

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

WANDERSON JOSÉ DE OLIVEIRA

CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO, DOSES DE NITROGÊNIO EM SOLO COM E SEM SUBSOLAGEM

Recife-PE, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

WANDERSON JOSÉ DE OLIVEIRA

CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO, DOSES DE NITROGÊNIO EM SOLO COM E SEM SUBSOLAGEM

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola
da UFRPE como parte dos pré-
requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof^o Dr. Mario M. Rolim

Recife-PE, 2019

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

O48c Oliveira, Wanderson José de
Cana-de-açúcar cultivada sob diferentes lâminas de irrigação, doses de nitrogênio em solo com e sem subsolagem / Wanderson José de Oliveira. – 2019.
78 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2019.
Inclui referências.

1. Cana-de-açúcar 2. Clorofila 3. Subsolagem 4. Solos - Teor de nitrogênio 5. Irrigação agrícola I. Rolim, Mario Monteiro, orient.
II. Título

CDD 631.4

CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO, DOSES DE NITROGÊNIO EM SOLO COM E SEM SUBSOLAGEM

WANDERSON JOSÉ DE OLIVEIRA

Tese defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim (UFRPE)
Orientador

Claudio Augusto Uyeda (IFPE)
Examinador

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto (EECAC - URFPE)
Examinador

Prof. Dr. Edvan Rodrigues de Spuza (URFPE)
Examinador

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva (UFRPE)
Examinador

A Deus, a minha esposa Jaqueline, a meus pais Gilvan e Luciene, a todos os membros de minha família vivos ou que já foram chamados por Deus.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai, Filho e Espírito Santo por seu Amor, Sacrifício e Dons sem os quais não seria ninguém.

À minha esposa Jaqueline pelo amor, companheirismo, dedicação e sabedoria que edifica nossa casa e permite as inúmeras conquistas em nossas vidas.

A meus pais Gilvan e Luciene por todos sacrifícios que fizeram durante suas vidas e que mesmo não tendo a oportunidade de estudar entenderam que a educação transforma a realidade das pessoas.

A meu irmão Willams Oliveira companheiro de caminhada na vida acadêmica por ser fonte de conhecimento e a minha cunhada Juliana Oliveira pela força que é.

A minha amiga Ana Villar, Celia Santos, Daniela Pereira e Jessyka Fontenelle, por todo apoio. Não tenho palavras para explicar a importância de vocês. Aos meus novos amigos Diego Araújo pelas consultas, e Kátia Ribeiro pelas conversas, bem-vindos a nosso grupo.

Ao meu compadre Antônio Cezar, por toda a força que me deu na condução desse experimento e a sua comadre Natalia também por toda ajuda.

A Devson e Sergio, meus cunhados. Ligia, Flávio e Thainá meus primos. Pelas vindas a Carpina para ajudar na coleta de dados.

A professora Laercia. Uma pessoa iluminada e com uma força gigantesca a quem tenho a honra de chamar de amiga.

Ao meu orientador Prof^o Dr. Mario Monteiro Rolim pela paciência, compreensão e por ser exemplo de profissional que luta por essa Pós-Graduação.

A todos do laboratório de Mecânica dos solos e aproveitamento de resíduos com os quais tive a oportunidade e o prazer de conviver, principalmente a Keila, Francisco, Uilka, Raguiara e Roberta.

A Estação experimental de cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE), por disponibilizar a estrutura para realização do experimento, na pessoa do Dr. Djalma Euzébio. A Eng. Agrônomo Evanilson Paulino parceiro de caminhada e a todos outros trabalhadores da Estação em especial a Seu Zé por estar sempre pronto a ajudar.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola na pessoa do coordenador Prof^o Dr. Ênio F. F. e Silva e também a Capes e ao CNPq pela concessão da bolsa.

Ao Prof^o Dr. Newton Pereira Stamford meu orientador na graduação com quem descobri o mundo científico. Ao Prof^o Dr. Edvan Rodrigues de Souza meu orientador do mestrado que me ensinou que posso ser melhor com planejamento e paciência.

A todos os meus professores em especial a tia Inês que me alfabetizou, tia Vera que me conduziu nos primeiros anos de estudo, André Valença com quem descobrir amar matemática, tia Cris e tio Luiz Valença meus amados diretores, Prof^o Marcelo Apolinário (CODAI/UFRPE) um exemplo de profissional, Prof^o Manasses (PGEA/UFRPE), meu professor desde a graduação e com quem compartilho o gosto pela irrigação, ao prof^o Geber (PGEA/UFRPE) meu professor de Análise multivariada. A todos os outros professores que dedicam suas vidas a ensinar.

Aos professores da Escola Estadual Torquato de Castro e da EREM Tito Pereira de Oliveira com quem tenho aprendido e que me fizeram crescer profissionalmente pelo exemplo de profissionais que são.

Em Memória do Prof^o José Swami Pais de Melo, o homem mais inteligente que tive o prazer de conhecer e conviver e que marcou a minha vida pela forma como encarava os desafios do doutorado.

A todos que fazem parte desse grande programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

SALMO 91

Aquele que habita no abrigo do Altíssimo
e descansa à sombra do Todo-poderoso
pode dizer ao Senhor:

"Tu és o meu refúgio e a minha fortaleza,
o meu Deus, em quem confio".

Ele o livrará do laço do caçador
e do veneno mortal.

Ele o cobrirá com as suas penas,
e sob as suas asas você encontrará refúgio;
a fidelidade dele será o seu escudo protetor.

Você não temerá o pavor da noite
nem a flecha que voa de dia,
nem a peste que se move sorrateira
nas trevas,
nem a praga que devasta ao meio-dia.

Mil poderão cair ao seu lado;
dez mil, à sua direita,
mas nada o atingirá.
Você simplesmente olhará,
e verá o castigo dos ímpios.

Se você fizer do Altíssimo o seu abrigo,
do Senhor o seu refúgio,
nenhum mal o atingirá,
desgraça alguma chegará à sua tenda.

Porque a seus anjos ele dará ordens
a seu respeito,
para que o protejam em todos
os seus caminhos;
com as mãos eles o segurarão,
para que você não tropece em alguma pedra.

Você pisará o leão e a cobra;
pisoteará o leão forte e a serpente.

"Porque ele me ama, eu o resgatarei;
eu o protegerei, pois conhece o meu nome.
Ele clamará a mim, e eu lhe darei resposta,
e na adversidade estarei com ele
vou livrá-lo e cobri-lo de honra.
Vida longa eu lhe darei,
e lhe mostrarei a minha salvação."

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xi |
| RESUMO GERAL | xii |
| GENERAL ABSTRACT | xiii |
| INTRODUÇÃO GERAL..... | 14 |
| CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| Cana-de-açúcar..... | 17 |
| Dinâmica do nitrogênio..... | 18 |
| Manejo eficiente da irrigação..... | 20 |
| Compactação do solo e subsolagem..... | 21 |
| BIBLIOGRAFIA | 26 |
| CAPÍTULO II - FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE- AÇÚCAR SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM | 34 |
| RESUMO..... | 35 |
| ABSTRACT..... | 36 |
| INTRODUÇÃO | 36 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 44 |
| CONCLUSÃO | 54 |
| BIBLIOGRAFIA | 54 |
| CAPÍTULO III - FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA <i>a</i> EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM | 58 |
| RESUMO..... | 59 |
| ABSTRACT..... | 59 |
| INTRODUÇÃO | 60 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | 61 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 67 |
| CONCLUSÃO | 76 |
| BIBLIOGRAFIA | 76 |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II - FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

| | |
|---|----|
| Figura 1. Croqui da área experimental com detalhamento da parcela experimental e os tratamentos. N1, N2, N3, N4 e N5 (0, 40, 80, 120, 160 kg ha ⁻¹ respectivamente). L1, L2, L3 e L4 (0, 50, 100 e 150% da ETC). O S em frente ao nome do fator indica que o solo foi com subsolagem e a ausência de S indica o solo sem subsolagem..... | 40 |
| Figura 2 - Precipitação e lâmina de irrigação aplicada durante o experimento..... | 41 |
| Figura 3. Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado..... | 45 |
| Figura 4. Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo subsolado..... | 49 |
| Figura 5. Desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas (A, C e E) e entre as lâminas e o solo não subsolado (nsub) e subsolado (sub) (B, D, F) para o rendimento de açúcar standard (Aç), álcool anidro (AA) e Álcool hidratado (Ah). Letras minúsculas para o desdobramento das lâminas dentro de cada dose e letras maiúsculas para o desdobramento das doses dentro de cada lâmina..... | 53 |

CAPÍTULO III – FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA a EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

| | |
|---|----|
| Figura 1. Croqui da área experimental com detalhamento da parcela experimental e os tratamentos. N1, N2, N3, N4 e N5 (0, 40, 80, 120, 160 kg ha ⁻¹ respectivamente). L1, L2, L3 e L4 (0, 50, 100 e 150% da ETC). O S em frente ao nome do fator indica que o solo foi com subsolagem e a ausência de S indica o solo sem subsolagem..... | 63 |
| Figura 2 - Precipitação e lâmina de irrigação aplicada durante o experimento..... | 65 |
| Figura 3. Desdobramento da interação entre as doses de N em condições de solo não subsolados (A) e subsolados (B) em cultivo de cana-de-açúcar..... | 68 |
| Figura 4. Desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas de irrigação em cultivo de cana-de-açúcar. (A) L1-0% da ETC, (B) L2-50% da ETC, (C) L3-100% da ETC, (D) L4-150% da ETC..... | 71 |
| Figura 5. Análise de componentes principais dos parâmetros do teste-JIP, gráfico de correlações, em condições de solo não subsolado..... | 74 |
| Figura 6. Análise de componentes principais dos parâmetros do teste-JIP, gráfico de correlações, em condições de solo subsolado..... | 75 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II - FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Caracterização química do solo da área experimental..... | 38 |
| Tabela 2 - Caracterização física do solo da área experimental..... | 38 |
| Tabela 3 - Manejo da adubação durante o cultivo da área..... | 39 |
| Tabela 4. Lâminas de irrigação e totais aplicadas no experimento..... | 39 |
| Tabela 5 - Valores de Kc para cana-soca..... | 41 |
| Tabela 6. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha ⁻¹ em solo não subsolado..... | 47 |
| Tabela 7. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha ⁻¹ em solo subsolado..... | 50 |
| Tabela 8. Resumo da ANOVA do rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N)..... | 52 |

CAPÍTULO III - FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA a EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Caracterização química do solo da área experimental..... | 62 |
| Tabela 2 - Caracterização física do solo da área experimental..... | 62 |
| Tabela 3 - Manejo da adubação durante o cultivo da área..... | 62 |
| Tabela 4. Lâminas de irrigação e totais aplicadas no experimento..... | 63 |
| Tabela 5 - Valores de Kc para cana-soca..... | 64 |
| Tabela 6 - Resumo dos parâmetros, fórmulas e sua descrição com dados extraídos de fluorescência da clorofila a (OJIP)..... | 65 |
| Tabela 7. Resumo das componentes principais da análise de componentes principais em condições subsoladas e não subsoladas..... | 74 |

RESUMO GERAL

OLIVEIRA, Wanderson Jose de. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Fevereiro de 2019. Cana-de-açúcar cultivada sob diferentes lâminas de irrigação, doses de nitrogênio em solo com e sem subsolagem. Orientador: Prof^o Dr. Mario Monteiro Rolim.

