitindo um maior número de medidas, o que é importante para aplicação de taxas variáveis de fertilizantes e corrigindo prontamente as deficiências de N por meio da fertilização.

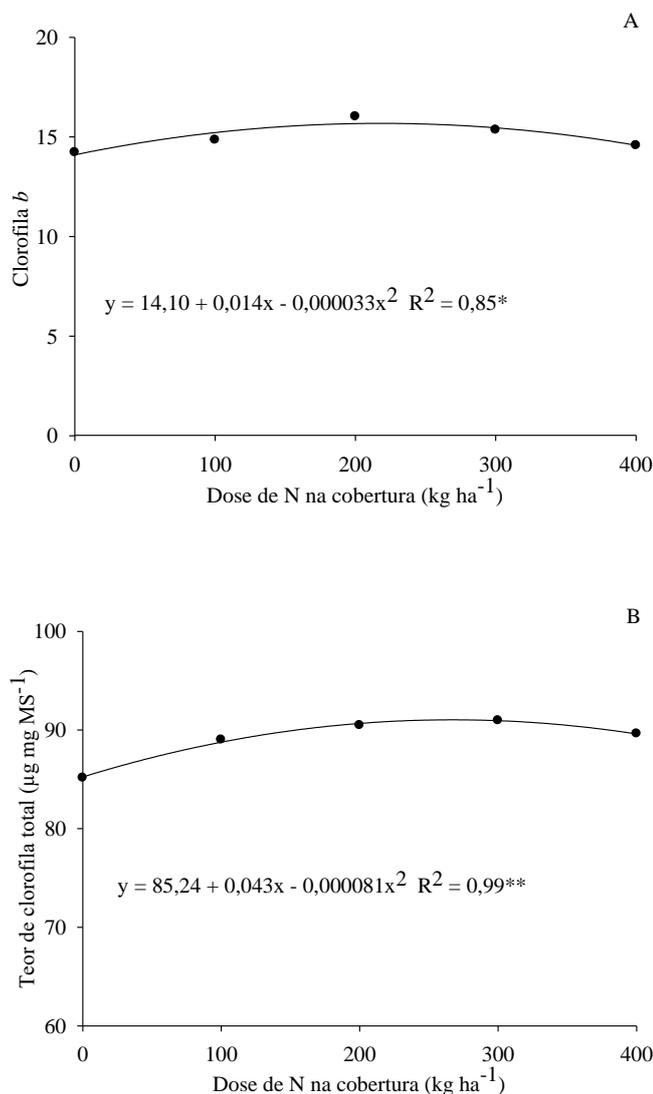
Quando altas doses de N são aplicadas, a absorção de N pode não ser seguida por aumento no conteúdo de clorofila, o que é esperado, uma vez que as plantas não produzirão mais moléculas de clorofila do que precisam. Desta forma, o excedente de N é acumulado como nitrato e não pode ser quantificado por leituras do medidor de clorofila (DWYER et al., 1995), diminuindo o coeficiente de determinação (BLACKMER et al., 1995; ARGENTA et al., 2001; CEROVIC et al., 2005).

É importante ressaltar que os modelos que descrevem a correlação entre as leituras feitas com ClorofiLog<sup>®</sup> diferem para cada cultura, pelas características intrínsecas de cada espécie, de forma que cada cultura requer uma calibração independente (UDDLING et al., 2007).

A avaliação de pigmentos fotossintéticos por métodos clássicos de detecção, baseados no uso de solventes como o DMSO, apresenta alta capacidade difusiva através das membranas das folhas e são muito eficientes na dissolução das moléculas, o que facilita a detecção (HISCOX e ISRAELSTAM, 1979). No entanto, são métodos destrutivos, caros e não permitem a determinação *in situ*, conforme observado com dispositivos de medição de clorofila.

#### 5.3.2.2 Biomassa e conteúdo de clorofila em resposta a adubação com N

O aumento das doses de N não alterou os parâmetros de clorofila *a* e clorofila total medido pelo ClorofiLog<sup>®</sup>, e apresentaram médias de 40,5 e 55,5 respectivamente. O ClorofiLog<sup>®</sup> para clorofila *b* não apresentou interação significativa entre as fontes de variação analisadas. No entanto, houve ajuste do modelo quadrático, após o aumento da aplicação de doses de N em cobertura (Figura 4A).



**Figura 4.** Índice ClorofiLog<sup>®</sup> para clorofila *b* (A) e teor de clorofila total determinados via leitura em espectrofotômetro (B) em folhas de sorgo sacarino em estágio V9 em função de doses de N aplicadas em cobertura.

\*regressão significativa a 0,05 de probabilidade \*\*regressão significativa a 0,01 de probabilidade

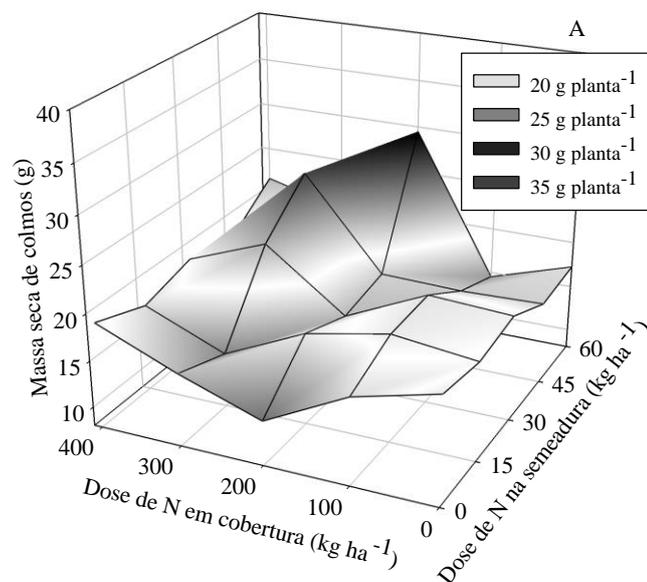
O maior aumento da clorofila *b* foi obtido com doses de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, corroborando Pereira Filho et al. (2013), que obtiveram os maiores incrementos de produção de massa fresca e °Brix aplicando  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em sorgo sacarino BR 506 cultivado em solos de alta fertilidade.

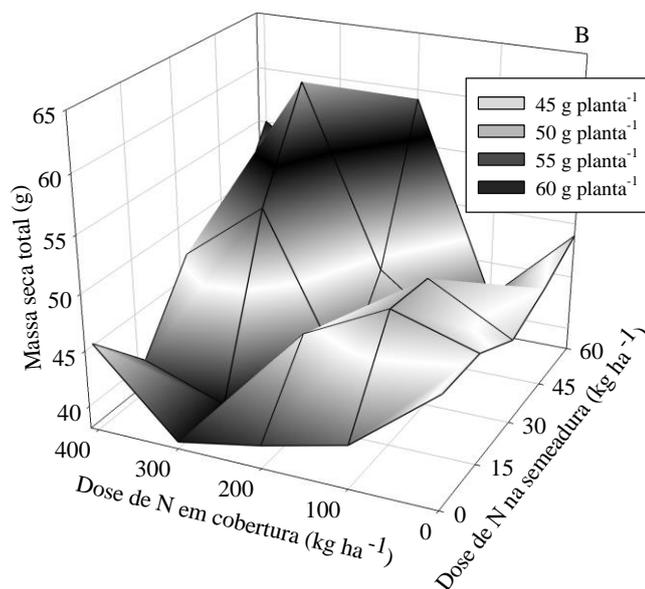
A luz é um recurso fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois muitas respostas morfológicas das plantas dependem não apenas da presença, atenuação ou ausência de luz, mas também da variação de sua qualidade espectral (MORINI e MULEO, 2003). Sabe-se que em ambientes sombreados há maior transmitância de luz na faixa do azul (400-500 nm), indicando que o balanço energético

pode favorecer a absorção de energia pela clorofila *b*, por estarem associados aos centros de reação do fotossistema II e têm a capacidade de auxiliar no desempenho fotossintético da planta e atenuar a fotoxidação das células, resultando em ganhos de produtividade (NAKAZONO et al., 2001).

Em relação à análise destrutiva em V9, os teores de clorofila *a*, *b* e o teor de N foliar não foram afetados pelo aumento das doses de N aplicadas na semeadura e em cobertura no sorgo. Esses parâmetros apresentaram valores médios de  $69,3 \mu\text{g mg MS}^{-1}$ ,  $19,1 \mu\text{g mg MS}^{-1}$  e  $39,6 \text{ g N kg}^{-1}$  de massa seca, respectivamente. A análise da clorofila total foi ajustada significativamente em função da aplicação de N em cobertura, de forma que o maior valor de clorofila total foi  $90,9 \mu\text{g mg MS}^{-1}$  obtido com a aplicação de aproximadamente  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (Figura 4B).

Em relação aos parâmetros de biomassa medidos em V9, não foi observada diferença significativa na massa seca de folhas, que apresentou média de  $28,1 \text{ g}$  por planta. Houve efeito de interação entre os fatores (época de fertilização com N) para a massa seca de colmos e a massa seca total. Os incrementos de massa seca de colmos de  $29,5 \text{ g}$  por planta obtidos com a aplicação de aproximadamente  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura foram favorecidos pelos incrementos iniciais no desenvolvimento do sorgo (V5) quando a maior dose de N foi aplicada na semeadura (Figura 5A).





**Figura 5.** Massa seca de colmos (A) e massa seca total (B) do sorgo sacarino em estágio V9 em função de doses de N aplicadas na sementeira e em cobertura.

Corroborando os resultados obtidos para a massa seca de colmos, o aumento das doses de N na sementeira resultou em plantas com o maior aumento da massa seca total, 59,2 g por planta, observados na adubação total com aproximadamente 200 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 5B).

A menor dose (100 kg ha<sup>-1</sup> de N) aplicada em cobertura proporcionou redução (49%) na massa seca de colmos, evidenciando a importância de fertilização nitrogenada adequada na sementeira e em cobertura do sorgo sacarino. Donato et al. (2004) avaliaram o teor de clorofila em variedades de cana-de-açúcar após aplicação de doses crescentes de N e observaram que a variedade com maior acúmulo de biomassa também apresentou maior teor de clorofila *a* e *b*.

No presente estudo, a dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicada em cobertura promoveu os maiores teores de clorofila *b* (ChlorofiLog<sup>®</sup>), clorofila total (método destrutivo), massa seca total de colmos e massa seca total. Isso mostra que as leituras feitas com o ChlorofiLog<sup>®</sup> estimam corretamente o conteúdo de clorofila de extração e o rendimento da cultura em V9.

### 5.3.3 Análises biométricas e de produtividade (colheita)

Na colheita, a interação entre as doses de N na sementeira e em cobertura não foi significativa para nenhum dos parâmetros avaliados (altura de plantas, diâmetro de

colmos, produção de massa fresca, produção de massa seca, acúmulo de N na planta, umidade do caule e °Brix do caldo). Assim, o diâmetro de colmos não foi afetado pela fertilização na semeadura e/ou cobertura, com média de 21,68 mm (Tabela 5).

Embora a altura das plantas tenha apresentado diferenças entre as parcelas e as subparcelas pelo teste F, ela não apresentou significância para os modelos de regressão testados. A altura média das plantas foi de 3,16 m. Giacomini et al. (2013), em experimento realizado na Região Central do Tocantins, em solos de alta fertilidade, obtiveram resultados semelhantes para as cultivares de sorgo sacarino BR 500, BR 504 e BR 505.