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância no cenário mundial pela produção de açúcar, álcool e biomassa; no entanto mesmo sendo cultivada em diversas regiões do mundo, a água e o nitrogênio são fatores limitantes para sua produção. Com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes doses de nitrogênio e lâminas de irrigação na cultura da cana-de-açúcar cultivada em condições de solo com e sem subsolagem. Foi realizado um experimento em campo, em cana soca na 4^o folha de cultivo utilizando a variedade RB92579 na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina - EECAC/UFRPE. As doses de nitrogênio (0; 40; 80; 120 e 160 kg ha⁻¹) e as lâminas de irrigação (0; 50; 100 e 150% da evapotranspiração da cultura) foram arranjadas em faixas em condições sem e com subsolagem com delineamento em blocos, 5×4×2 com 3 repetições. Foi então determinada a produtividade da cana-de-açúcar e obtidas as funções de produção, as regiões de produção máxima, a taxa marginal de substituição, a região de produção racional e o rendimento de açúcar e álcool nos solos com e sem subsolagem. Para verificar os efeitos dos tratamentos sobre a fotossíntese das plantas foi realizada a análise de fluorescência da clorofila *a* aos 150 dias de cultivo em folhas +1 adaptadas ao escuro. A partir dos dados coletados foram calculados os parâmetros do Teste JIP. As lâminas e doses de N máximas encontrada foram de 2033 mm e 131 kg ha⁻¹ para o solo sem subsolagem e de 1729 mm e 137 kg ha⁻¹ para o solo com subsolagem com a respectivas produtividades de 125 e 127 Mg ha⁻¹, com a região de produção racional delimitada pelas regiões de produções máximas. Para o maior rendimento de açúcar e álcool a aplicação de insumos deve permanecer na região de produção racional até o mínimo de 80 kg h⁻¹ N e 1456 mm de água pois combinações menores de insumos diminuem o rendimento de açúcar e álcool. O desempenho da fotoquímica em cana-de-açúcar cultivadas em solo subsolado é maior do que nas cultivadas em solo não subsolado. Lâmina maiores ou iguais a 100% da ETC e doses de N maiores ou iguais a 80 kg ha⁻¹ foram mais eficientes fotossinteticamente tanto em condições de solo não subsolado quanto em solo subsolado.

Palavras-chave: função de produção; fluorescência da clorofila; *Saccharum officinarum*

GENERAL ABSTRACT

OLIVEIRA, Wanderson Jose de. Rural Federal University of Pernambuco. February 2019. Sugarcane cultivated under different irrigation, nitrogen level in soil with and without subsoiling. Advisor: Prof^o Dr. Mario Monteiro Rolim.

Sugarcane is a crop of great importance in the world scenario for the production of sugar, ethanol and biomass; although being cultivated in several regions of the world, water and nitrogen are limiting factors for its production. The objective of this study was to evaluate the effect of different nitrogen doses and irrigation slides on sugarcane cultivated under soil conditions with and without subsoiling. A field experiment was carried out on cane soca in the 4th crop leaf using the variety RB92579 at the Experimental Sugarcane Station of Carpina - EECAC / UFRPE. Nitrogen doses (0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹) and irrigation slides (0, 50, 100 and 150% of crop evapotranspiration) were arranged in strips under and without subsoiling conditions in blocks, 5 × 4 × 2 with 3 replicates. Sugarcane productivity was then determined and the production functions, maximum production regions, marginal substitution rate, rational production region, and yield of sugar and alcohol in soils with and without subsoiling were determined. In order to verify the effects of the treatments on the photosynthesis of the plants, the chlorophyll fluorescence analysis was performed at 150 days of cultivation on leaves +1 adapted to the dark. From the collected data the JIP Test parameters were calculated. The maximum N levels and slides were 2033 mm and 131 kg ha⁻¹ for the soil without subsoiling and 1729 mm and 137 kg ha⁻¹ for the soil with subsoil with the respective yields of 125 and 127 Mg ha⁻¹, with the region of rational production delimited by the regions of maximum productions. For the higher yield of sugar and alcohol the application of inputs must remain in the region of rational production until the minimum of 80 kg h⁻¹ N and 1456 mm of water because smaller combinations of inputs decrease the yield of sugar and alcohol. The performance of photochemistry in sugarcane plants grown in subsoil soil is higher than in those grown in non-subsoil soil. Blade greater than or equal to 100% of ETC and doses of N greater than or equal to 80 kg ha⁻¹ were more efficient photosynthetically in both subsoil and subsoil conditions.

Keywords: production function; chlorophyll fluorescence; *Saccharum officinarum*

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é uma gramínea que apresenta uma grande eficiência no uso de água, explicado pelo fato de ser uma planta C4, já possuindo naturalmente essa característica, sendo também muito eficiente na absorção de nitrogênio (N). A alta eficiência na absorção de N é advinda do processo de melhoramento genético a que essas plantas foram inseridas, na busca por variedades cada vez mais produtivas e competitivas e que necessitam de uma maior exportação do nutriente.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de etanol de cana-de-açúcar, tornando-a então uma das mais importantes culturas agrícolas do país. Estando disseminada principalmente no Sudeste e litoral do Nordeste do Brasil sendo cultivada predominantemente em cultivo de sequeiro. No Sudeste a cana-de-açúcar encontra melhores condições edafoclimáticas para seu desenvolvimento, alcançando maiores produtividades diferentemente do Nordeste. A água é o fator mais limitante para a produção da cana-de-açúcar e o uso da irrigação, poderia alavancar a produtividade da cultura.

Um outro fator limitante para a produção da cana-de-açúcar é o nitrogênio (N). O N faz parte de diversas moléculas na planta e as alterações provocadas pela maior ou menor absorção de N se refletem no seu crescimento e podem aumentar ou diminuir o rendimento da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma cultura industrial e muitas vezes existe um grande tráfego de máquinas no campo. Com o passar do tempo a passagem demasiada de máquinas pode resultar na compactação do solo, o que é motivo de grande preocupação por causa de suas consequências ambientais e econômicas.

Para dirimir o efeito da compactação a subsolagem é considerada uma medida eficiente para melhorar as características físicas do solo, incluindo, porosidade, aeração, infiltração da água, diminuição da densidade do solo, a resistência à penetração e a capacidade de retenção de água no solo.

Muitos trabalhos estudam os efeitos da aplicação de N, da irrigação ou da subsolagem sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar, mas a interação entre esses três fatores e seu impacto sobre o desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar ainda são poucos encontrados na literatura.

Para verificar a interação desses fatores sobre a produção a função de produção surge com uma excelente ferramenta. A partir da função de produção, é possível obter a

solução ótima para uma determinada combinação insumo-produto, que possa maximizar o uso de recursos pelo produtor. O uso das funções de produção permite a obtenção da produtividade ótima dentro de uma condição de uso racional de água e nitrogênio pelo produtor.

O estresse hídrico, déficit de nitrogênio e a compactação do solo causam efeitos prejudiciais a fotossíntese das plantas, e essas alterações podem ser observadas através da análise da fotoquímica da planta.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a analisar o efeito de diferentes doses de N e lâminas de irrigação em cana-de-açúcar cultivada em condições de solo com e sem subsolagem.

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea (Família Poaceae), semiperene, de metabolismo C4, que se caracteriza por altas taxas de fotossíntese líquida, eficiência na utilização do nitrogênio e da energia solar, o que a torna uma das mais eficientes e produtivas de todas as culturas (SILVEIRA, 1985).

A cultura pertence ao gênero *Saccharum* que provavelmente se originou antes dos continentes assumirem as suas formas e locais atuais, consistindo de 35-40 espécies com dois centros de diversidade: o Velho Mundo (Ásia e África) e o Novo Mundo (América do Sul, do Norte e Central) (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011). O mundo ocidental primeiro teve conhecimento da existência desta planta durante as conquistas de Alexander, o Grande, cerca de dois milênios atrás (GRIVET et al., 2004).

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância mundial e se destaca na produção de açúcar e etanol. Em 2017 a produção de cana-de-açúcar no mundo foi de 1,9 bilhão de toneladas, com produtividade de 70,9 kg ha⁻¹, e mais de 50% da produção concentradas nas américas, onde o Brasil se destaca como o maior produtor mundial (FAOSTAT, 2019). Destacando-se também na produção de açúcar e álcool. Um terço do etanol mundial é produzido no Brasil onde a cana-de-açúcar apresenta uma grande importância social, econômica e ambiental (GOLDEMBERG et al., 2014; BORGES et al., 2015).

No Brasil, na safra 2018/2019 estima-se que a área plantada de cana-de-açúcar seja de 8.634,2 mil hectares com uma produtividade de 71,33 t ha⁻¹ e produção de 615,84 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando em 31.728,5 mil toneladas de açúcar e 32,31 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2018).

A cana-de-açúcar é produzida no Brasil normalmente sem o uso de irrigação. Os produtores brasileiros limitam sua produção em regiões onde ocorre um volume razoável de chuvas (SCARPARE et al., 2016). Embora essa cultura seja adaptada às condições de alta intensidade de luminosidade, altas temperaturas e escassez de água, a deficiência de água durante as fases de crescimento e desenvolvimento podem levar a reduções expressivas no colmo e produção de açúcar (DANTAS NETO et al., 2006).

A elevada dependência da produção de sequeiro destaca a importância do tempo na produção de cana, e, portanto, sobre os mercados de açúcar, etanol e energia elétrica em escalas regionais, nacionais e globais (MARIN et al., 2013).

Para aumento da produção de cana-de-açúcar a irrigação tem emergido como uma das principais alternativas, especialmente em regiões com pouca disponibilidade de água (SCAPARE et al., 2015). Vários pesquisadores já demonstraram a viabilidade técnica de irrigação com esta cultura, resultando em consideráveis aumentos de produção (normalmente acima de 140 Mg ha^{-1}) (CARDOZO et al., 2016). Essas pesquisas têm-se centrado sobre a eficiência econômica, maior longevidade da planta (mais de 10 colheitas) e rendimento constante (redução da variação de produção entre as colheitas) (FREITAS et al., 2009).

Outro fator determinante para a produção de cana de açúcar, especialmente no que diz respeito a longevidade das socas é a adubação nitrogenada (MUCHOW et al., 1996).

Dinâmica do nitrogênio

Desconsiderando o vapor de água, os principais componentes da atmosfera terrestre não-poluída são nitrogênio diatômico (N_2 , cerca de 78% das moléculas), oxigênio diatômico (O_2 , cerca de 21%), argônio (ar, cerca de 1%), dióxido de carbono (CO_2 , atualmente cerca de 0,04%) e concentrações traço de outros gases (MOZETO, 2001). Além de presente na atmosfera o nitrogênio pode ser encontrado em menores concentrações em fosséis, adsorvido as partículas de argilas, como constituinte de rochas ígneas, nos oceanos e principalmente na matéria orgânica.

Embora exista em grande quantidade na atmosfera o N não é absorvido nessa forma pelas plantas sendo necessária a aplicação de N nas lavouras. grande parte do N aplicado na agricultura é fixado pelo processo industrial Haber-Bosch, que opera sob altas temperaturas (400-500 °C) e alta pressão (200-250 bar) na presença de um catalisador (SMIL, 2004).

O N constitui cerca de 1% da matéria seca total (fitomassa) da planta, e a sua deficiência provoca uma redução na síntese de clorofila e aminoácidos, e provoca ainda uma diminuição na energia disponível para a produção de hidratos de carbono e esqueleto de carbono, com um efeito direto sobre o crescimento e produção da cultura (MALAVOLTA et al., 1997).

Segundo Kaur et al. (2015) o N é um componente importante na síntese de pigmentos vegetais e enzimas fotossintéticas em plantas, que afetam direta ou indiretamente a fotossíntese de culturas. Segundo Li et al. (2013) um maior teor de N

foliar beneficia a planta, correlacionando-se com o alto teor de clorofila e aumentando as atividades do cloroplasto e a taxa fotossintética.

O efeito negativo da deficiência de N nas culturas pode ser descrito através de dois mecanismos: uma redução da quantidade de radiação interceptada durante o período de crescimento da cultura devido a uma redução na área foliar e uma taxa diária reduzida de fotossíntese (ISLA et al., 2016). Segundo Oliveira et al. (2016) o desenvolvimento da área foliar, ou seja, a estrutura ativa fotossintética, está diretamente correlacionado a uma alta capacidade de fotoassimilação.

Segundo Wang et al. (2016) a taxa fotossintética, a taxa de transpiração e o comportamento estomático são alterados em graus variados quando as plantas são submetidas ao estresse hídrico e ao déficit de N. A deficiência de N pode reduzir significativamente a taxa fotossintética líquida das plantas devido a diminuição na atividade da ribulose biscofosfato carboxilase oxigenase (Rubisco) (WARAICH et al., 2011).

Embora a maior parte dos estudos foquem nas mudanças ligadas direta ou indiretamente a fase bioquímica da fotossíntese a fase fotoquímica também pode ser usada para diagnosticar o impacto do estresse hídrico e do déficit de N na fotossíntese da planta.

O estresse pode danificar os complexos antenas responsáveis pela captação da energia luminosa. Como os centros de reação são formados por moléculas de clorofila modificada e as moléculas responsáveis pela absorção, transferência e conversão de energia são na sua maioria compostas de proteínas a deficiência de N leva à diminuição da função do fotossistema I (PSI) e fotossistema II (PSII), que afetam a conversão de energia fotoquímica (HURA et al., 2007; WANG et al., 2016).

O nitrogênio desempenha um papel importante na transferência e dissipação do excesso de energia luminosa, o que pode aliviar o dano do excesso de energia de excitação ao aparelho fotossintético em condições de estresse e manter a máxima eficiência fotoquímica do PSII (ŽIVČÁK et al., 2014).

Em termos do mecanismo, a deficiência de nitrogênio prejudica principalmente o transporte de elétrons cíclicos realizado pelo PS I (ANTAL et al., 2010). Resultados semelhantes foram encontrados por Nikiforou e Manetas (2011) que atribuíram a correlação positiva entre teor de nitrogênio foliar e a atividade PS I.

O N é um nutriente mais requerido devido a utilização de culturas com variedades cada vez mais produtivas, porém, embora o uso de fertilizantes tenha aumentado

temporariamente o rendimento das culturas, sua aplicação tem trazido uma série de problemas ambientais, tais como a poluição da água, as emissões de gases de efeito estufa e a degradação da qualidade do solo (SNYDER et al., 2009; DAI et al., 2013; ZHANG et al., 2013). Portanto, além de garantir uma produção mais elevada, é igualmente importante melhorar a eficiência do uso de N reduzindo sua perda (ZHANG et al., 2008).

Manejo eficiente da irrigação

Sob condições de campo, a necessidade de água é assegurada pela adequada precipitação, contribuição da água subterrânea e irrigação (SARALA et al., 2014). E a componente irrigação desempenha um papel importantíssimo na agricultura.

Cerca de 301 milhões de hectare, o que representa cerca de 20% das terras cultivadas no mundo possuem irrigação (GUNDA e YOUNGS, 2013). No Brasil, embora o potencial de áreas irrigáveis seja estimado em 29,3 milhões de hectares apenas 5,4 milhões possuem irrigação implantada e dessas 800 mil estão implantadas com cana-de-açúcar (AQUASTAT, 2014).

Um manejo da irrigação eficiente é importante para otimizar o uso da água para a produção de cana-de-açúcar, o que possibilita maximizar a rentabilidade e minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente (PARASKEVOPOULOS e SINGELS, 2014).

A determinação de um eficiente manejo da irrigação, em uma análise superficial visa responder a seguinte pergunta: Quando e quanto irrigar? Embora seja uma simples pergunta sua resposta é bastante complexa.

Scardua e Rosenfeld (1987), citam que o consumo de água da cultura da cana-de-açúcar varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura (ciclo fenológico), do ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), das condições climáticas e de outros fatores, como água disponível no solo e variedades da cana-de-açúcar.

Além de requerer conhecimento sobre solo-planta-atmosfera para implantação do melhor sistema de irrigação, para um eficiente manejo ainda é necessário o acompanhamento periódico das variações do teor de água no solo. Isso pode ser feito por três vias: Solo, clima e planta.

No solo a umidade pode ser obtida por sondas de nêutrons, TDR ou estimadas com tensiômetros como pode ser observado em diversos trabalhos (GOMES et al., 2017; HARA e GONÇALVES, 2018; GUIMARÃES et al., 2019).

Via clima diversas equações a partir de variáveis climatológicas podem nos informar a perda de água no solo e a parti daí a quantidade de água a se repor. Inclusive

é com o uso de variáveis climatológicas que encontramos a evapotranspiração a partir da equação de Penman-Monteith. Método considerado padrão pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (ALLEN et al., 2018).

Tratando-se da planta como referencial para as irrigações, existem alguns métodos que indicam o estado hídrico da cultura como: potencial hídrico das folhas, resistência estomática, temperatura do dossel vegetativo, determinação do grau de turgescência das folhas, entre outros. (VIEIRA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016; LIRA et al., 2018; MAIA JUNIOR et al., 2018).

A planta é um dos indicadores da necessidade de irrigação, porém os métodos usados necessitam de maior mão de obra, e especializada, bem como equipamentos caros, muitas vezes inviabilizando seu uso.

O último fator analisado e muitas vezes deixado de lado é o fator humano. Quanto mais tecnificados os sistemas, mais especializados tem que ser a mão de obra. Pois mesmo com o entendimento dos fenômenos envolvidos que possibilitem um bom manejo da irrigação, os cuidados podem ser colocados a perder por maus funcionários por exemplo.

São muitos os fatores que determinam um bom manejo da irrigação. Tantos que alguns autores preferem falar em gerenciamento da irrigação (FIGUEREDO et al., 2008; VICENTÉ et al., 2017).

A conservação da água agrícola através de uma programação eficiente da irrigação aliviaria a pressão sobre a agricultura tida muitas vezes como vilã no consumo de água doce. Portanto, desenvolver a agricultura de poupança de água, estabelecer horários de irrigação eficientes e melhorar a eficiência do uso da água são essenciais para a sustentabilidade da agricultura, dos recursos hídricos e do ecossistema.

Compactação do solo e subsolagem

Segundo Ribon e Tavares Filho (2008), a compactação refere-se à compressão do solo, que sofreu um manejo inadequado e que resultou no aumento na sua resistência à penetração e densidade, bem como diminuição da porosidade e do conteúdo de água disponível às plantas.

A compactação do solo é uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados podendo limitar as trocas gasosas, absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, atraso na emergência das plântulas e comprometimento do desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, resultando em decréscimos na produtividade das culturas (STONE et al., 2002; MODOLO et al.,

2008). Consiste de uma forma física de degradação que altera a estrutura do solo e influencia a produtividade das culturas (MUELLER et al., 2010). É um fenômeno complexo, de difícil descrição e mensuração, estando intimamente relacionada com as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo que são importantes no desenvolvimento das plantas (LOPES et al., 2011).

A gota da chuva, por exemplo, provoca uma forma natural de compactação (RICHART et al., 2005). Em chuvas intensas a energia cinética das gotas destrói os agregados e as partículas menores de solo provocando o entupimento dos poros e o aparecimento de camadas compactadas. O pisoteio animal seria outro exemplo de como a compactação pode ser provocada de forma natural.