O teor de umidade dos colmos na colheita também não diferiu entre os tratamentos e sua média geral foi de 76,8%. Da mesma forma, não houve efeito das parcelas e/ou subparcelas no acúmulo de massa seca, com produtividade média de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. A ausência de diferenças na produtividade de matéria seca, mesmo na ausência da fertilização com N, reforça a hipótese de que a quantidade de N disponível no solo foi suficiente para suprir a demanda de N pelo sorgo sem causar perdas de produtividade. Obviamente, essas hipóteses precisam ser testadas para que quaisquer conclusões sejam tiradas.

**Tabela 5.** Altura de plantas (AP), diâmetro de colmo (DC), produção de massa fresca (PMF), produção de massa seca (PMS), acúmulo de N (AN), produção de etanol (PE), umidade do colmo (UC) e °Brix do caldo do sorgo sacarino em função de doses de N.

<b>Doses de N Total</b>	<b>AP</b>	<b>DC</b>	<b>PMF</b>	<b>PMS</b>	<b>AN</b>	<b>PE</b>	<b>UC</b>	<b>°Brix</b>
<b>-kg ha<sup>-1</sup>-</b>	<b>-m-</b>	<b>-mm-</b>	<b>----Mg ha<sup>-1</sup>----</b>		<b>kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>L ha<sup>-1</sup></b>	<b>--%--</b>	<b>----</b>
<b>0</b>	3,17	21,75	40,4	19,49	138,7	4,0	77,1	13,0
<b>100</b>	3,22	21,74	42,1	19,28	140,2	3,9	77,0	13,0
<b>200</b>	3,15	21,62	45,6	20,28	144,3	4,1	76,4	13,2
<b>300</b>	3,12	21,68	43,7	20,26	142,8	4,1	76,9	13,0
<b>400</b>	3,13	21,61	43,6	20,75	142,1	4,0	76,4	12,9
<b>Média</b>	3,16 <sup>ns</sup>	21,68 <sup>ns</sup>	43,1 <sup>ns</sup>	20,0 <sup>ns</sup>	141,6 <sup>ns</sup>	4,0 <sup>ns</sup>	76,8 <sup>ns</sup>	13,0 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> não significativo a 0,05 de probabilidade

Conforme verificado na produção de massa seca, o acúmulo de N total não foi afetado pelos fatores avaliados, com valor médio exportado de 141,56 kg ha<sup>-1</sup> de N. Em

estudo realizado na Flórida (EUA), Singh et al. (2012) encontraram resultados semelhantes aos observados neste estudo. Esses autores mencionaram que, para cada tonelada de matéria seca produzida, foram extraídos 6,97 kg de N. O híbrido Malibu 5010, utilizado no presente estudo, consumiu 7,07 kg de N por tonelada de matéria seca produzida.

A falta de resposta para a fertilização com N no final do ciclo da cultura pode ser justificada em parte pelo alto teor de matéria orgânica do solo, com fornecimento estimado de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N (dados não medidos). Segundo Sousa e Lobato (2004), cada 10 g dm<sup>-3</sup> de matéria orgânica pode fornecer 30 kg ha<sup>-1</sup> de N.

Além disso, o sorgo sacarino é reconhecido pela alta eficiência no uso de N. Barbanti et al. (2006) relatam que o sorgo pode produzir a cerca de 20 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca apenas com a reserva de N do solo. A partir desses valores e desconsiderando as perdas de N por área e condições climáticas adversas, a liberação de N da matéria orgânica do solo seria capaz de fornecer a quantidade de N exportada pelos colmos do sorgo neste estudo, que representa 70% do total de biomassa seca produzida (SINGH et al., 2012).

O °Brix do caldo extraído dos colmos também não foi alterado pelos tratamentos, apresentando valor médio de 13°. A produção de etanol se torna economicamente viável quando o sorgo sacarino apresenta ART mínimo de 12,5%, correspondendo ao valor de 14,25 a 14,50 °Brix, sendo esta característica influenciada diretamente pela atividade fotossintética (EMBRAPA, 2013).

A característica °Brix observada neste estudo apresenta média geral abaixo da recomendada para o cultivo do sorgo sacarino, podendo estar associada à influência das condições climáticas durante o ciclo vegetativo, ou seja, maior volume de chuvas, menor demanda fisiológica de água pela planta e conseqüente menor concentração de sólidos solúveis no caldo. Assim, esses dados indicam que há necessidade de maiores investigações sobre o manejo por meio de épocas de plantio dentro do híbrido escolhido, fornecendo informações sobre um comportamento mais estável entre as safras.

Vale ressaltar também que doses excessivas de N podem prolongar a fase vegetativa do sorgo, reduzindo as concentrações de açúcares em seus colmos. Isso porque o acúmulo de glicose, frutose e sacarose tem sido relacionado com a redução da atividade fotossintética, principalmente quando se inicia a fase de maturação fisiológica dos grãos (JANG e SHEEN, 1994).

Como base na produção de 43,1 Mg ha<sup>-1</sup> de massa fresca, umidade de 76,8% e 13 de °Brix, estimou-se a produção de etanol, que também não foi alterada pelos diferentes investimentos de N e apresentou valor médio de 4.000 L ha<sup>-1</sup>. Emygdio et al. (2011), em um ensaio com produtividade da parte aérea de 40 a 50 Mg ha<sup>-1</sup>, obtiveram produção de etanol variando de 2.640 L ha<sup>-1</sup> a 3.850 L ha<sup>-1</sup> para a cultivar de sorgo BRS 506. Mesmo o °Brix tendo uma média inferior à considerada adequada, a produção total de massa fresca de sorgo apresentou rendimento satisfatório, podendo, em termos numéricos, ter suprido parcialmente a redução dos teores de açúcares observados, apresentando potencial safra para a produção de biocombustível.

Esses resultados certamente contribuíram para minimizar as perdas de N pela adubação superdimensionada, garantindo maior sustentabilidade do sistema de cultivo. Além disso, a aplicação de altas doses de N pode estender a fase de crescimento vegetativo, reduzindo a concentração de açúcares nos colmos do sorgo sacarino (SAWARGAONKAR et al., 2013).

#### 5.3.4 Conclusões

O ClorofiLog<sup>®</sup> pode ser uma ferramenta útil e confiável para a determinação indireta dos teores de N em folhas de sorgo sacarino, uma vez que os resultados de clorofila *a*, *b* e clorofila total apresentaram correlação muito forte ( $r = >0,80$ ) com os pigmentos fotossintéticos obtidos pelo método destrutivo em estágio V9. No entanto, este dispositivo não pode ser usado para determinação de N em estágios iniciais do desenvolvimento do sorgo sacarino.

No estágio V9, a aplicação de N em cobertura promoveu maiores aumentos na produção de biomassa seca, da clorofila *b* (obtida via ClorofiLog<sup>®</sup>) e clorofila total (obtida pelo método destrutivo). No entanto, os ganhos não foram mantidos até a fase de colheita. Em solos com alto teor de matéria orgânica, a alta disponibilidade de N no solo tende a nivelar os resultados da produção, pois nas condições deste estudo não foram observadas diferenças com o aumento das doses de N aplicadas até 400 kg ha<sup>-1</sup>.

#### 5.3.5 Agradecimentos

Este trabalho foi realizado como parte do projeto NUCLEUS: um centro virtual para fornecer NUE aprimorado por meio de uma abordagem de sistemas integrados

solo-planta para o Reino Unido e o Brasil. Trabalho financiado pela FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo [2015 / 50305-8]; FAPEG - Fundação de Amparo à Pesquisa de Goiás [2015-10267001479]; FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa do Maranhão [RCUK-02771/16]; e o Conselho de Pesquisa em Biotecnologia e Ciências Biológicas [BB / N013201 / 1].

Agradecemos também à empresa Nexsteppe Sementes do Brasil, pelo total suporte logístico e operacional, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa ao 1º autor.

### 5.3.6 Referências Bibliográficas

ARGENTA, G., P.R.F.DA SILVA, C.G. BARTOLINI, E.L. FORSTHOFER, AND M.L. STRIEDER. Relationship of reading of portable chlorophyll meter with contents of extractable chlorophyll and leaf nitrogen in maize. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. v. 13, p. 158-167, 2001.

AMARANTE, C.V.T., C.A. STEFFENS, L. SANGOI, O.Z. ZANARDI, A. MIQUELOTO, AND C. SCHWEITZER. Quantification of chlorophylls in maize leaves by non-destructive optical methods. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. v. 9, p. 39-50, 2010.

BARBANTI, L., S. GRANDI, A. VECCHI, AND G. VENTURI. Sweet and fibre sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads. **European Journal of Agronomy**. v. 25, p. 30-39, 2006.

BARBOSA FILHO, M.P., T. COBUCCI, N.K. FAGERIA, AND P.N. MENDES. Topdressing nitrogen fertilizer requirements determination for irrigated common bean, by leaf portable chlorophyll meter. **Ciência Rural**. v. 38, p. 1843-1848, 2008.

BLACKMER, T.M., J.S. SCHEPERS, AND G.E. VARVEL. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. **Agronomy Journal**. v. 86, p. 934-938, 1995.

CASTRO, S.G.Q., S.T. DECARO JÚNIOR, H.C.J. FRANCO, P.S.G. MAGALHÃES, A. GARSIDE, AND M.A. MUTTON. Best practices of nitrogen fertilization

management for sugarcane under green cane trash blanket in Brazil. **Sugar Tech.** v. 19, p. 1-6, 2016.

CEROVIC, Z.G., A. CARTELAT, Y. GOULAS, AND S. MEYER. In-field assessment of wheat-leaf polyphenolics using the new optical leaf-clip Dualex. **Precision Agriculture.** v. 5, p. 243-249, 2005.

COELHO, F.S., P.C.R. FONTES, M. PUIATTI, J.C.L. NEVES, AND M.C.DE SILVA. Nitrogen rate associated with yield of potato and leaf nitrogen indices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 34, p. 1175-1183, 2010.

DONATO, V.M.T.S., A.G.DE ANDRADE, E.S.DE SOUZA, J.G.E.DE FRANÇA, AND G.A. MACIEL. Enzymatic activity in sugar cane varieties cultivated in vitro under nitrogen levels. **Pesquisa agropecuária Brasileira.** v. 39, p. 1087-1093, 2004.

DWYER, L.M., A.M. ANDERSON, AND B.L. MA. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. **Canadian Journal of Plant Science.** v. 75, p. 179-182, 1995.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **Cultivation of sorghum in sugarcane reform areas.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo (Circular Técnica 186), 2013 (in Portuguese, with abstract in English).

EMYGDIO, B.M., A.P.S. AFONSO, A.C.B. OLIVEIRA, R. PARRELLA, R.E. SCHAFFERT, AND A. MAY. **Performance of sweet sorghum cultivars for ethanol production under different plant densities.** Embrapa Clima Temperado. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento 156), 2011 (in Portuguese, with abstract in English).

FALKER. **Electronic Chlorophyll Content Meter Manual (ClorofiLOG/CFL 1030).** Porto Alegre: FALKER. [Internet] [cited 2019 April 14, 2008. Available from: <http://www.falker.com.br/produto-clorofilog-medidor-clorofila.php>

FERREIRA, D.F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência Agrotecnologia,** v. 38 (2), p. 109-112, 2014 (in Portuguese, with abstract in English).