Antropicamente a compactação do solo é principalmente resultado do uso de máquinas agrícolas no campo, sendo motivo de grande preocupação por causa de suas consequências ambientais e econômicas.

A compactação afeta e muda muitas das características do solo, provocando a deterioração da estrutura, diminuição da porosidade, da infiltração e da razão de vazios, e aumentando a densidade do solo (ENEZ et al., 2016). Segundo Viana et al. (2011) a compactação do solo aumenta a densidade do solo, reduzindo a macroporosidade e elevando a micro.

A diminuição da porosidade provoca acesso limitado à água e aos nutrientes, em particular o nitrogênio, o que provavelmente, é o fator determinante nas alterações fisiológicas e do crescimento após a compactação do solo (CAMBI et al., 2017). A principal forma de absorção do N no solo é o NO_3^- , esse íon é predominantemente encontrado na solução do solo, já que não é adsorvido pelas argilas com cargas negativas. Por isso o fluxo de massa é responsável pelo atendimento quase total das necessidades da cultura (RAIJ, 1991). Como a diminuição da porosidade limita o fluxo de água, limita também a entrada de N na planta.

Além de dificultar o acesso a compactação do solo influencia significativamente o teor de N no solo. Tan e Chang et al. (2007) em um experimento em laboratório demonstraram que a compactação do solo teve um efeito negativo sobre a biomassa microbiana, mineralização da matéria orgânica, nitrificação líquida e teores de N no solo.

As alterações na estrutura do solo provocadas pela compactação, ou seja, desagregação do solo, afetam diretamente o habitat dos microrganismos, que são considerados componentes críticos de ecossistemas naturais e antropogênicos, pois regulam o nível de decomposição do material orgânico e o ciclo de nutrientes (BARROS

et al., 2007). Segundo Gil et al. (2011) mudanças na estrutura do solo afetam a infiltração de água, temperatura do solo e aeração diminuindo as comunidades de microrganismos.

Para a formação do agregado, é necessário que os colóides do solo se encontrem floculados e que todos os componentes do agregado sejam posteriormente estabilizados por algum agente cimentante (HILLEL et al., 1980). Um dos principais agentes cimentantes é a matéria orgânica. De acordo com Barreto et al. (2009), a agregação promove a acumulação de N em macroagregados, o que explica a alta sensibilidade do nitrogênio à ruptura do solo. Silva et al. (2014) encontraram diminuição no N do solo com a desagregação dos macroagregados.

Quando os agregados são quebrados essa matéria orgânica fica livre para sofrer a ação de microrganismos. Visto que a maior parte do N do solo encontra-se na matéria orgânica. Segundo Cantarella (2007) o N orgânico complexado na matéria orgânica do solo pode representar 95% do N total do solo.

Devido a saída da matéria orgânica de dentro dos agregados, o N fica disponível para ser absorvido pelas plantas, imobilizado pelos micro-organismos ou perdido. Além disso, diversos estudos mostraram que os minerais do solo podem afetar indiretamente o ciclo de nutrientes microbianos através da adsorção a superfícies minerais ou reações de precipitação (KLEBER et al., 2015).

Outra contribuição da compactação do solo para a alteração no N do solo, é causada pela diminuição da aeração e formação de condições anaeróbicas que contribuem para a desnitrificação. A diminuição dos poros do solo, a difusão restrita do gás e os micro sítios anaeróbios elevados são favoráveis para o processo de desnitrificação do solo, levando a um aumento das emissões de N na forma gasosa (YAMULKI e JARVIS, 2002; LI et al., 2014).

A desnitrificação é definida como a redução biológica de nitrato ou nitrito em produtos finais gasosos (REDDY e DELAUNE, 2008). É estritamente um processo anaeróbico, inclui dois passos, a redução de nitrato (NO_3^-) em nitrito (NO_2^-) e a redução de NO_2^- para amônia ou óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) e dinitrógeno (N_2) (SIRIVEDHIN e GRAY, 2006).

Segundo Bhandral et al. (2007) a compactação do solo causa um aumento de sete vezes no fluxo de N_2O , indicando claramente que as alterações nas propriedades físicas do solo devido à compactação do solo afetam fortemente a desnitrificação. Chamen et al. (2015) encontraram que a perda de nitrogênio através da desnitrificação tendeu a

aumentar com a compactação do solo que causou condições anaeróbias quando os solos estavam úmidos.

Desta forma conclui-se que a compactação do solo tem uma forte influência sobre as condições físicas, químicas e biológicas do solo, ocasionando mudanças na dinâmica do N e no ciclo biogeoquímico desse elemento.

Uma vez que grandes áreas de campos agrícolas no mundo sofrem os efeitos da compactação todos os anos, muito esforço tem sido feito para reduzir os efeitos estressantes da compactação do solo sobre o crescimento das plantas (MIRANSARI et al., 2008). Pois a compactação traz como consequências a redução da capacidade produtiva (REICHERT et al., 2009) e aumento dos processos erosivos no solo (KRÜMMELBEIN et al., 2008).

O subsolador é um dos principais equipamentos utilizados com a finalidade de eliminar ou de minimizar os efeitos negativos da compactação do solo, para, com isso, aumentar a profundidade útil do solo e romper a camada endurecida que possa aparecer com o uso contínuo dos equipamentos tradicionais de preparo (GROTTA et al., 2004).

A subsolagem é considerada uma medida eficiente para melhorar as características físicas de um solo, incluindo, porosidade, aeração, infiltração da água, diminuindo a densidade do solo, a resistência à penetração, a capacidade de retenção de água no solo (LIU et al., 2016a). Um exemplo de sua importância é que para propiciar boas condições físicas no solo para cultivo da cana-de-açúcar, são utilizadas algumas operações agrícolas, e uma que se destaca é a subsolagem (OLIVEIRA FILHO et al., 2015)

A estrutura do solo refere-se ao agrupamento e organização das partículas do solo em agregados e relaciona-se com a distribuição das partículas e agregados num volume de solo. A qualidade do solo pode ser medida pela agregação, pois a manutenção da estrutura do solo facilita a aeração e a infiltração de água e reduz a erodibilidade influenciando tanto no armazenamento quanto na curva de retenção de água no solo (COSTA et al., 2016; FERREIRA et al., 2010).

Como a subsolagem rompe o solo, seu uso provoca um rearranjo das partículas provocando mudanças na estrutura. Souza (2016) trabalhando com dois tipos de solo, encontrou que para o Latossolo Vermelho, após as operações de plantio da cana-de-açúcar, foi verificada redução significativa nos valores dos atributos físicos do solo na camada superficial e para o Argissolo Amarelo, as operações de plantio da cana-de-açúcar não influenciaram nos valores dos atributos físicos após ambos sofrerem subsolagem.

Outras características do solo podem ser melhoradas com a subsolagem. Segundo Liu et al. (2016a) a subsolagem anual de 40 e 50 cm pode diminuir a densidade do solo e a resistência à penetração em comparação com o preparo convencional, e conseqüentemente melhorar a infiltração de água no solo. Segundo Panachuki et al. (2011) a subsolagem rompe a camada compactada, melhorando a capacidade de retenção de água do solo, infiltrando água e porosidade, e reduzindo a densidade do solo.

Reichert et al. (2007) também demonstraram que a subsolagem é eficaz na redução da densidade do solo e aumento da macroporosidade; e infiltração de água. Cunha et al. (2009) observaram que a subsolagem foi efetiva na redução da resistência à penetração na camada de 0,20-0,40 m. Segundo Schwartz e Smith (2016) o campo preparado com subsolagem apresentou consistentemente as taxas de infiltração mais elevadas, e maiores umidades do solo da zona radicular e a menor densidade do solo.

A compactação do solo ocorre tanto na camada superficial como no subsolo e resulta em porosidade reduzida, especialmente de poros grandes, e aumento da densidade do solo (GUAMAN et al., 2016).

Segundo Brunel-Saldias et al. (2017) o tratamento de plantio direto com subsolagem apresentou maior porosidade que o tratamento convencional e do tratamento apenas com plantio direto. Wang et al. (2014) em um experimento de 12 anos encontraram aumento da porosidade total e da macroporosidade com a subsolagem em relação ao plantio convencional, já a microporosidade apresentou maiores valores no plantio convencional.

A água é retida no solo pela ação de duas forças, capilaridade e adsorção. Sendo a capilaridade a principal responsável por reter a água passível de absorção pelas plantas e de intensidade inversamente proporcional ao diâmetro dos poros. Como a subsolagem aumenta a porosidade, ocorre também um aumento na retenção de água no solo.

Liu et al. (2016b) encontraram que a subsolagem aumentou o armazenamento de água no solo em média 8% em 0-20 cm de profundidade do solo, 19% em 20-80 cm de profundidade. Liu et al. (2016a) também encontraram aumento da retenção de água no solo com a subsolagem devido a mudanças na estrutura do solo, ressaltando-se a melhoria na porosidade.

A subsolagem apresenta diversos efeitos benéficos ao solo, mas seu uso deve ser racionalmente pensado, já que há um grande desprendimento de tempo e energia para sua realização.

BIBLIOGRAFIA

Allen, R. G.; Pereira, S. L.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO. 15p. 1998.

Antal, T.; Mattila, H.; Hakala-Yatkin, M.; Tyystjärvi, T.; Tyystjärvi, E. Acclimation of photosynthesis to nitrogen deficiency in *Phaseolus vulgaris*. *Planta*, v. 232, p. 887-898, 2010.

Aquastat. FAO's Information System on Water and Agriculture Brazil: geography and population. Disponível

em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/bra/index.stm. Acesso em 29 de nov de 2015.

Barreto, R. C.; Madari, B. E.; Maddock, J. E.; Machado, P. L.; Torres, E.; Franchini, J.; Costa, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, v. 132, p. 243-251, 2009.

Barros, N.; Gallego, M.; Feijóo, S. Sensitivity of colorimetric indicators of soil microbial activity. *Thermochim Acta*, v. 458, p. 18–22, 2007.

Bhandral, R.; Saggar, S.; Bolan, N. S.; Hedley, M. J. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction. *Soil and Tillage Research*, v. 94, p. 482-492, 2007.

Borges, L. D. A. B.; Madari, B. E.; Leandro, W. M.; Fernandes, P. M.; Silva, E. A.; Silva, M. R.; Silva, M. A. S. Nutritional state and productivity of organic sugarcane in Goiás, Brazil. *Journal of Agronomy*, v. 14, p. 6-14, 2015.

Brunel-Saldias, N.; Martínez, I.; Seguel, O.; Ovalle, C.; Acevedo, E. Structural characterization of a compacted alfisol under different tillage systems. *Journal of soil science and plant nutrition*, v. 16, p. 689-701, 2016.

Cambi, M.; Hoshika, Y.; Mariotti, B.; Paoletti, E.; Picchio, R.; Venanzi, R., Marchi, E. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, v. 384, p. 406-414, 2017.

Cantarella, H. Nitrogênio. In: Novais, R. F.; Alvares, V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. F. L. Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Ed.) *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 375-470.

- Cardozo, N. P.; Bordonal, R. O.; Scala Jr, N. L. Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3988-3997, 2016.
- Chamen, W. T.; Moxey, A. P.; Towers, W.; Balana, B.; Hallett, P. D. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 10-25, 2015.
- Cheavegatti-Gianotto, A.; Abreu, H. M. C.; Arruda, P.; Bespalhok Filho, J. C.; Burnquist, W. L.; Creste, S.; Ulian, E. C. Sugarcane (*Saccharum officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology*, v. 4, p. 62-89, 2011.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 5 – Safra 2018/19, n.3– terceiro Levantamento, Brasília, 2018. 75 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em 24 jan. 2019.
- Costa, C. D. O.; Alves, M. C.; Sousa, A. P. Armazenamento de água em dois solos sob diferentes usos e manejos. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 10, p. 55-65, 2016.
- Cunha, J. P. A. R.; Cascão, V. N.; Reis, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.31, p.371-375, 2009.
- Dai, X. L.; Zhou, X. H.; Jia, D. Y.; Xiao, L. L.; Kong, H. B.; He, M. R. Managing the seeding rate to improve nitrogen-use efficiency of winter wheat. *Field Crops Research*, v. 154, p. 100–109, 2013.
- Dantas Neto, J.; Figueredo, J. L. C.; Farias, C. H. A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.283-288, 2006.
- Enez, K.; Sariyildiz, T.; Savaci, G.; Aricak, B. Variation in some soil properties, organic matter and soil compaction after logging activities. *European Journal of Forest Engineering*, v. 2, p. 82-88, 2016.
- Faostat. Statistical databases. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- Ferreira, R. R.; Tavares Filho, J.; Ferreira, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. *Semina: Ciências Agrárias*, v.31, p. 913-932, 2010.
- Figuerêdo, S. F.; Pozzebon, E. J.; Frizzone, J. A.; Azevedo, J. A.; Guerra, A. F.; Silva, E. M. Gerenciamento da irrigação do feijoeiro baseado em critérios técnicos e econômico no cerrado. *Irriga*, v. 13, p. 378-391, 2008.

- Freitas, R. G.; Baffa, D. C. F.; Brasil, R. P. C. Aumento na produtividade da cana-de-açúcar através da irrigação. *Nucleus*, Edição Especial, p. 15-30, 2009.
- Gil, S. V.; Meriles, J.; Conforto, C.; Basanta, M.; Radl, V.; Hagn, A.; Schloter, M.; March, G. J. Response of soil microbial communities to different management practices in surface soils of a soybean agroecosystem in Argentina. *European Journal of Soil Biology*, v. 47, p. 55-60, 2011.
- Goldemberg, J.; Mello, F. F.; Cerri, C. E.; Davies, C. A.; Cerri, C. C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy*, v. 69, p. 14-18. 2014.
- Gomes, E. R., dos Santos Coscolin, R. B., de Lima, J., Alonso Zuñiga, E., Ruíz Machuca, L. M., & Broetto, F. Utilização de sensor e tensiômetro no monitoramento da umidade do solo na cultura do feijoeiro sob deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 11, p. 2076-2083, 2017.
- Grivet, L.; Daniels, C.; Glaszmann, J. C.; D'hont, A. A review of recent molecular genetics evidence for sugarcane evolution and domestication. *Ethnobotany Research and Applications*, v.2, p.9–17, 2004.
- Grotta, D. C.; Lopes, A.; Furlani, C. E. A.; Klinger, B. B.; Reis, G. N. R.; Silva, R. D. Subsolador: avaliação do desempenho em função da velocidade de trabalho e espaçamento entre hastas. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 26, p. 21-26, 2004.
- Guaman, V.; Bâth, B.; Hagman, J.; Gunnarsson, A.; Persson, P. Short time effects of biological and inter-row subsoiling on yield of potatoes grown on a loamy sand, and on soil penetration resistance, root growth and nitrogen uptake. *European Journal of Agronomy*, v. 80, p. 55-65, 2016.
- Guimarães, C. M., Costa, C. A. G., Carneiro, L. F., Assunção, H. F. D. (2019). Response of the TDR sensor to moisture under different types of management of a typical Latosol in the Cerrado. *Revista Ciência Agronômica*, 50(1), 1-7.
- Gunda, P.; Youngs, H. *Bioenergy and Water: Understanding Impacts*. MIT Energy Initiative and Center for Strategic International Studies, p. 1–46, 2013.
- Hara, A. T.; Gonçalves, A. C. A. Estabilidade temporal da variabilidade espacial da umidade do solo obtida no campo e no laboratório. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, p. 3069-3077, 2018.
- Hillel, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p

- Hura, T.; Hura, K.; Grzesiak, M.; Rzepka, A. Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C3 and C4 plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 29, p. 103–113, 2007.
- Isla, R.; Guillén, M.; Salmerón, M. Nitrogen availability effects on gas exchange measurements in field-grown maize (*Zea mays* L.) under irrigated Mediterranean conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 14, p. e0806, 2016.
- Kaur, G.; Asthir, B.; Bains, N.; Farooq, M. Nitrogen nutrition, its assimilation and remobilization in diverse wheat genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology*, v. 17, p. 531–8, 2015.
- Kleber, M.; Eusterhues, K.; Keiluweit, M.; Mikutta, C.; Mikutta, R.; Nico, P. S. Chapter one-mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. *Advances in Agronomy*, v. 130, p. 1-140, 2015.
- Krümmelbein, J.; Peth, S.; Horn, R. Determination of pre-compression of avariously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil and Tillage Research*, v. 99, p. 139-148, 2008.
- Li, D.; Tian, M.; Cai, J.; Jiang, D.; Cao, W.; Dai, T. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings. *Plant Growth Regulation*, v. 70, p. 257–263, 2013.
- Li, S.; Deng, H.; Rensing, C.; Zhu, Y. G. Compaction stimulates denitrification in an urban park soil using 15N tracing technique. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, p. 3783-3791, 2014.
- Lira, R. M. D., Silva, Ê. F. D. F., Barros, M. D. S., Gordin, L. C., Willadino, L. G., & Barbosa, R. F. Water potential and gas exchanges in sugarcane irrigated with saline waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, p. 679-682, 2018.
- Liu, Z.; Qin, A.; Zhao, B.; Ata-Ul-Karim, S. T.; Xiao, J.; Sun, J.; Ning, D.; Liu, Z.; Nan, J.; Duan, A. Subsoiling effects on grain yield and water use efficiency of spring maize in northern China. *International Agricultural Engineering Journal*, v. 25, P. 9-19, 2016a.
- Liu, Z.; Qin, A.; Zhao, B.; Ata-Ul-Karim, S. T.; Xiao, J.; Sun, J.; Ning, D.; Liu, Z.; Nan, J.; Duan, A. Yield Response of Spring Maize to Inter-Row Subsoiling and Soil Water Deficit in Northern China. *PloS one*, v. 11, p. 1-15, 2016b.
- Lopes, M. S.; Araus, J. L.; Van Heerden, P. D. R.; Foyer, C. H. Enhancing drought tolerance in C4 crops. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, p. 3135-3153, 2011.
- Maia Júnior, S. D. O., Silva, J. A. C., Santos, K. P. O., Cordeiro, D. R., Silva, J. V., Endres, L. Respostas morfológicas e fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar sob

- estresse hídrico no segundo ciclo de cultivo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, p. 2661, 2018
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações* (2nd ed.). Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Marin, F. R.; Jones, J. W.; Singels, A.; Royce, F.; Assad, E. D.; Pellegrino, G. Q.; Justino, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. *Climatic Change*, v. 117, p. 227-239, 2013.
- Miransari, M.; Bahrami, H. A.; Rejali, F.; Malakouti, M. J. Using arbuscular mycorrhiza to alleviate the stress of soil compaction on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 40, p. 1197-1206, 2008.
- Modolo, A. J.; Fernandes, H. C.; Schaefer, G. C. E.; Silveira, J. C. M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema semeadura direta. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, p. 1259-1265, 2008.
- Mozeto, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. *Cadernos Temáticos: Química Nova na Escola*. v. 1, p. 41–49, 2001.
- Muchow, R. C.; Robertson, M. J.; Wood, A. W.; Keating, B. A. Effect of nitrogen on the time-course of sucrose accumulation in sugarcane. *Field Crops Research*, v. 47, p. 143-153, 1996.
- Mueller, L.; Schindler, U.; Mirschel, W.; Shepherd, T. G.; Ball, B. C.; Helming, K.; Rogasik, J.; Eulenstein, F.; Wiggering, H. Assessing the productivity function of soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, p. 601–614, 2010.
- Nikiforou, C.; Manetas, Y. Inherent nitrogen deficiency in *Pistacia lentiscus* preferentially affects photosystem I: a seasonal field study. *Functional Plant Biology*, v. 38, p. 848-855, 2011
- Oliveira Filho, F. X.; Miranda, N. O.; Medeiros, J. F.; Silva, P. C. M.; Mesquita, F. O.; Costa, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 186-193, 2015.
- Oliveira, W. J. D.; Souza, E. R. D.; Almeida, B. G. D.; Silva, Ê. F. D. F.; Melo, H. F. D.; Leal, L. Y. Soil water energetic status and cowpea beans irrigated with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, p. 685-691, 2016.
- Panachuki, E.; Bertol, I.; Alves Sobrinho, T.; Oliveira, P. T. S. D.; Rodrigues, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v.35, p.1777-1785, 2011.