GIACOMINI, I., F.L.T. SIQUEIRA, M.M. PEDROZA, S.Q.S. MELLO, F.B. CERQUEIRA, AND L. SALLA. Potential use of sweet sorghum for ethanol

production in Tocantins state. **Revista Agrogeoambiental**. v. 5, p. 73-81, 2013. (in Portuguese, with abstract in English).

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Dados históricos da Estação Rio Verde - GO (OMM: 86752)**, 2014. Retrieved from <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> (in Portuguese).

HISCOX, J.D., AND G.F. ISRAELSTAM. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**. v. 57, p. 1332-1334, 1979.

JANG, J.G., AND J. SHENN. Sugar sensing in higher plants. **Plant Cell**. v. 6, p. 1665-1679, 1994.

JANGPROMMA, N., S. KITTHAISONG, K. LOMTHAISONG, S. DADUANG, P. JAISIL, AND S.A. THAMMASIRIRAK. Proteomics analysis of drought stress-responsive proteins as biomarker for droughttolerant sugarcane cultivars. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**. v. 2, p. 89-102, 2010.

JIFON, J.L., J.P. SYVERTSEN, AND E. WHALEY. Growth environment and leaf anatomy affect nondestructive estimates of chlorophyll and nitrogen in Citrus sp. leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**. v. 130, p. 152-158, 2005.

KALAJI, M.H., P. DĄBROWSKI, M.D. CETNER, I.A. SAMBORSKA, I. ŁUKASIK, M. BRESTIC, M. ZIVCAK, T. HORACZEK, J. MOJSKI, H. KOCIEL, AND B.M. PANCHAL. A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions. **Journal of Plant Nutrition**. v. 40, p. 1024-1034, 2017.

MARKWELL, J., J.C. OSTERMAN, AND J.L. MITCHELL. Calibration of the Minolta SPAD-502-502 leaf chlorophyll meter. **Photosynthesis Research**. v. 46, p. 467-472, 1995.

MALAVOLTA, E., G.C. VITTI, AND A.S. OLIVEIRA. Nutritional status assessment: principles and applications. Piracicaba: **Potafós**. v. 2, p. 319, 1997. (in Portuguese, with abstract in English).

- MORINI, S., AND R. MULEO. Effects of light quality on micropropagation of woody species In: Jain SM, Ishii K Micropropagation of woody trees and fruits. **Dordrecht: Kluwer Academic**. v. 1, p. 3-35, 2003.
- NAKAZONO, E.M., M. DACOSTA, K. FUTATSUGI, AND M.T.S. PAULILO. Early growth of *Euterpe edulis* Mart. in different light environments. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 24, p. 173-179, 2001.
- PEREIRA FILHO, I.A., R.A.C. PARRELLA, J.A.A. MOREIRA, A. MAY, V.F. SOUZA, AND J.C. CRUZ. Evaluation of sweet sorghum [*sorghum bicolor* (L.) moench] cultivars in different sowing densities regarding important characteristics in ethanol production. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. v. 12, p. 118-127, 2013.
- PIAS, O.H.C., A.L. SANTI, M.R. CHERUBIN, J. BERGHETTI, AND T.C. OLIVEIRA. Characterization of spatial variability of the relative chlorophyll index in wheat crop. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 44, p. 451-459, 2014.
- RAMBO, L., P.R.F.DA SILVA, G. ARGENTA, AND C. BAYER. Soil nitrate tests as complementary indices for management of corn nitrogen application. **Ciência Rural**. v. 34, p. 1279-1287, 2004.
- RAMIREZ, M.B. **Monitoring nitrogen levels in the cotton canopy using real-time active-illumination spectral sensing**. 2010. (Thesis Masters) – University of Tennessee, Knoxville.
- RODRIGUEZ-LUCENA, P., L. HERNANDEZ-APAOLAZA, AND J.J. LUCENA. Comparison of iron chelates and complexes supplied as foliar sprays and in nutrient solution to correct iron chlorosis of soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 173, p. 120-126, 2010.
- ROONEY, W.L., J. BLUMENTHAL, B. BEAN, AND J.E. MULLET. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**. v. 1, p. 147-157, 2007.
- SAMBORSKI, S.M., N. TREMBLAY, AND E. FALLON. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**. v. 101, p. 800-816, 2009.

- SANTOS, F.C.DOS., A.V.DE RESENDE, M.R.DE ALBUQUERQUE FILHO, A. MAY, S.C.B. CRUZ, G.DE.A. GRAVINA, AND R.A.C. PARRELLA. **Saccharin sorghum response to NPK fertilization in Cerrado Oxisol from Central Minas Gerais, Brazil**. Embrapa Milho e Sorgo. 2015. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 130) (in Portuguese, with abstract in English).
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, p. 590, 2018.
- SAWARGAONKAR, G.L., M.D. PATIL, E. PAVANI, B.V.S.R. Reddy, and S. Marimuthu. Nitrogen response and water use efficiency of sweet sorghum cultivars. **Field Crops Research**. v. 149, p. 245-251, 2013.
- SILVEIRA, P.M., A.J.B.P. BRAZ, AND A.D. DIDONET. Chlorophyll meter to evaluate the necessity of nitrogen in dry beans. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 38, p. 1083-1087, 2003.
- SINGH, M.P., J.E. ERICKSON, L.E. SOLLENBERGER, K.R. WOODARD, J.M.B. VENDRAMINI, AND J.R. FEDENRO. Mineral composition and biomass partitioning of sweet sorghum grown for bioenergy in the southeastern USA. **Biomass and Bioenergy**. v. 47, p. 1-8, 2012.
- SOARES, E.R., E.L.M. COUTINHO, S.B. RAMOS, M.S.DA SILVA, AND J.C. BARBOSA. Accumulation of dry matter and macronutrients in sweet sorghum cultivars. **Semina. Ciências Agrárias**. v. 35, p. 3015, 2014.
- SOLARI, F., J.F. SHANAHAN, R.B. FERGUSON, AND V.I. ADAMCHUK. An active sensor algorithm for corn nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. **Agronomy Journal**. v. 102, p. 1090-1098, 2010.
- SOUSA, D.M.G.DE., AND E. LOBATO. Nitrogen fertilization. In: Sousa DMS de, Lobato E. **Cerrado: Soil correction and fertilization**. Embrapa. v. 2, p. 129-144, 2004. (in Portuguese, with abstract in English).

TORRES NETTO, A., E. CAMPOSTRINI, J.G. OLIVEIRA, AND R.E. BRESSAN-SMITH. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**. v. 104, p. 199-209, 2005.

UDDLING, J., J. GELANG-ALFREDSSON, K. PIIKKI, AND H. PLEUEL. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502-502 chlorophyll meter readings. **Journal Photosynthesis Research**. v. 91, p. 37-46, 2007.

USDA - Soil Survey Staff. **Keys to Soil Taxonomy**. Washington DC, USA. v. 10, p. 241-256, 2010.

WU, X., S. STAGGENBORG, J.L. PROPHTER, AND W.L. ROONEY. Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. **Industrial Crops and Products**. v. 31, p. 164-170, 2010.

## 6. CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a revista Sugar Tech)

### **Estádio de desenvolvimento e medidor portátil de clorofila mais eficiente na avaliação indireta de pigmentos fotossintéticos no sorgo sacarino**

**Resumo:** Em solos tropicais, que costumam ter baixa fertilidade natural, o Nitrogênio é um dos manejos que mais incrementam as respostas produtivas das culturas, principalmente em gramíneas. Como alternativa para melhorar o aproveitamento do N pelas plantas e reduzir as perdas, instrumentos portáteis que auxiliam no aumento da eficiência agrônômica, de forma rápida e a baixo custo, têm sido propostas pelas análises de clorofila das folhas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses de N sobre os índices de desenvolvimento do sorgo sacarino e, ainda, determinar qual o medidor portátil de clorofila que melhor se correlaciona na predição do “status”, indireto, de N nas folhas em relação as análises destrutivas de detecção em diferentes estádios da planta. Foram utilizados três tipos de solos do Cerrado brasileiro e seis doses de N (0, 50, 100, 150, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N) aplicados manualmente em cobertura (estádio V3) na cultura do sorgo sacarino. As leituras com os sensores portáteis de clorofila foram realizadas aos 24, 40 e 53 dias após a semeadura, correspondentes aos estágios V6, V8 e V10 de desenvolvimento das plantas. Os sensores utilizados foram o ClorofiLog<sup>®</sup> (Falker, Brasil), SPAD-502<sup>®</sup> (Minolta, Japão) e o Dualex<sup>®</sup> (Force-A, França). Além disso, uma Carta de Cores de Folhas, também foi utilizada. As leituras foram contrastadas com o conteúdo de N foliar e

conteúdo de clorofila total extraídas pelo método destrutivo de plantas (DMSO). O ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e carta de cores são ferramentas eficientes e sensíveis em estimar a utilização de N pelo sorgo sacarino, com respostas mais promissoras em plantas mais desenvolvidas, a partir de V8. Em V10, os medidores portáteis de clorofila SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> são os que melhor estimam o teor de N foliar e o conteúdo de clorofila total determinados pelo método destrutivo em plantas cultivadas sobre NQo e LVd. O SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> apresentaram a melhor similaridade nas leituras de clorofila nas folhas. Na colheita (V10), a maior produtividade de biomassa seca foi alcançada quando da aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N em solo de textura muito argilosa (LVd).

**Palavras-chave:** Medidor de clorofila. Teor de nitrogênio na folha. Método não destrutivo. Sorgo sacarino. Idade da planta.

### **Stage of development and more accurately portable chlorophyll meter in the indirect evaluation of photosynthetic pigments in sweet sorghum**

**Abstract:** In tropical soils, which tend to have low natural fertility, Nitrogen is one of the managements that most increase the productive responses of crops, especially in grasses. As an alternative to improve the use of N by plants and reduce losses, portable instruments that help to increase agronomic efficiency, quickly and at low cost, have been proposed by leaf chlorophyll analysis. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of N doses application on the development indices of sweet sorghum, and to determine which portable chlorophyll meter is best correlated in predicting the indirect N status in leaves in relation to the destructive detection analysis at different ages of the plant. Three types of soils from the Brazilian Cerrado and six N rates (0, 50, 100, 150, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> of N) were used manually in topdressing (stage V3) in the culture of sweet sorghum. Readings with portable chlorophyll sensors were taken at 24, 40 and 53 days after sowing, corresponding to stages V6, V8 and V10 of plant development. The sensors used were ClorofiLog<sup>®</sup> (Falker, Brazil), SPAD-502<sup>®</sup> (Minolta, Japan) and Dualex<sup>®</sup> (Force-A, France). In addition, a leaf color chart was also used. The readings were contrasted with leaf N content and total chlorophyll content

extracted by the plant destructive method (DMSO). ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> and leaf color chart are efficient and sensitive tools in estimating N utilization by sweet sorghum, with more promising responses in more developed plants, from V8 onwards. In V10, the SPAD<sup>®</sup> and Dualex<sup>®</sup> portable chlorophyll meters are the ones that best estimate the leaf N content and the total chlorophyll content determined by the destructive method in plants grown on NQo and LVd soils. SPAD<sup>®</sup> and Dualex<sup>®</sup> had the best similarity in leaf chlorophyll readings. At harvest (V10), the highest dry biomass yield was achieved when 180 kg ha<sup>-1</sup> of N were applied in a very clayey textured soil (LVd).