- Paraskevopoulos, A. L.; Singels, A. Integrating soil water monitoring technology and weather based crop modelling to provide improved decision support for sugarcane irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.105, p. 44-53, 2014.
- Raij, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.
- Reddy, K. R.; Delaune, R. D. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. Boca Raton: CRC press, 2008. 757 p.
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Cerreta, C. A.; Silva, L. S. Da; Reichert, J. M. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5. p.49-134, 2007.
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Horn, R.; Håkansson, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, v. 102, p. 242-254, 2009.
- Ribon, A. A.; Tavares Filho, J. Estimativa da Resistência Mecânica à Penetração de um Latossolo Vermelho sob Cultura Perene no Norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v 32, p.1817-1825, 2008.
- Richart, A.; Filho, J. T.; Brito, O. R.; Llanillo, R. F.; Ferreira, R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 26, p. 321-344, 2005.
- Sarala, N. V.; Rao, M. S.; Kumar, M. H.; Nagamadhuri, K. V. Response of sugarcane to plant geometry and irrigation methods in Southern Agro-climatic zone of Andhra Pradesh. *Journal of Sugarcane Research*, v. 4, p. 86-90, 2015.
- Scardua, R.; Rosenfeld, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S.B. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Fundação Cargill, v.1, p.373-431, 1987.
- Scarpate, F. V.; Hernandez, T. A. D.; Ruiz-Corrêa, S. T.; Kolln, O. T.; Castro Gava, G. J.; Santos, L. N. S.; Victoria, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4576-4584, 2016.
- Schwartz, S. S.; Smith, B. Restoring hydrologic function in urban landscapes with suburban subsoiling. *Journal of Hydrology*, v. 543, p. 770–781, 2016.
- Silva, A. P.; Babujia, L. C.; Franchini, J. C.; Ralisch, R.; Hungria, M.; Fátima Guimarães, M. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. *Soil and Tillage Research*, v. 142, p. 42-53, 2014.

- Silveira, J. A. G. Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) cultivada em condições de campo. 1985. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP. 1985.
- Sirivedhin, T.; Gray, K. A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: field and laboratory studies. *Ecological Engineering*, v. 26, p. 167-181, 2006.
- Smil, V. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. Cambridge, 2004. 339 p.
- Snyder, C. S.; Bruulsema, T. W.; Jensen, T. L. Greenhouse Gas Emissions from Cropping Systems and the Influence of Fertilizer Management: A Literature Review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 133, p. 247-266, 2009.
- Souza, F. C. A. D. Atributos físicos de solos submetidos à escarificação na linha de plantio e em área total para cultivo da cana-de-açúcar. 2016. 33 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- Stone, A. J.; Guimarães, C. M.; Moreira, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 207-212, 2002.
- Tan, X.; Chang, S. X. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil and Tillage Research*, v. 93, p. 77-86, 2007.
- Viana, E. T.; Batista, M. A.; Tormena, C. A.; Costa, A. D.; Inoue, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 2105-2114, 2011.
- Vicente, M. R.; Mantovani, E. C.; Fernandes, A. L. T.; Neves, J. C. L.; Delazari, F. T.; Figueredo, E. M. Efeitos da irrigação na produção e no desenvolvimento do cafeeiro na região oeste da Bahia. *Coffee Science*, Lavras, v. 12, p. 544 – 551, 2017.
- Vieira, G. H. S.; Mantovani, E. C.; Sedyama, G. C.; Delazari, F. T. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. *Bioscience Journal*, v. 30, p. 65-75, 2014.
- Wang, Q.; Lu, C.; Li, H.; He, J.; Sarker, K. K.; Rasaily, R. G.; Liang, Z.; Qiao, X.; Li, H.; Mchugh, A. D. J. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, v. 137, p. 43-49, 2014.

- Wang, X.; Wang, L.; Shangguan, Z. Leaf gas exchange and fluorescence of two winter wheat varieties in response to drought stress and nitrogen supply. *PloS one*, v. 11, p. e0165733, 2016.
- Waraich, E. A.; Ahmad, R.; Saifullah; Ahmad, A. Water stress and nitrogen management effects on gas exchange, water relations, and water use efficiency in wheat. *Journal of Plant Nutrition*, v. 34, p. 1867–1882, 2011.
- Yamulki, S.; Jarvis, S. Short-term effects of tillage and compaction on nitrous oxide, nitric oxide, nitrogen dioxide, methane and carbon dioxide fluxes from grassland. *Biology and Fertility of Soils*, v. 36, p. 224-231, 2002.
- Zhang, F. S.; Chen, X. P.; Vitousek, P. Chinese agriculture: An experiment for the world. *Nature*, v. 497, p. 22–35, 2013.
- Zhang, F. S.; Wang, J. Q.; Zhang, W. F.; Cui, Z. L.; Ma, W. Q.; Chen, X. P.; Jiang, R. F. Nitrogen use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, v. 45, p. 915–924, 2008.
- Živčák, M.; Olšovská, K.; Slamka, P.; Galambošová, J.; Rataj, V.; Shao, H. B.; Brestič, M. Application of chlorophyll fluorescence performance indices to assess the wheat photosynthetic functions influenced by nitrogen deficiency. *Plant Soil & Environment*, v. 60, p. 210–215, 2014.

CAPÍTULO II - FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E
SUBSOLAGEM

FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de relevância socioeconômica para o Brasil, tendo como principais fatores limitantes ao seu desenvolvimento o estresse hídrico e o déficit de N. Com o objetivo de identificar a função de produção que melhor se adequa as condições do experimento e estimar o máximo rendimento de açúcar e álcool na cana-de-açúcar cultivada com diferentes doses de N, lâminas de irrigação em solo sem e com subsolagem. Foi realizado um experimento em campo em uma cana soca na 4^o folha de cultivo. Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro lâminas de irrigação (0, 50, 100 e 150% da evapotranspiração da cultura) e 5 doses de N (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹), com as plantas cultivadas em solo com e sem subsolagem. As doses de nitrogênio e as lâminas foram arranjadas em faixas em condições sem e com subsolagem com delineamento em blocos, 5×4×2 com 3 repetições. A produtividade foi obtida através da pesagem total dos colmos com área útil (13,2 m²) no momento da colheita. A partir da função de produção foram determinadas a região de produção máxima, a taxa marginal de substituição e a região de produção racional. A partir da produtividade foram calculados os rendimentos de açúcar, álcool anidro e álcool hidratado. As lâminas e doses de N máximas encontrada foram de 2033 mm e 131 kg ha⁻¹ para o solo sem subsolagem e de 1729 mm e 137 kg ha⁻¹ para o solo com subsolagem com a respectivas produtividades de 125 e 127 Mg ha⁻¹, com a região de produção racional delimitada pelas regiões de produções máximas. Para o maior rendimento de açúcar e álcool a aplicação de insumos deve permanecer na região de produção racional até o mínimo de 80 kg h⁻¹ N e 1456 mm de água pois combinações menores de insumos diminuem o rendimento de açúcar e álcool.

Palavras-chave: função de rendimento; curva de isoproducto; *Saccharum officinarum*

FUNCTION OF PRODUCTION AND YIELD IN SUGAR CANE CULTIVATED UNDER DIFFERENT MANAGEMENT NUTRITIONAL AND WATER AND SUBSOLATION

ABSTRACT

The sugarcane is a culture of indisputable socioeconomic relevance for Brazil. IMg has as main limiting factors to its development water stress and N deficiency. Nitrogen is the main nutrient in sugarcane studies and adequate irrigation is fundamental for rationalizing water use and obtaining high yields. In order to identify the production function that best suits the conditions of the experiment and to estimate the maximum yield of sugar and alcohol in sugarcane cultivated with different doses of N, irrigation slides in soil with and without subsoiling, an experiment was carried out in the field on a cane soca in the 4th crop leaf. The treatments consisted of the application of four irrigation slides 0, 50, 100 and 150% of the ETC, and 5 doses of N; 0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹, with the plants cultivated in no subsoiled and subsoiled. Nitrogen doses and slides were arranged in strips under and without subsoiling with block design, 5x4x2 with 3 replicates. The productivity was obtained by total weighting of the stems of the useful area (13.2 m²) at the time of harvest. From the production function, the maximum production region, the marginal rate of substitution, and the region of rational production were determined. From the productivity the yields of standard sugar, anhydrous alcohol and hydrated alcohol were calculated. The leaf and maximum dose of N were 2033 mm and 131 kg ha⁻¹ for the no subsoiled soil and 1729 mm and 137 kg ha⁻¹ for the subsoiled soil with respective yields of 125 and 127 Mg ha⁻¹ and region of rational production delimited by regions of maximum production. For the higher yield of sugar and alcohol the application of inputs must remain in the region of rational production with a minimum of 80 kg h⁻¹ N and 1456 mm of water because smaller combinations of inputs decrease the yield of sugar and alcohol.

Keywords: yield function; isoproduct curve; *Saccharum officinarum*

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura que tem grande importância econômica no Brasil devido a grande produção de açúcar e etanol, representando mais de 5% das exportações nacionais e ocupando cerca de 10% da área utilizada para a produção agrícola (CONAB, 2018; MDIC, 2018). Na safra 2018/2019 estima-se que a área plantada de cana-de-açúcar seja de 10.095,4 mil ha, com produtividade de 71,32 t ha⁻¹ e produzindo 615.839,9 mil toneladas de colmos, resultando em 31.728,5 mil toneladas de açúcar e 21,6 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2018).

No Brasil a cana-de-açúcar é produzida principalmente em condições de sequeiro.

Desta forma, o estresse hídrico é o principal fator que prejudica a produção da cultura, principalmente em fase inicial de brotação e durante fase de crescimento vegetativo intenso (INMAN-BAMBER, 2004; BASNAYAKE et al., 2015).

Sendo assim, a irrigação adequada é de importância fundamental para a racionalização do uso de água, para obter alta produtividade, qualidade. para reduzir as perdas de nutrientes e, conseqüentemente, os custos. Vários pesquisadores já demonstraram a viabilidade técnica de irrigação para a cultura, resultando em consideráveis aumentos de produção (CARDOZO et al., 2016; DIAS e SENTELHAS et al., 2019; SILVA et al., 2019).