**Key words:** Chlorophyll meter. Leaf nitrogen content. Non-destructive method. Sweet sorghum. Plant age.

## 6.1 Introdução

A adubação nitrogenada é um dos manejos que mais incrementam as respostas produtivas das culturas, em especial as gramíneas (ZEGADA-LIZARAZU E MONTI, 2012). Em solos tropicais, pelas grandes alterações do teor de N no solo, ao longo do ano, este parâmetro não tem sido considerado na tomada de decisão quanto a doses de N a serem aplicadas.

Atualmente, o teor de N nas folhas tem sido utilizado como parâmetro de avaliação nutricional em plantas. No entanto, são métodos destrutivos, lentos e onerosos, pois requerem a extração das folhas no campo e análises laboratoriais (SCHEFER et al., 2016). Em muitos casos não restando tempo hábil para tomada de decisão e ação corretiva de deficiência nutricional, o que atenua os ganhos em produtividade, decorrentes da falta suplementar da aplicação de N em cobertura (BINDER et al., 2000).

Nesse contexto, ferramentas que permitam determinar, indiretamente, o “status” nutricional de N das plantas em tempo real, baixo custo e de forma não destrutiva, têm sido propostas pelas análises de índices de flavonoides e de clorofila das folhas, utilizando diversos instrumentos portáteis (FONTES, 2016; SAMBORSKI et al., 2009). Isso porque o N, além de ser uma constituinte das proteínas que participam do metabolismo dos carboidratos, quase 70% do seu conteúdo nas plantas é incorporado às

enzimas relacionadas aos cloroplastos que realizam a fotossíntese. Assim, existe interdependência entre os compostos em N e a clorofila das plantas (SINGH et al., 2012).

Sensores como o Spad-502 e ClorofiLOG1030 emitem uma frequência de onda que é absorvida pela clorofila (650 nm e 940 nm), e a quantificação da clorofila é feita de forma indireta por meio da diferença entre a quantidade de luz aplicada e a recuperada. Outros sensores como o Dualex (FORCE-A, France) medem a energia perdida na forma de fluorescência, que é inversamente proporcional ao conteúdo de clorofila.

Para a cultura do milho, alguns estudos têm mostrado bons resultados entre a leitura Spad e o teor de clorofila extraível na folha (ARGENTA et al., 2001), com o rendimento de grãos (ARGENTA et al., 2002; RAMBO et al., 2007; ROSTAMI et al., 2008) e o conteúdo de N na folha (BRAGAGNOLO et al., 2013; KALAJI et al., 2017). Carvalho et al. (2016) e Kappes et al. (2013) obtiveram maior índice ClorofiLOG com o aumento da dose de N em cobertura do milho.

Na cultura da batata, Coelho et al. (2012) concluíram que há correlação negativa entre o índice de flavonoides e os teores de N e clorofila extraível na folha, e correlação positiva destes últimos com os índices de clorofila e de balanço do N determinados pelo Dualex. Para a cultura do trigo e do milho, alguns trabalhos apontam para a alta correlação negativa entre o teor de N na folha e o de fenóis (CARTELAT et al., 2005; CEROVIC et al., 2005; TREMBLAY et al., 2007). Outros pesquisadores demonstraram ainda, a existência de relação entre o índice spad e o teor de clorofila (obtido pelo método destrutivo) em plantas como cana-de-açúcar (JANGPROMMA et al., 2010), soja (RODRIGUEZ-LUCENA et al., 2010) e feijão comum (SILVEIRA et al., 2003).

Apesar de muito promissor, o uso desses sensores portáteis na predição do N e recomendação de adubação com fertilizantes nitrogenados ainda apresenta muitos entraves. Para o sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench), embora não se tenham dados conclusivos sobre o uso desse tipo de sensores, estudos mais específicos ainda são recentes (ZANDONADI et al., 2016; XAVIER et al., 2021; SCORDIA et al., 2021), de modo que, muitas vezes, as recomendações são feitas com base na cultura do milho (SANTOS et al., 2015). Desta forma, o monitoramento do “status” de N nas plantas em estágio mais precoce pode ser importante fator para a tomada de decisão em tempo hábil para correções de possíveis deficiências deste nutriente, sem comprometer o rendimento da cultura.

Neste contexto, objetivou-se avaliar o efeito de doses de N nos incrementos de biomassa seca do sorgo sacarino e, ainda, determinar qual o medidor portátil de clorofila melhor pode estimar indiretamente o “status” de N em folhas amostradas em diferentes estádios de desenvolvimento da planta.

## 6.2 Material e Métodos

### 6.2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na escola de agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia (16° 40' 48" S, Longitude: 49° 15' 18" W e altitude de 730 m). Foram utilizados três solos com características distintas, porém todos do Cerrado brasileiro, e classificados de acordo com Santos et al. (2018). Os solos foram coletados na camada de 0-0,2 m de profundidade, secos ao ar livre e peneirados em malha de 2,0 mm de diâmetro. Antes das ações corretivas e de adubação foi retirado uma amostra em cada tipo de solo para determinar a textura e os atributos químicos na porção de solo coletada (Tabela 1).

**Tabela 1.** Principais características químicas e texturais do solo da área experimental.

Solos	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	Arg	Are	Sil
	CaCl <sub>2</sub>	$\frac{g}{dm^3}$	- mg dm <sup>-3</sup> -				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				----- % -----		
LVw	5,2	8,2	1,1	59	0,5	0,3	1,2	1,0	2,2	45,5	42	40	18
NQo	5,1	14,5	21,4	10	1,7	0,6	1,6	2,4	4,0	59,2	11	87	2
LVd	5,0	43,5	13,9	234	4,1	1,8	1,4	6,5	7,9	82,3	62	27	11

### 6.2.2 Design experimental e procedimentos

O delineamento experimental foi o inteiramente ao acaso, com esquema fatorial 3 x 6 e 5 repetições. Os fatores avaliados foram três tipos de solo (1 – Latossolo Vermelho ácido (LVw); 2 – Neossolo Quartzarênico (RQo) e 3 - Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (LVd)) e seis doses de N equivalente a 0, 50, 100, 150,

200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicadas manualmente sobre a superfície do solo, quando as plantas de sorgo estavam em estágio V3.

Aos 45 dias antes da semeadura, cada vaso foi preenchido com 5,0 kg de solo e feita a correção de pH com aplicação de calcário na proporção média de 0,26 g kg<sup>-1</sup> de solo, visando aumentar a saturação por bases (V%) para 70%. Posteriormente, os vasos com solo foram homogeneizados e incubados por 30 dias, mantendo-o com umidade na capacidade de campo. Aos 15 dias antes da semeadura foram aplicados, ainda, em superfície e posterior incorporação 2,54 g kg<sup>-1</sup> de solo de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 0,24 g kg<sup>-1</sup> de solo de cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O), seguindo recomendação descrita por Santos et al. (2014).

Na semeadura foram utilizadas cinco sementes de sorgo sacarino (híbrido Malibu 5010) por vaso, e aos 7 dias após a emergência (DAE), foram realizados os cortes para padronização mantendo uma planta por vaso. Aos 17 DAE, quando as plantas atingiram o estágio V3 (terceira folha totalmente desenvolvida), as doses de N foram aplicadas na superfície do solo, utilizando como fonte a ureia revestida com inibidor de urease (NBPT).

### 6.2.3 Avaliações

As leituras com os sensores portáteis de clorofila foram realizadas aos 24, 40 e 53 DAE, correspondentes aos estágios V6, V8 e V10 de desenvolvimento das plantas. Em cada planta, as leituras foram tomadas sempre no terço médio da última folha completamente expandida, uma em cada lado da nervura central, entre 8h e 9h de Brasília. Os sensores utilizados foram o ClorofiLog<sup>®</sup> (Falker, Brasil) e SPAD-502<sup>®</sup> (Minolta, Japão) para obter clorofila total por absorvância a 650 e 940 nm de comprimento de onda, e o Dualex<sup>®</sup> (Force-A, França) para obter o teor de clorofila total por fluorescência em 650 nm e fenóis em comprimento de onda de 375 nm. Além disso, uma Carta de Cores de Folhas (CCF) desenvolvida para a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.), com quatro faixas de tonalidades esverdeadas, também, foi utilizada para determinar o verde das folhas do sorgo sacarino (SINGH et al., 2002; YANG et al., 2003; WITT et al., 2005).

Na avaliação final (em V10), após a realização das leituras com os clorofilômetros portáteis, e nos exatos pontos em que essas foram feitas, foram tomadas três amostras de discos foliares com área de 115 mm<sup>2</sup>, com auxílio de um perfurador

metálico vazado. Os discos foliares foram utilizados para determinar o conteúdo de clorofila *a*, *b* e clorofila total, de acordo com o método de Hiscox e Israelstam (1979), com algumas modificações. Em sequência, amostras foliares de cada planta foi coletada, retirando a última folha completamente desenvolvida e analisadas quanto ao teor de N foliar, conforme descrito por Malavolta et al., (1997). Após amostragem das folhas, realizou-se a colheita das plantas, quando essas foram levadas para laboratório e separadas em colmo, folhas e raiz, para posterior secagem em estufa com circulação forçada de ar a 70°C. Após a secagem, determinou-se a massa seca total, medida em balança semianalítica.

#### 6.2.4 Análise dos dados

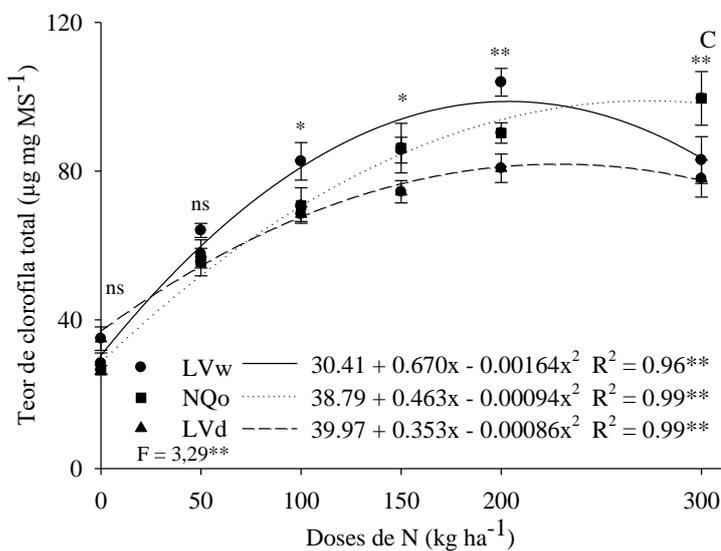
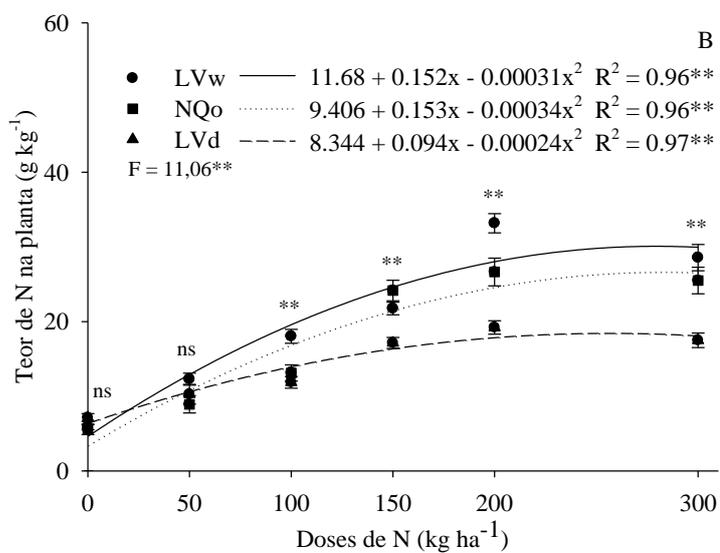
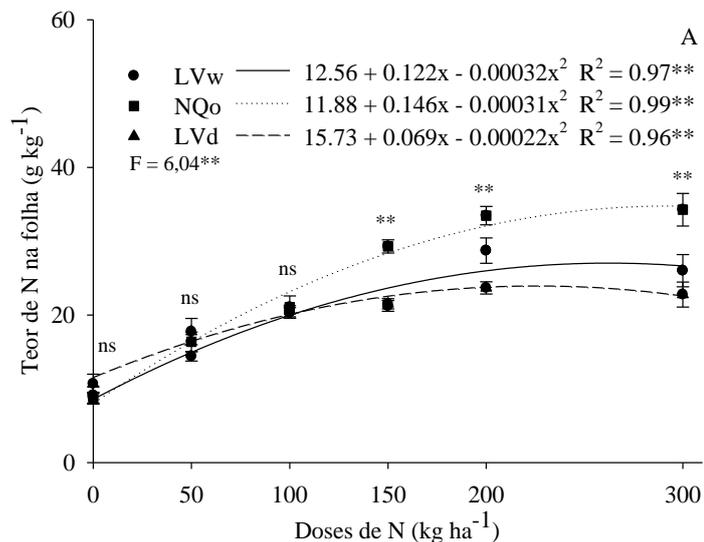
As análises estatísticas foram realizadas em esquema fatorial com dois fatores: tipos de solo e doses de N. Quando foi observada interação significativa entre os fatores, as interações foram particionadas e foi considerado o efeito separado de cada fator. Utilizando o programa Sisvar (FERREIRA, 2014), o efeito dos tipos de solo foi avaliado por meio das barras de erro padrão da média ( $p \leq 0,05$ ), e o efeito das doses de N foi descrito por meio de uma análise de regressão. Foram realizadas análises de correlação de Pearson ( $p < 0,05$ ) entre as doses de N aplicadas nos diferentes tipos de solo e as leituras dos sensores em todas as etapas.

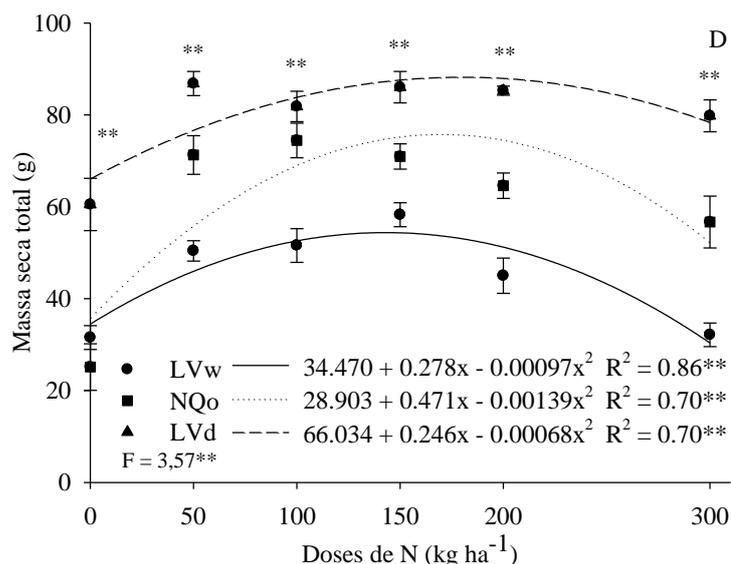
### 6.3 Resultados e Discussão

#### 6.3.1 Conteúdo de clorofila extraível, teor de N e biomassa total após doses de N

As análises destrutivas de plantas mostraram que os parâmetros teor de N-foliar, acúmulo de N-total na planta, pigmentos de clorofila extraível e produção de massa seca total foram influenciados pelas doses de N aplicadas, pelo tipo de solo e pela interação desses fatores, sendo obtidos ajustes quadráticos desses parâmetros com o aumento das doses de N (Figura 1).

Os maiores incrementos de N-foliar no sorgo ocorreram nas doses de 190, 235 e 156 kg ha<sup>-1</sup> de N nos solos LVw, NQo e LVd, respectivamente (Figura 1A). Para estas mesmas classes de solo, o acúmulo de N-total foi aumentado até as doses de 245, 225 e 195 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente (Figura 1B).





**Figura 1.** Teores médios de N-foliar (A), N-total (B), pigmentos de clorofila total (C) e massa seca total (D) da cultura do sorgo sacarino, aos 53 DAS em função da aplicação de doses de N em diferentes classes de solo da região central do Brasil.

<sup>ns</sup> não significativo; \* e \*\* significativo a 1 e 5% de probabilidade pela análise de erro padrão da média, respectivamente; \*\* interação significativa a 1% de probabilidade pelo teste F.

Já o conteúdo de clorofila total das folhas, estimada pelo método destrutivo, foram maiores nas doses de 200, 248 e 205 kg ha<sup>-1</sup> de N em LVw, NQo e LVd, respectivamente (Figura 1C). Em relação aos incrementos de biomassa seca, o máximo acúmulo de 88,3 g solo de textura muito argilosa (LVd) (Figura 1D) foi alcançado quando da aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N. Para as classes de solo LVw e NQo, os maiores incrementos foram observados nas doses de 143 e 169 kg ha<sup>-1</sup> de N, que produziram 54,4 e 68,8 g de biomassa seca, respectivamente.

Em solos tropicais, a aplicação da ureia sofre significativas perdas gasosas de amônia (COSTA et al., 2003; SANGOI et al., 2003). Assim, a utilização eficiente desta fonte está condicionada ao processo de incorporação no solo (LARA CABEZAS et al., 2000), às condições climáticas, atividade biológica e características químicas e texturais de cada solo. Estas perdas podem ser pequenas, de 1 a 15% ou atingir valores maiores que 50% do N aplicado (SOARES, 2011). As perdas por volatilização de NH<sub>3</sub>, a partir da aplicação superficial, está intimamente ligada a presença de M.O.S. Para Sengik (1993), maior teor de M.O. no solo promove aumento da atividade microbológica e a

produção da enzima urease, no qual acelera o processo de hidrólise da ureia que pode ser perdida para o ambiente (TASCA et al., 2011).

Nas condições deste estudo, as classes de solo NQo e LVw apresentaram baixo teor de M.O. e, conseqüentemente, baixa atividade na conversão de  $\text{N-NH}_4^+$  em  $\text{N-NO}_3^-$  pelos microrganismos (SANGOI et al., 2015), retendo mais  $\text{N-NH}_4^+$  no solo em detrimento ao  $\text{N-NO}_3^-$ , e possivelmente favoreceu maior absorção e acúmulo do N na planta e conteúdo de clorofila extraível (Figura 1A, B e C). Em contrapartida, Cantarella et al. (2018), relataram que apesar da alta demanda energética para a utilização do nitrato pela maioria das gramíneas, incluindo o sorgo, o crescimento das plantas é melhor quando supridas com  $\text{N-NO}_3^-$  e não com  $\text{N-NH}_4^+$ , fator que pode ter influenciado os resultados de biomassa seca observado em LVd (Figura 1D). Para Guo et al. (2002), uma possibilidade é a necessidade de desintoxicação da planta em função do excesso de amônio absorvido, como em NQo e LVw.

Para o sorgo sacarino, estudos relacionados à nutrição ainda são escassos, no entanto, para Martinez et al. (1999), a concentração de N-foliar (folha índice) considerada normal, no início do florescimento em sorgo biomassa, situa-se entre 22,1 e 29,2 g kg<sup>-1</sup>. Assim, provavelmente, as altas concentrações de N na planta, observadas em LVw e NQo, parecem ressaltar que houve absorção de N além da capacidade de utilização nos processos de crescimento do sorgo. Já que as menores concentrações de N, observadas nas plantas cultivadas em LVd, resultaram em maiores incrementos de biomassa seca. Corroborando os resultados, para Masclaux-Daubresse et al. 2010, o conteúdo de N-foliar, também, foi menor para as plantas cultivadas com soluções contendo apenas  $\text{NO}_3^-$  como única fonte de N.

As análises de erro padrão da média mostraram que as características intrínsecas de cada solo influenciaram diretamente na absorção e assimilação de N pelo sorgo sacarino. Neste estudo, considerando a dose de máxima eficiência agrônômica, o maior acúmulo de N e de pigmentos fotossintetizantes nas folhas foram verificados em solos de textura média (LVw) e arenosa (NQo), possivelmente, em consequência da maior demanda por N-fertilizante e maior eficiência no aproveitamento do  $\text{N-NH}_4^+$  pelas plantas de sorgo (dados não medidos). Os resultados supracitados corroboram os observados por Xavier et al. (2021), que verificaram que em condições de solo semelhante, o mesmo híbrido sacarino - Malibu 5010 - apresentou maior conteúdo de clorofila *a*, *b*, clorofila total pela avaliação destrutiva e maior teor de N-foliar, com aplicação média de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N.

A literatura reporta que solos com baixos teores de M.O., implicam em maior necessidade de utilização de fertilizantes nitrogenados, por causa do processo de imobilização pela biomassa microbiana do solo (SENGIK, 1993). Nestes casos, o efeito do aumento gradual dos estoques de M.O. em sistemas não revolvidos, acentuam o papel do solo como fonte natural de N para as plantas, reduzindo a necessidade do N mineral, fato que explica, em partes, a menor demanda da cultura em LVd. Segundo Sousa & Lobato (2004), cada 1 dag kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica pode fornecer 30 kg ha<sup>-1</sup> de N nas condições de Cerrado. A partir desses valores e não considerando perdas de N por condições adversas, neste estudo, o LVd pode ter disponibilizado por intermédio da M.O, a cerca de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N.

### 6.3.2 Relação entre clorofila extraível em DMSO e leituras com sensores

A cultura do sorgo sacarino começa a estabilizar o acúmulo de N na planta mais tardiamente; registros datam 75 e 85 dias após a emergência (DAE) para a máxima absorção de N pelas folhas e colmos, respectivamente (SOARES et al., 2014; CAVALCANTE et al., 2017). Desta forma, o monitoramento do “status” de N nas plantas em estágio mais precoce pode ser importante fator para a tomada de decisão em tempo hábil para correções de possíveis deficiências deste nutriente, sem o comprometimento do rendimento de produção da cultura.

Neste sentido, contando que ainda não há relatos de calibração de sensores para a cultura do sorgo sacarino, a determinação dos teores de clorofilas podem ser importantes parâmetros para avaliar, indiretamente, o aspecto nutricional das plantas quanto ao “status” de N. Para efeito de comparação, utilizou-se a determinação de pigmentos fotossintéticos por espectrofotometria, utilizando solventes orgânicos de natureza química, como o dimetilsulfóxido (DMSO) e diferentes medidores portáteis de clorofila.

Ainda em V10, a relação entre a clorofila extraível das folhas e as leituras obtidas com os medidores portáteis de clorofila (ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e CCF), correlacionaram-se positivamente e significativamente entre si, para todos os solos testados. A melhor relação foi expressa pelo modelo linear do SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup>, que apresentaram coeficiente de Pearson de 0,85 em plantas cultivadas sobre NQo. Em LVw e LVd estes sensores apresentaram moderada correlação (< de 0,80) com o conteúdo de clorofila obtida pelo método destrutivo de plantas (Tabela 2).