Além do déficit hídrico diversos outros fatores se destacam como limitantes da produção. O déficit de nitrogênio (N) é um desses fatores. O N é um nutriente essencial ao desenvolvimento das plantas e a baixa oferta desse nutriente afeta o desenvolvimento podendo diminuir a produção da cultura. Segundo Vale et al. (2013) o manejo inadequado da adubação nitrogenada nos canaviais pode levar à redução no rendimento e longevidade, diminuindo assim o número de cortes entre as reformas.

Outro fator que vem se destacando nos canaviais brasileiros como limitante da produção é a compactação do solo. O uso intenso de máquinas e implementos agrícolas são os principais causadores antrópicos dessa condição.

A compactação do solo interfere diretamente na disponibilidade de água e absorção de nutrientes pela planta. A compactação provoca menor desenvolvimento das raízes o que dificulta a absorção de água e nutrientes pela planta e promove o decréscimo do rendimento da cana soca (ALAMEDA et al., 2012; CHERUBIN et al., 2016).

A produção da cana-de-açúcar visa altas produtividades e rendimentos de açúcar e álcool, o que depende da quantidade de água aplicada, do manejo de irrigação combinado com a quantidade certa de adubação, da variedade, da idade do corte, do tipo de solo e do clima (DANTAS NETO et al., 2006). De qualquer forma o fornecimento de matéria prima de qualidade tecnológica a fim de propiciar extração econômica é uma das maiores necessidades da indústria sucroalcooleira (LEITE et al., 2011).

Para estimar a produtividade em função da variação de fatores ambientais pode-se utilizar uma função que descreva o comportamento dessas variáveis. Desta forma as funções de produção das culturas constituem fontes valiosas de informações a serem utilizadas nos modelos de tomada de decisão, permitindo a otimização do uso dos fatores envolvidos na produção.

Segundo Hexem e Heady (1978) e Heady e Dillon (1961), para obtenção da

função de produção, dez modelos estatísticos mostraram-se bastante satisfatórios a partir de pesquisas de campo para representar uma função de produção de uma cultura. Sendo escolhido dentre eles o que apresentar o maior ajuste estatístico.

Desta forma o trabalho teve como objetivo identificar através da função de produção as doses de N e lâminas de irrigação que permitem a maior produtividade e os maiores rendimentos de açúcar e álcool na cana-de-açúcar em uma 4ª folha de cultivo em solo sem e com subsolagem, com a utilização dos recursos da forma mais eficiente possível.

MATERIAIS E MÉTODOS

Instalação do experimento

O experimento foi realizado em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina - EECAC/UFRPE, com coordenadas 7° 51' 13'' S, 35° 14' 10'' W, a 180 m de altitude, em uma cana soca na 4ª folha de cultivo dando continuidade ao trabalho iniciado por (COSTA, 2016).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, conforme EMBRAPA (2013). Foi realizada a caracterização química (Tabela 1) e física (Tabela 2) do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm de acordo com Teixeira et al. (2017). O histórico de adubação da área encontra-se na Tabela 3.

Tabela 1 - Caracterização química do solo da área experimental.

| Análises químicas 4ª folha | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------|-------------|-------|---------------------|---|
| Camada | pH | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Al ⁺³ | H+Al | CTC | V | M | P |
| Cm | H ₂ O | -----Cmolc dm ⁻³ ----- | | | | | -----%----- | | mg dm ⁻³ | |
| 0-20 | 5,1 | 0,08 | 1,5 | 0,3 | 0,3 | 3,9 | 5,78 | 32,52 | 13,76 | 7 |
| 20-40 | 5,0 | 0,06 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 4,0 | 5,26 | 23,95 | 32,26 | 7 |

pH – Potencial hidrogeniônico em água; K⁺ - Potássio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg⁺³ – Magnésio; Al⁺³ – Alumínio; H+Al – Hidrogênio + Alumínio; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m- Saturação por alumínio; P – Fósforo.

Tabela 2 - Caracterização física do solo da área experimental.

| Análises físicas 4ª folha | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------|--|-----------------|------------------|-----------------|
| Camada | Ds ¹ | Ds ² | Areia | Silte | Argila | Θ _{CC} | Θ _{PMP} | Classe textural |
| (cm) | Mg m ⁻³ | Mg m ⁻³ | -----g kg ⁻¹ ----- | | ---m ⁻³ m ⁻³ --- | | | |
| 0-20 | 1,71 | 1,54 | 848,7 | 13,9 | 137,4 | 0,15 | 0,10 | Franco arenoso |
| 20-40 | 1,86 | 1,55 | 826,2 | 16,4 | 157,4 | 0,18 | 0,12 | Franco arenoso |

1 – Densidade do solo sem subsolagem; 2- Densidade do com subsolagem; Θ_{CC} – Umidade na capacidade de campo; Θ_{PMP} – Umidade no ponto de murcha permanente.

Tabela 3 - Manejo da adubação durante o cultivo da área.

| Folha | Adubação | | | | | | | | | |
|-------|--|-------|---|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| | P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹ | Fonte | K ₂ O kg ha ⁻¹ | Fonte | N0 kg ha ⁻¹ | N1 kg ha ⁻¹ | N2 kg ha ⁻¹ | N3 kg ha ⁻¹ | N4 kg ha ⁻¹ | Fonte |
| 1º | 30 | SFS | 60 | KCl | 0 | 20 | 40 | 80 | 120 | Ureia |
| 2º | 0 | ----- | 80 | KCl | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | Ureia |
| 3º | 0 | ----- | 80 | KCl | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | (NH ₄) ₂ SO ₄ |
| 4º* | 0 | ----- | 80 | KCl | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | (NH ₄) ₂ SO ₄ |

P₂O₅ – Óxido de fósforo; K₂O – Óxido de potássio; KCl -Cloreto de potássio; N – Nitrogênio; (NH₄)₂SO₄ – Sulfato de amônio; *A aplicação de N foi parcelada em duas vezes para doses ≥80 kg ha⁻¹, a primeira por ocasião do corte da 3º folha e a outra 30 dias depois.

Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro lâminas de irrigação (L) e cinco doses de nitrogênio (N) em solo com e sem subsolagem. As doses de nitrogênio foram N1 = 0; N2= 40; N3 = 80, dose padrão segundo Cavalcanti (2008); N4 = 120 e N5 =160 kg ha⁻¹. As lâminas totais de água aplicadas via irrigação foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura (ETC), sendo (L1, L2, L3 e L4) 0, 50, 100 e 150% da ETC respectivamente conforme a Tabela 4.

Foi utilizado um sistema de irrigação por aspersão em linha, “line source sprinkler system”. O sistema de irrigação por aspersão em linha foi descrito por Hanks et al. (1976), consiste em uma única linha de aspersores em campo sobrepostos. A disposição dos aspersores muito próximos em uma única linha permite uma sobreposição de jatos de água, proporcionando maior precipitação ao longo da linha lateral e um gradiente decrescente perpendicularmente ao tubo. Este sistema, desenvolvido para fins experimentais, permite a obtenção de diferentes níveis de água aplicados.

O sistema foi constituído de uma linha central com sete aspersores, espaçados a cada 15 m, sobre uma tubulação localizada no centro da área experimental. Os aspersores usados foram do tipo mini-canhão KS 1500 mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de 13,61 m³ h⁻¹ e 60 m de diâmetro molhado.

Tabela 4. Lâminas de irrigação e totais aplicadas no experimento.

| Lâmina | ETC % | Precipitação Mm | Lâmina aplicada Mm | Lâmina Total Mm |
|--------|----------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| L1 | 0 | 905 | 0 | 905 |
| L2 | 50 | 905 | 275 | 1180 |
| L3 | 100 | 905 | 551 | 1456 |
| L4 | 150 | 905 | 826 | 1731 |

No início do 3º ciclo de cultivo foi feita subsolagem em metade de cada parcela experimental a uma profundidade média de 50 cm, criando assim a condição subsolada e não subsolada que persistiu durante o 4º ciclo de cultivo.

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 33,0 m². A área útil correspondeu às três fileiras centrais descontando-se um metro de cada lado no sentido do comprimento, ficando com 4,0 m de comprimento, resultando em uma área útil de 13,2 m². De acordo com croqui da área experimental (Figura 1).

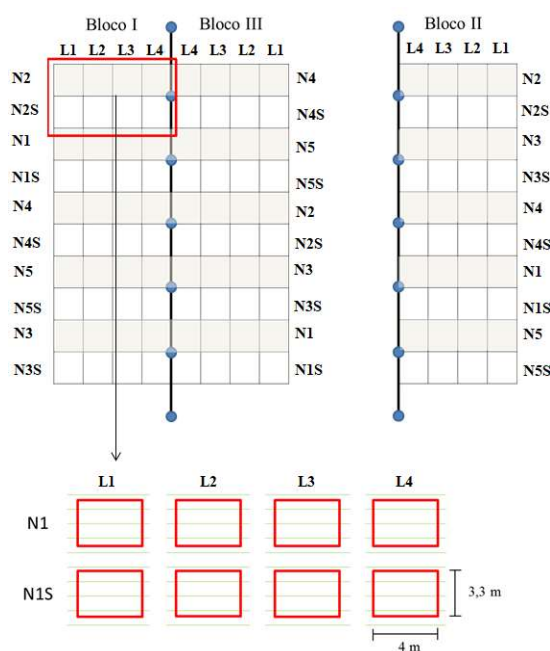


Figura 1. Croqui da área experimental com detalhamento da parcela experimental e os tratamentos. N1, N2, N3, N4 e N5 (0, 40, 80, 120, 160 kg ha⁻¹ respectivamente). L1, L2, L3 e L4 (0, 50, 100 e 150% da ETC). O S em frente ao nome do fator indica que o solo foi com subsolagem e a ausência de S indica o solo sem subsolagem.

A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB92579, cana-soca em 4º folha de cultivo.

As doses de nitrogênio e as lâminas foram arranjadas em faixas, em condições subsoladas e não subsoladas com delineamento em blocos, resultando em um experimento 5×4×2 com 3 repetições.

Manejo da irrigação

A evapotranspiração diária da cultura (ET_c - mm) foi calculada utilizando dados coletados em tanque classe A existente próximo à área de cultivo pela seguinte equação:

$$ETC = ECA \times Kp \times Kc \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

ECA é a evaporação do tanque Classe A, mm;

Kp é o coeficiente do tanque Classe A;

Kc é o coeficiente de cultura.