**Tabela 2.** Correlação de Pearson (r) entre o conteúdo de clorofila total determinadas pelas leituras no espectrofotômetro em estádio V10 e clorofila total (Chlor total) determinada pelas leituras de clorofila total do ClorofiLog<sup>®</sup>, índice SPAD<sup>®</sup>, índice Dualex<sup>®</sup>, índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.

<b>Fator</b>	<b>Solos</b>	<b>ClorofiLog<sup>®</sup> (Chlor Total)</b>	<b>SPAD<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	<b>Dualex<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	<b>Dualex<sup>®</sup> (IFLV)</b>	<b>CCF</b>
Chlor total em	LVw	0,69**	0,76**	0,55**	-0,73**	0,63**
DMSO	NQo	0,74**	0,85**	0,85**	-0,78**	0,79**
( $\mu\text{g mg MS}^{-1}$ )	LVd	0,77**	0,76**	0,79**	-0,63**	0,65**

\*Correlação significativa a 0.5 de probabilidade; \*\*Correlação significativa a 0.1 de probabilidade; <sup>ns</sup>Correlação não significativa

A forte relação entre as leituras realizadas com o medidor portátil SPAD<sup>®</sup> e as determinações de clorofila extraída das folhas também foi encontrada para outras espécies, incluindo milho (ARGENTA et al., 2001), maçã (AMARANTE et al., 2008), algodão (BRITO et al., 2011) e tomate (SCHUELTER et al., 2003). Da mesma forma, usando milho e soja, Markwell et al. (1995), descobriram que existe relação próxima entre o índice obtido através do medidor portátil SPAD<sup>®</sup> e a clorofila total extraída pelo método clássico.

A análise laboratorial do teor de N na folha tem apresentado grande eficiência para detectar deficiências em diversas culturas. Porém, como visto neste estudo, sua correlação com a produtividade de biomassa seca do sorgo sacarino foi limitada pelo consumo de luxo, possivelmente, sob a forma de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, como observado em NQo. Nesse caso, o aumento de clorofila é considerado uma produção de luxo decorrente da maior absorção de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Como sugerido neste estudo, em tese, as classes de solo LVw e LVd apresentaram as maiores disponibilidade de M.O. e, conseqüentemente, melhor eficiência na conversão de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pelos microrganismos (SANGOI et al., 2015), retendo mais N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo em detrimento ao N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, e, possivelmente reduziu as correlações entre o teor de N na folha e conteúdo de clorofila estimada pelos sensores.

Quando da utilização dos sensores os dados indicaram que as leituras de clorofila realizadas estimam adequadamente o conteúdo de N das folhas de sorgo sacarino aos 53 DAE. A melhor relação foi obtida com os medidores portáteis ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e CCF, que apresentaram estimativa de correlação de 0,81, 0,83, 0,85 e 0,82, em plantas cultivadas sob NQo, respectivamente (Tabela 3).

**Tabela 3.** Correlação de Pearson (r) entre o teor de N das folhas em estágio V10 e leituras de clorofila total (Chlor total) pelo ClorofiLog<sup>®</sup>, índice SPAD<sup>®</sup>, índice Dualex<sup>®</sup>, índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.

Fator	Solos	ClorofiLog <sup>®</sup> (Chlor Total)	SPAD <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (IFLV)	CCF
Teor de N (g kg <sup>-1</sup> )	LVw	0,71**	0,75**	0,47**	-0,66**	0,56**
	NQo	0,81**	0,83**	0,85**	-0,74**	0,82**
	LVd	0,74**	0,75**	0,79**	-0,65**	0,57**

\*Correlação significativa a 0,5 de probabilidade; \*\*Correlação significativa a 0,1 de probabilidade; <sup>ns</sup>Correlação não significativa

Dentro de cada condição em específico, estes resultados revelaram que à medida que aumenta o índice de clorofila nas leituras dos sensores o teor de N-foliar aumenta proporcionalmente, sugerindo concluir que os sensores de clorofila estimam com precisão adequada o “status” de N nas folhas. Outros autores também verificaram que as medições efetuadas com SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> foram consideradas melhores indicadores do nível de N na planta do que o próprio teor deste nutriente na folha (ARGENTA et al., 2002; CEROVIC et al., 2005).

Em LVw as leituras dos sensores portáteis aumentaram até certo ponto, a partir do qual se mantiveram invariáveis. A melhor relação, neste solo, foi obtida com o medidor portátil SPAD<sup>®</sup> que estimou em 75% a interdependência do índice de clorofila total com o conteúdo de N na folha. Já em LVd a melhor relação com o teor de N-foliar foi obtida para o índice de Chlor total usando o Dualex<sup>®</sup>, com coeficiente de Pearson de 0,79. Em LVw, estes resultados associados com os valores de máxima produção de massa seca total obtidos, certamente, podem compor a base de dados para definição da dose, melhor época de aplicação de N em cobertura e o sensor que melhor estima o grau de esverdeamento das folhas de sorgo sacarino aos 53 DAE.

### 6.3.3 Relação entre os sensores em diferentes estádios fenológicos

As análises de correlação entre as leituras com os diferentes sensores evidenciaram que o conteúdo de clorofila nas folhas apresentou comportamentos distintos em função do tipo de solo e estágio fenológico de crescimento da planta (Tabela 4).

Em estágio V6 de desenvolvimento do sorgo sacarino (9 dias após à fertilização com N), os dados apresentaram moderada relação ( $< 0,60$ ) entre os aportes crescentes de doses de N e os índices de Chlor total e IFLV obtidos pelos sensores portáteis: ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e CCF. De modo que, o índice que melhor expressou a relação foi observado em LVw com o medidor portátil ClorofiLog<sup>®</sup> para o índice de Chlor total com valor estimado de 0,56. Já em NQo, a melhor relação foi obtida com o medidor portátil Dualex<sup>®</sup> que estimou em 0,56 a interdependência do índice de clorofila total com a aplicação de doses de N. Em solo corrigido, com alto teor de M.O e de adequada fertilidade, representado pelo LVd, a adubação com N resultou em incrementos não proporcionais ao aumento dos índices de clorofila nas folhas, que apresentaram moderada correlação negativa para o índice Chlor total (SPAD<sup>®</sup>) e Chlor total (ClorofiLog<sup>®</sup>).

**Tabela 4.** Correlação de Pearson (r) entre doses de N e leituras de clorofila total (Chlor total) determinada pelo ClorofiLog<sup>®</sup>, índice SPAD<sup>®</sup>, índice Dualex<sup>®</sup>, índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.

Estádios fenológicos	Solos	ClorofiLog <sup>®</sup> (Chlor Total)	SPAD <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (IFLV)	CCF
V6	LVw	0,56**	0,26 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	-0,60**	0,18 <sup>ns</sup>
	NQo	0,42*	0,41*	0,56**	-0,48**	0,46*
	LVd	-0,52**	-0,45*	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,26 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>
V8	LVw	0,65**	0,59**	0,51**	-0,85**	0,54**
	NQo	0,57**	0,59**	0,74**	-0,83**	0,60**
	LVd	-0,01 <sup>ns</sup>	0,77**	0,57**	-0,75**	0,51**
V10	LVw	0,62**	0,67**	0,41*	-0,59**	0,60**
	NQo	0,64**	0,69**	0,73**	-0,63**	0,70**
	LVd	0,64**	0,76**	0,67**	-0,46*	0,60**

\*Correlação significativa a 0,5 de probabilidade; \*\*Correlação significativa a 0,1 de probabilidade; <sup>ns</sup>Correlação não significativa

A absorção pelas plantas ocorre após o processo de mineralização e/ou imobilização do N em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), processo que pode levar de 15 a 30 dias após a aplicação do N no solo (SOUSA E LOBATO, 2002; CANTARELLA, 2007). Assim, a falta e/ou moderada correlação existente em estágio V6 corroboram o baixo intervalo de tempo entre a adubação com N e as leituras obtidas com os sensores portáteis de clorofila, que foi de 9 dias.

Aos 25 dias (em estágio V8), as leituras realizadas com os sensores portáteis SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> estimaram com moderada precisão ( $< 0,80$ ) a correlação existente entre as doses de N e o índice de clorofila total das folhas. Já o índice IFLV apresentou correlação significativa forte em LVw e NQo, com estimativa de -0,85 e -0,83, respectivamente.

Verificou-se, portanto, que o IFLV decresce significativamente com o aumento da aplicação de doses de N no solo, tendo seguido um modelo de correlação linear negativo. Isso ocorre pela produção e o acúmulo de polifenóis (flavonoides, taninos hidrolizáveis e sideroxilonaes) pelas plantas sob estresse, principalmente quando o uso do carbono para o crescimento ou reprodução das plantas é reduzido pela falta de nutrientes (KANDIL et al., 2004).

Quando o N limita o crescimento das plantas há o acúmulo de carboidratos em seus tecidos de acordo com a hipótese do balanço de carbono/nutrientes (BRYANT et al., 1983). Esse acúmulo direcionará o carbono para a síntese de metabólitos secundários, como os polifenóis e os terpenos, em virtude da menor demanda de proteínas para o crescimento da planta (HAMILTON et al., 2001). Os decréscimos do teor de flavonoides, determinado com o Dualex<sup>®</sup>, também foram verificados para trigo (CARTELAT et al., 2005; TREMBLAY et al., 2010), milho (HUAN et al., 2010) e brócolis (FORTIER et al., 2010), com o aumento das doses de N.

Aos 38 dias da fertilização com doses de N (em V10), a análise de correlação comprovou que os índices de Chlor total obtidos a partir das leituras com os sensores portáteis e CCF foram significativamente influenciadas pela aplicação de doses de N, independentemente do tipo de solo. O medidor portátil de clorofila que melhor expressou, indiretamente, o conteúdo de N nas folhas foi o SPAD<sup>®</sup> e o Dualex<sup>®</sup> para as classes de solo LVd e NQo, com valor estimado de 0,76 e 0,73, respectivamente (Tabela 4).

Desta forma, os resultados obtidos para o híbrido sacarino sugerem máxima eficiência de aproveitamento de N até determinada dose, ou seja, não aumenta

indefinidamente com os aportes crescentes de N, o que reduz as correlações (WHITE & SANDERSON, 1983).

Neste estudo, verificou-se, portanto, que em NQo e LVd as plantas de sorgo sacarino apresentaram maiores incrementos no conteúdo de Chlor total quando do aumento de N, independentemente do estágio de desenvolvimento.

#### 6.3.4 Estimativa de produção de biomassa com sensores portáteis

Em estágio V6, a linearidade entre os índices de clorofila total e a produção de massa seca total (realizada em estágio V10) foi melhor expressa com os sensores portáteis SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> que anteciparam corretamente em 88 e 81% a predição do crescimento da planta em NQo, respectivamente. Ressalta-se que mesmo não apresentando alta correlação com doses de N nas diferentes classes de solo, a forte correlação entre a produção de massa seca total e os índices de Chlor total (SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup>) observados aqui, pode ser de grande importância para a diagnose precoce em plantas deficientes em N (Tabela 5).

**Tabela 5.** Correlação de Pearson (r) entre a produção de massa seca total determinada em estágio V10 e leituras de clorofila total (Chlor total) determinadas pelo ClorofiLog<sup>®</sup>, índice SPAD<sup>®</sup>, índice Dualex<sup>®</sup>, índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.

Estádio fenológico	Solos	ClorofiLog <sup>®</sup> (Chlor Total)	SPAD <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (Chlor total)	Dualex <sup>®</sup> (IFLV)	CCF
V6	LVw	0,06 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	-0,44*	-0,14 <sup>ns</sup>
	NQo	0,79**	0,88**	0,81**	-0,67**	0,74**
	LVd	0,11 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	-0,41*	0,49**
V8	LVw	0,46*	0,53**	0,60**	-0,15 <sup>ns</sup>	0,48**
	NQo	0,79**	0,72**	0,60**	-0,37*	0,65**
	LVd	0,33 <sup>ns</sup>	0,57**	0,38*	-0,41*	0,55**
V10	LVw	0,31 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	-0,40*	0,37*
	NQo	0,77**	0,64**	0,64**	-0,75**	0,49**
	LVd	0,73**	0,60**	0,67**	-0,56**	0,52**

\*Correlação significativa a 0,5 de probabilidade; \*\*Correlação significativa a 0,1 de probabilidade; <sup>ns</sup>Correlação não significativa

Em NQo, pôde-se observar maior dependência do N a partir da entrada via adubação, que, de certo modo, contribuiu para os índices de correlação alcançados com a produção de massa seca total. Estes resultados reforçam a hipótese que em solos tropicais muito arenosos e com baixo teor de M.O ( $11,5 \text{ g kg}^{-1}$ ) tornam-se mais dependentes da adubação com N quando comparado aos solos com elevado teor de M.O. Desta forma, o monitoramento do “status” de N nas plantas em estádios mais precoces, como V6 e V8, pode ser importante fator para a tomada de decisão em tempo hábil para correções de possíveis deficiências de N, sem o comprometimento da produção.

Em estágio V10, as leituras de clorofila que melhor se correlacionaram com a produção de massa seca total foram observadas em NQo e LVd, com os sensores portáteis ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup>, que apresentaram correlação significativa média de 0,68. As análises de correlação encontradas em V10 indicam que os medidores portáteis de clorofila apresentam moderada eficiência para estimar, indiretamente, o “status” de N nas folhas de sorgo sacarino.

No entanto, aos 53 DAE, o monitoramento do “status” de N nas plantas pode ser tardio para a tomada de decisão em tempo hábil para possíveis adubações de cobertura com N, sem o comprometimento da produção. Sousa e Lobato (2002) relataram que nas condições de Cerrado, o  $\text{N-NH}_4^+$  depois de aplicado no solo, leva a cerca de 21 dias para ser assimilados pelas plantas, período que coincide com o início da fase reprodutiva da cultura.

Em NQo, observou-se que há claramente a possibilidade de previsão do potencial de rendimento do sorgo sacarino em V6, sendo altamente possível para uma eficácia máxima da aplicação de N em cobertura. Apesar da CCF não ter apresentado boa correlação com a produção de massa seca total, o comportamento significativo observado em NQo pode ser alternativa interessante a produtores que não almejam altos investimentos no monitoramento do “status” de N nas lavouras de sorgo sacarino.

Os medidores portáteis de clorofila proporcionaram leituras instantâneas, não destrutivas e eficazes na indicação do teor de clorofila presente nas folhas do sorgo sacarino. Os sensores que melhor o fizeram foram o SPAD<sup>®</sup> e o Dualex<sup>®</sup>, que apresentaram alta correlação com coeficiente de Pearson de 0,85 (Tabela 6).

**Tabela 6.** Correlação de Pearson (r) entre os índices de clorofila total dos sensores ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup>, índice de flavonoides (IFLV) e carta de cores (CCF) nas folhas do sorgo sacarino.

<b>Sensor de clorofila</b>	<b>SPAD<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	<b>Dualex<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	<b>Dualex<sup>®</sup> (IFLV)</b>	<b>CCF</b>
<b>ClorofiLog<sup>®</sup> (Chlor Total)</b>	0,77*	0,77*	-0,54*	0,61*
<b>SPAD<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	-	0,85**	-0,70*	0,74*
<b>Dualex<sup>®</sup> (Chlor total)</b>	-	-	-0,71*	0,74*
<b>Dualex<sup>®</sup> (IFLV)</b>	-	-	-	-0,60*
<b>CCF</b>	-	-	-	-

\*Correlação significativa a 0,5 de probabilidade; \*\*Correlação significativa a 0,1 de probabilidade

Assim, considerando que ainda há poucos relatos sobre a estimativa para a cultura do sorgo sacarino, a determinação dos teores de clorofila x doses de N x produção de massa seca total indicaram viabilidade importante na predição do aspecto nutricional quanto ao “status” de N das plantas.

#### 6.4 Conclusão

O ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e CCF são ferramentas eficientes e sensíveis em estimar a utilização de N pelo sorgo sacarino, com respostas mais promissoras em plantas mais desenvolvidas, a partir de V8. As leituras de clorofila SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup>, obtidas em V6 do sorgo, estimam com alta precisão a produtividade de biomassa seca em plantas cultivadas sobre NQo. Em solos argilosos como LVw e LVd não houve boa correlação para as ferramentas testadas em V6.

Em V10, os medidores portáteis de clorofila SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> são os que melhor estimam o teor de N foliar e o conteúdo de clorofila total determinados pelo método destrutivo em plantas cultivadas sobre NQo e LVd. O SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> apresentaram a melhor similaridade nas leituras de clorofila nas folhas.

Na colheita (V10), a maior produtividade de biomassa seca foi alcançada quando da aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N em solo de textura muito argilosa (LVd).

## 6.5 Agradecimentos

Este trabalho foi realizado como parte do projeto NUCLEUS: um centro virtual para fornecer NUE aprimorado por meio de uma abordagem de sistemas integrados solo-planta para o Reino Unido e o Brasil. Trabalho financiado pela FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo [2015 / 50305-8]; FAPEG - Fundação de Amparo à Pesquisa de Goiás [2015-10267001479]; FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa do Maranhão [RCUK-02771/16]; e o Conselho de Pesquisa em Biotecnologia e Ciências Biológicas [BB / N013201 / 1].

Agradecemos também à Embrapa Arroz e Feijão pelo total suporte logístico e operacional, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa ao 1º autor. Ao Instituto Federal Goiano e a Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás pelo suporte financeiro e os processos de tradução e publicação deste trabalho.

## 6.6 Referências Bibliográficas

- ARGENTA, G., P.R.F.DA SILVA, C.G. BARTOLINI, E.L. FORSTHOFER, AND M.L. STRIEDER. Relationship of reading of portable chlorophyll meter with contents of extractable chlorophyll and leaf nitrogen in maize. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. v. 13, p. 158-167, 2001.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 519-527, 2002.
- AMARANTE, C. V. T.; STEFFENS, C. A.; ZANARDI, O. Z.; ALVES, E. O. Quantificação de clorofilas em folhas de macieiras ‘Royal gala’ e ‘Fugi’ com métodos ópticos não-destrutivos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 3, p. 590-595, 2008.
- BINDER, D.L., D.H. SANDER, AND D.T. Walters. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. **Agronomy Journal**. v. 92, p. 1228–1236, 2000.

- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; JASPER, J.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T.G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: i - plant nutrition and dry matter production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1288-1298, 2013.
- BRITO, G. G.; BRANDÃO, Z. N.; SILVA, V. B.; FRANKLIN, M. S.; SILVA, D. A. Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v.33, p. 671-678, 2011.
- BRYANT, J.P.; CHAPIN, F.S.; KLEIN, D.R. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. **Oikos**. v. 40, p. 357-368, 1983.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.et al. (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 375-470, 2007.
- CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; DE BRITO SILVA, A. G. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018.
- CARTELAT, A.; CEROVIC, Z.G.; GOULAS, Y.; MEYER, S.; LELARGE, C.; PRIOUL, J.L.; BARBOTTIN, A.; JEUFFROY, M.H.; GATE, P.; AGATI, G.; MOYA, I. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Field Crops Research**, v. 91, p. 35-49, 2005.
- CARTELAT, A.; CEROVIC, Z.G.; GOULAS, Y.; MEYER, S.; LELARGE, C.; PRIOUL, J.L.; BARBOTTIN, A.; JEUFFROY, M.H.; GATE, P.; AGATI, G.; MOYA, I. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Field Crops Research**, v. 91, p. 3549, 2005.
- CARVALHO, E.V.; AFFÉRI, F.S.; PELUZIO, J.M.; LEAL, T.C.A.B.; ROTILI, E.A.; REIS, A.L.L.E. Nitrogênio em cobertura no estudo de dois grupos de genótipos de milho em Gurupi-TO. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 358-364, 2016.
- CAVALCANTE, T.J.C. **Marcha de absorção de macro e micronutrientes nas culturas do sorgo sacarino e sorgo biomassa**. 2017. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2017.

- CEROVIC, Z.G., A. CARTELAT, Y. GOULAS, AND S. MEYER. In-field assessment of wheat-leaf polyphenolics using the new optical leaf-clip Dualex. **Precision Agriculture**. v. 5, p. 243-249, 2005.
- COELHO, F.S.; FONTES P.C.R.; FINGER, F.L.; CECON P.R. Avaliação do estado nutricional do nitrogênio em batateira por meio de polifenóis e clorofila na folha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 584-592, 2012.
- COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27, p. 631-637, 2003.
- FERREIRA, D.F. **Sisvar**: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência Agrotecnologia*, v. 38 (2), p. 109-112, 2014 (in Portuguese, with abstract in English).
- FONTES, P.C.R.; BRAUN, H.; SILVA, M.C.C.; COELHO, F.S.; CECON, P.R.; PARTELLI, F.L. Tuber yield prognosis model and agronomic nitrogen use efficiency of potato cultivars. **Australian Journal of Crops Science**. v. 10, p. 933-939, 2016.
- FORTIER, E.; DESJARDINS, Y.; TREMBLAY, N.; BÉLEC, C.; CÔTÉ, M. Influence of irrigation and nitrogen fertilization on broccoli polyphenolics concentration. **Acta Horticulturae**, v. 856, p. 55-62, 2010.
- GUO, S.; BRÜCK, H.; SATTELMACHER, B. Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. **Plant Soil**, v. 239, p. 267–275, 2002.
- HAMILTON, J.G.; ZANGERL, A.R.; DELUCIA, E.H.; BERENBAUM, M.R. The carbon-nutrient balance hypothesis: its rise and fall. **Ecology Letters**. v. 4, p. 86-95, 2001.
- HISCOX, J.D., AND G.F. ISRAELSTAM. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**. v. 57, p. 1332-1334, 1979.

- HUAN, Y.U.; HUA-SONG, W.U.; WANG, Z.-J. Evaluation of SPAD and Dualex for in-season corn nitrogen status estimation. **Acta Agronomica Sinica**. v. 36, p. 840-847, 2010.
- JANGPROMMA, N., S. KITTHAISONG, K. LOMTHAISONG, S. DADUANG, P. JAISIL, AND S.A. THAMMASIRIRAK. Proteomics analysis of drought stress-responsive proteins as biomarker for droughttolerant sugarcane cultivars. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**. v. 2, p. 89-102, 2010.
- KALAJI, M.H., P. DĄBROWSKI, M.D. CETNER, I.A. SAMBORSKA, I. ŁUKASIK, M. BRESTIC, M. ZIVCAK, T. HORACZEK, J. MOJSKI, H. KOCIEL, AND B.M. PANCHAL. A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions. **Journal of Plant Nutrition**. v. 40, p. 1024-1034, 2017.
- KANDIL, F.E.; GRACE, M.H.; SEIGLER, D.S.; CHEESEMAN, J.M. Polyphenolics in *Rhizophora mangle* L. leaves and their changes during leaf development and senescence. **Trees**. v. 18, p. 518-528, 2004.
- KAPPES, C.; ARF, O.; ANDRADE, J.A.C. Produtividade do milho em condições de diferentes manejos do solo e de doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1310–1321, 2013.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KONDÖRFER, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 24, p. 363-376, 2000.
- MALAVOLTA, E., G.C. VITTI, AND A.S. OLIVEIRA. *Nutritional status assessment: principles and applications*. Piracicaba: **Potafós**. v. 2, p. 319, 1997. (in Portuguese, with abstract in English).
- MASCLAUX-DAUBRESSE C.; DANIEL-VEDELE, F.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilisation in plants: challenges for sustainable and productive agriculture, **Annals of Botany**, v. 105, p. 1141-1157, 2010.

- MARKWELL, J., J.C. OSTERMAN, AND J.L. MITCHELL. Calibration of the Minolta SPAD-502-502 leaf chlorophyll meter. **Photosynthesis Research**. v. 46, p. 467-472, 1995.
- MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, J.G.; SOUZA, R.B. de Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.) **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: CFSEMG. p. 143-168, 1999.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; SANGOI, L.; BAYER, C.; ARGENTA, G. Monitoramento do nitrogênio na planta e no solo para predição da adubação nitrogenada em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 407-417, 2007.
- RODRIGUEZ-LUCENA, P., L. HERNANDEZ-APAOLAZA, AND J.J. LUCENA. Comparison of iron chelates and complexes supplied as foliar sprays and in nutrient solution to correct iron chlorosis of soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 173, p. 120-126, 2010.
- ROSTAMI, M.; KOOCHEKI, A.R.; MAHALLATI, M.N.; KAFI, M. Evaluation of chlorophyll meter (SPAD) data for prediction of nitrogen status in corn (*Zea mays* L.). **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, p. 79-85, 2008.
- SAMBORSKI, S.M., N. TREMBLAY, AND E. FALLON. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**. v. 101, p. 800-816, 2009.
- SANGOI, L.; MARASCHI, L.M.; MOTA, M.R.; PANISON, F.; SCHMITT, A.; SOUZA, N.M.; GIODANI, W.; SHENATTO, D.E. Desempenho agrônômico do milho em razão do tratamento de sementes com *Azospirillum sp.* e da aplicação de doses de nitrogênio mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1141-1150, 2015.
- SANTOS, F. C., ALBUQUERQUE FILHO, M. R., RESENDE, Á. V., OLIVEIRA, A. C., GOMES, T. C., & OLIVEIRA, M. S. Adubações nitrogenada e potássica no sorgo 23 biomassa-productividade e qualidade de fibra. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2014.

- SANTOS, F.C.DOS., A.V.DE RESENDE, M.R.DE ALBUQUERQUE FILHO, A. MAY, S.C.B. CRUZ, G.DE.A. GRAVINA, AND R.A.C. PARRELLA. **Saccharin sorghum response to NPK fertilization in Cerrado Oxisol from Central Minas Gerais, Brazil**. Embrapa Milho e Sorgo. 2015. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 130) (in Portuguese, with abstract in English).
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, p. 590, 2018.
- SCHEFER, A.; CIPRIANI, K.; CERICATO, A.; SORDI, A.; RESCHKE LAJÚS, C. Eficiência Técnica e econômica da cultura da soja submetida à aplicação de fertilizantes nitrogenados em semeadura e cobertura. **Revista Scientia Agraria**. v. 17 (2), p. 14-20, 2016.
- SCHUELTER, A. R.; FINGER, F. L.; CASALI, V. W. D.; AMARAL, D. S. S. L.; SHIMOYA, A. Avaliação dos níveis de clorofila em folhas de tomateiro da cultivar Santa Clara, do mutante 'firme' e do híbrido F1. **Acta Scientiarum**. Biological Sciences, v. 25, n. 1, p. 183-187, 2003.
- SEGNIK, E. **Efeitos de resíduos orgânicos e de sais inorgânicos na volatilização de amônia em solo tratado com ureia**. 1993. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1993.
- SILVEIRA, P.M., A.J.B.P. BRAZ, AND A.D. DIDONET. Chlorophyll meter to evaluate the necessity of nitrogen in dry beans. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 38, p. 1083-1087, 2003.
- SINGH, B., Y. SINGH, J.K. LADHA, K.F. BRONSON, V. BALASUBRAMANIAN, J. SINGH, AND C.S. KHIND. Chlorophyll meter and leaf color chart based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India. **Agronomy Journal**. v. 94, p. 821-829, 2002.
- SINGH, M.P., J.E. ERICKSON, L.E. SOLLENBERGER, K.R. WOODARD, J.M.B. VENDRAMINI, AND J.R. FEDENRO. Mineral composition and biomass

partitioning of sweet sorghum grown for bioenergy in the southeastern USA. **Biomass and Bioenergy**. v. 47, p. 1-8, 2012.

SOARES, Johnny Rodrigues. **Efeito de inibidores de urease e de nitrificação na volatilização de NH<sub>3</sub> pela aplicação superficial de ureia no solo**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2011.

SOARES, E.R., E.L.M. COUTINHO, S.B. RAMOS, M.S. DA SILVA, AND J.C. BARBOSA. Accumulation of dry matter and macronutrients in sweet sorghum cultivars. **Semina. Ciências Agrárias**. v. 35, p. 3015, 2014.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**. v. 33, p. 687-692, 2003.

SCORDIA, D., COSENTINO, S. L., MANTINEO, M., TESTA, G. & PATANÈ, C. Nitrogen balance in a sweet sorghum crop in a Mediterranean environment. *Agronomy*, v. 11, p. 1292, 2021.

SOUSA, D.M.B.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados. p. 129-145, 2002.

SOUSA, D.M.G.DE., AND E. LOBATO. Nitrogen fertilization. In: Sousa DMS de, Lobato E. **Cerrado: Soil correction and fertilization**. Embrapa. v. 2, p. 129-144, 2004. (in Portuguese, with abstract in English).

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CÉZAR CASSOL, P. Volatilização da amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 493-502, 2011.

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; BÉLEC, C. Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, p. 1355-1369, 2007.

TREMBLAY, N., WANG, Z., BÉLEC, C. Performance of dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content. **Journal of Plant Nutrition**. v. 33, p. 57-70, 2010.

- WHITE, R.P.; SANDERSON, J.B. Effect of planting date, nitrogen rate, and plant spacing on potatoes grown for processing in Prince Edward Island. **American Potato Journal**. v. 60, p. 115-126, 1983.
- WITT, C.; PASQUIN, J.M.C.A.; MUTTERS, R.; BURESH, R.J. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. **Better Crops**. v. 89, p. 36–39, 2005.
- XAVIER, W. D.; CASTOLDI, G.; CAVALCANTE, T. J.; RODRIGUES, C. R.; TRINDADE, P. R.; LUIZ, I. A.; DAMIN, V. Portable Chlorophyll Meter for Indirect Evaluation of Photosynthetic Pigments and Nitrogen Content in Sweet Sorghum. **Sugar Tech**. v. 23, p. 1-11, 2021.
- YANG, W.H., S. PENG, J. HUANG, A.L. SANICO, R.J. BURESH, AND C. WITT. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice. **Agronomy Journal**. v. 95, p. 212–217. 2003.
- ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTE, A. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices. **Biomass Bioenerg**. v. 40, p. 1-12, 2012.
- ZANDONADI, C.H.S.; ALBUQUERQUE, C.J.B.; FREITAS, R.S. de. Chlorophyll index (SPAD) and macronutrients relation and productive performance of sorghum hybrids in different sowing dates. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n.4, p. 546-555, 2016.

## 7. CONCLUSÃO GERAL

O sorgo sacarino se mostrou apto para ser cultivado em solos de texturas arenosa e franco argilosa em diferentes níveis de fertilidade do solo e teor de M.O, com intuito de fornecer matéria-prima para abastecer o mercado de etanol na entressafra da cana-de-açúcar. Em solos previamente corrigidos e com adequados níveis de fertilidade e matéria orgânica, observou-se maior eficiência produtiva com aplicação de menor dose de N.

No entanto, o primeiro ensaio mostrou que a diferença é pouco significativa entre as parcelas adubadas com quantidades variáveis de N e o tratamento sem adubação. Neste trabalho ficou evidente que o fornecimento de N de fontes secundárias, como a M.O, geralmente apresenta alta capacidade no suprimento de N, portanto, o máximo crescimento pode ser alcançado sem a necessidade de fontes primárias de N via adubação mineral, fato observado nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas, quando o N do solo pôde atender às necessidades de N da cultura. Além disso, após a absorção de N pela planta, a conversão do N em clorofila leva algum tempo.

Considerando todos esses fatos, a época mais adequada para a determinação indireta do teor de N na planta, pelo ClorofiLog<sup>®</sup>, pode não estar exatamente no estágio V5 de desenvolvimento da planta, uma vez que, este dispositivo não pôde encontrar diferenças significativas entre o teor de N foliar e o conteúdo de clorofila extraível das folhas do sorgo. Já em estágios mais avançados, o ClorofiLog<sup>®</sup> se mostrou ser uma ferramenta útil e confiável para a determinação indireta dos teores de N em folhas de sorgo sacarino, uma vez que os resultados de clorofila *a*, *b* e clorofila total apresentaram correlação muito elevada ( $r = >0,80$ ) com os pigmentos fotossintéticos obtidos pelo método destrutivo, em estágio V9. No entanto, os aumentos nos índices de clorofila observados em V9 em função do aumento das doses de N não foram convertidos em incrementos de produtividade na fase de colheita.

No segundo ensaio, os resultados mostraram que as características intrínsecas de cada solo influenciaram diretamente na absorção e assimilação de N pelo sorgo. Neste estudo, considerando a dose de maior retorno agrônômico, o maior acúmulo de N nos órgãos da planta e de pigmentos fotossintetizantes nas folhas (método destrutivo) apresentaram maiores incrementos, em solos de textura média (LVw) e arenosa (NQo), com a aplicação de aproximadamente 200 kg ha<sup>-1</sup> de N. No entanto, a maior produtividade de biomassa seca (88,3 g) foi alcançada quando da aplicação de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N em solo de textura muito argilosa (LVd).

Em V6, os dados apresentaram moderada relação entre os aportes crescentes de N e os índices de Chlor total e IFLV obtidos pelos sensores portáteis: ClorofiLog<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Dualex<sup>®</sup> e CCF. Em V8, as leituras realizadas com os sensores portáteis SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> estimaram com moderada precisão a correlação existente entre as doses de N e o índice de clorofila total das folhas, independente do solo estudado. Desta forma, fica evidente que a cultura do sorgo atinge máxima eficiência de aproveitamento de N até determinada dose, ou seja, não aumenta indefinidamente, corroborando os resultados de biomassa seca.

Com relação a eficiência nas leituras, os medidores portáteis SPAD<sup>®</sup> e Dualex<sup>®</sup> estimaram com alta precisão a concentração de pigmentos fotossintéticos extraíveis e teor de N na folha, reduzindo o tempo de resposta e os reagentes químicos normalmente utilizados nos procedimentos laboratoriais.