O valor de Kp foi obtido a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa fornecidos por uma estação meteorológica local, e evaporação do tanque classe A utilizado os valores recomendados por Doorenbos e Kassam (1994).

O Kc utilizado foi o recomendado também por Doorenbos e Kassam (1994) (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de Kc para cana-soca.

| Idade da Cana (Meses) | Período de desenvolvimento | Kc |
|--------------------------|-------------------------------|------|
| 0-1 | Do plantio a 25% de cobertura | 0,55 |
| 1-2 | De 25 a 50% de cobertura | 0,80 |
| 2-2,5 | De 50 a 75% de cobertura | 0,90 |
| 2,5-4 | De 75% a cobertura completa | 1,00 |
| 4-10 | Cobertura total do solo | 1,05 |
| 10-11 | Início da Maturação | 0,80 |
| 11-12 | Maturação | 0,60 |

A Figura 2 apresenta os dados de precipitação e lâmina de irrigação durante o período de experimento.

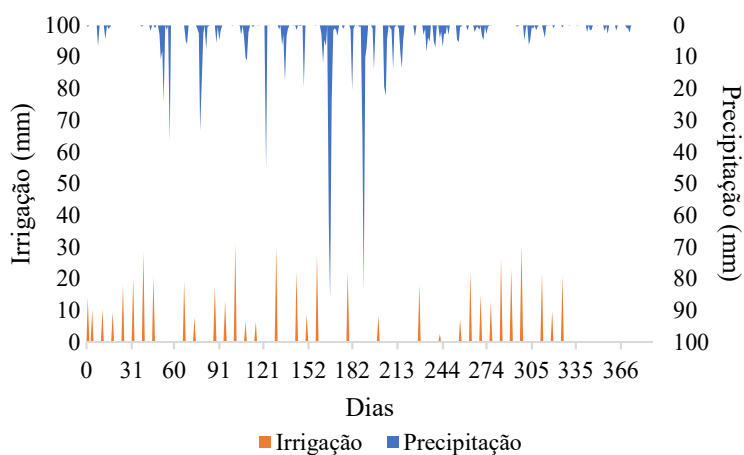


Figura 2 - Precipitação e lâmina de irrigação aplicada durante o experimento.

Produtividade

A produtividade foi obtida por meio da pesagem dos colmos da área útil com o auxílio de um dinamômetro analógico da marca Crown BR (Oswaldo Filizola, Ltda.) com capacidade para pesar até 1000 kg e os valores expressos em Mg ha⁻¹.

Rendimento de açúcar e álcool

Foram estimados os rendimentos de açúcar standard e álcool anidro utilizando-se os rendimentos estequiométricos dos processos que resultam nestes dois produtos em função do ART (açúcar redutores totais). Seguindo as relações a seguir segundo Fernandes (2011).

$$1,0000 \text{ açúcar Standard} = 1,0526 \text{ kgs de ART}$$

$$1,0000 \text{ álcool Anidro} = 1,7160 \text{ kgs de ART}$$

$$1,0000 \text{ álcool Hidratado} = 1,64736 \text{ kgs de ART}$$

Função de produção

Os fatores de produção água (L) e nitrogênio (N) constituíram as variáveis independentes e a produtividade da cultura (Y) a variável dependente. Para obtenção da função de produção, foram testados dez modelos estatísticos que, de acordo com Hexem e Heady (1978) e Heady e Dillon (1961), mostraram-se bastante satisfatórios a partir de pesquisas de campo para representar uma função de produção de uma cultura.

Dentre estes modelos, foi escolhido aquele que melhor se ajustou aos dados do experimento, tendo em vista os coeficientes de determinação r^2 , o valor do teste F da análise de variância para todos os coeficientes, o erro padrão e os sinais das variáveis dos modelos analisados. Os modelos estatísticos testados foram:

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^{0,5} + X_4.N^{0,5} + X_5.N^{0,5}.L^{0,5} \quad \text{Eq. 1}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^{0,5} + X_4.N^{0,5} + X_5.N.L \quad \text{Eq. 2}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^{0,5} + X_4.N^{0,5} \quad \text{Eq. 3}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^2 + X_4.N^2 + X_5.L.N \quad \text{Eq. 4}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^2 + X_4.N^2 \quad \text{Eq. 5}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^{1,5} + X_4.N^{1,5} + X_5.L.N \quad \text{Eq. 6}$$

$$Z = X_0 + X_1.L + X_2.N - X_3.L^{1,5} - X_4.N^{1,5} \quad \text{Eq. 7}$$

$$Z = X0 + X1.L - X2.L^2 - X3.N^2 \quad \text{Eq. 8}$$

$$Z = X1.L + X2.N - X3.L^2 - X4.N^2 + X5.L.N \quad \text{Eq. 9}$$

$$Z = X1.L + X2.N - X3.L^2 - X4.N^2 \quad \text{Eq. 10}$$

Região de produção máxima

Os valores das variáveis independentes, L e N que maximizam a produção foram obtidos derivando-se a equação que melhor se ajustou aos dados do experimento em relação a cada fator estudado e igualando-se a zero (Equações 11 e 12).

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial N} = 0 \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$\frac{\partial Z}{\partial L}$ = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (L);

$\frac{\partial Z}{\partial N}$ = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (N);

Taxa marginal de substituição técnica

A taxa marginal de substituição (TMS) que corresponde a quantidade do fator lâmina que pode ser substituído pelo fator nitrogênio, mantendo o mesmo nível de produtividade foi obtida pela relação entre a derivada primeira da função de produção em relação ao fator lâmina e a derivada primeira da função de produção em relação ao fator nitrogênio (Equação 13).

$$TMS = - \frac{\frac{\partial Z}{\partial N}}{\frac{\partial Z}{\partial L}} \quad \text{Eq. 13}$$

Isoquantas e região de produção racional

A partir da função de produção foram determinadas as isoquantas, plotando-se os dados de lâminas de água e doses de nitrogênio em função das produtividades previamente fixadas em um gráfico de duas dimensões. O ponto de cada isoquanta em que a taxa marginal de substituição é nula ou infinita delimita a região de produção racional.

Análise estatística

Para o rendimento de açúcar standard, álcool anidro e álcool hidratado foi realizado o teste F e aplicado teste de Tukey para as interações significativas ($P < 0,05$) com o Software Sisvar (FERREIRA et al., 1998).

Para os parâmetros dos modelos que descrevem as funções de produção foi realizado o teste F, cálculo do R^2 , cálculo do erro padrão e análise dos sinais das funções. A análise estatística foi realizada utilizando o Software Statistica 10 (STATSOFT, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Função de produção

Depois de realizadas a análise dos parâmetros dos 10 modelos que descrevem o comportamento da função de produção, apenas os modelos 9 e 10 apresentaram todos os parâmetros significativos pelo teste F ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,69; o que garante um bom ajuste e explicação da variância nos solos com e sem subsolagem. Para representar o comportamento da produtividade em ambos os casos foi escolhida a equação 10, por possuir também o menor erro padrão em ambos os casos.

A função de produção descreve o comportamento da produtividade em função da dose de N (kg ha^{-1}) e da lâmina total (precipitação + irrigação) no cultivo da cana-de-açúcar. Na Figura 3 observa-se o comportamento da função de produção para o solo não subsolado conforme descrito na equação 14.

$$\text{TCH} = 0,086411L + 0,562707N - 0,000021L^2 - 0,002148N^2 \quad \text{Eq. 14}$$

Na Figura 3A observa-se de forma clara que a medida que a dose de N e a lâmina total aumentam a produtividade também crescer até chegar a um ponto de máxima. Segundo Singh e Brar (2015) a cana-de-açúcar responde bem a irrigação, o que proporciona um aumento de produtividade.

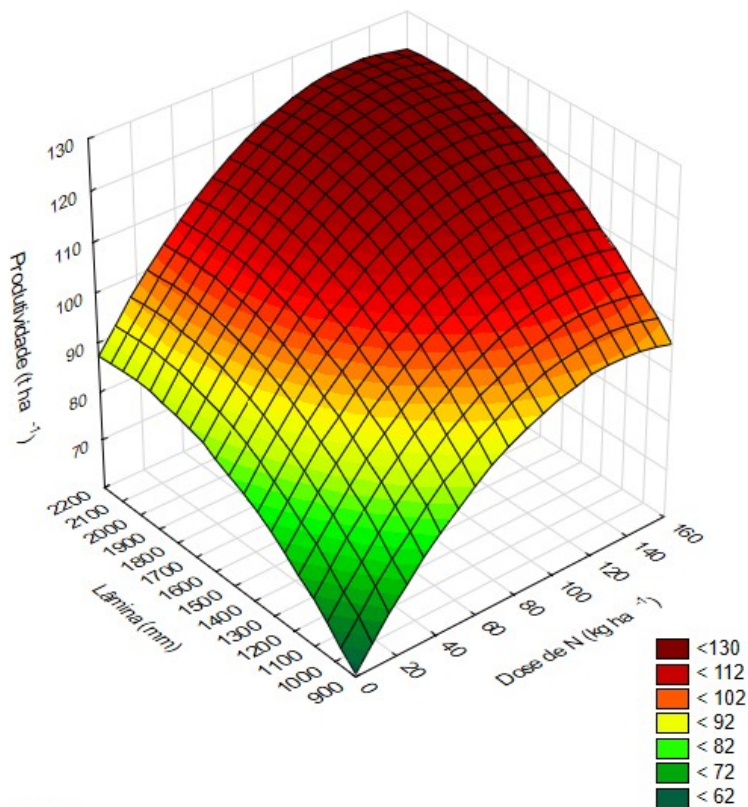
As isoquantas que descrevem a relação entre a lâmina e a dose de N podem ser observadas na Figura 3B. As isoquantas são curvas onde o fator dependente, no caso a produtividade, permanece constante enquanto se varia os outros fatores independentes. Utilizando essas isoquantas é possível mensurar a relação entre as doses de N e as lâminas totais para alcançar a produtividade desejável.

A produção máxima para a função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado foi obtida igualando-se a 0 as derivadas parciais da função de conforme as equações 15 e 16.

$$\frac{\partial Z}{\partial N} = 0,562707 - 4,296 * 10^{-3}N = 0 \quad \text{Eq.15}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = 0,086411 - 4,2 * 10^{-5}L = 0 \quad \text{Eq.16}$$

A



B

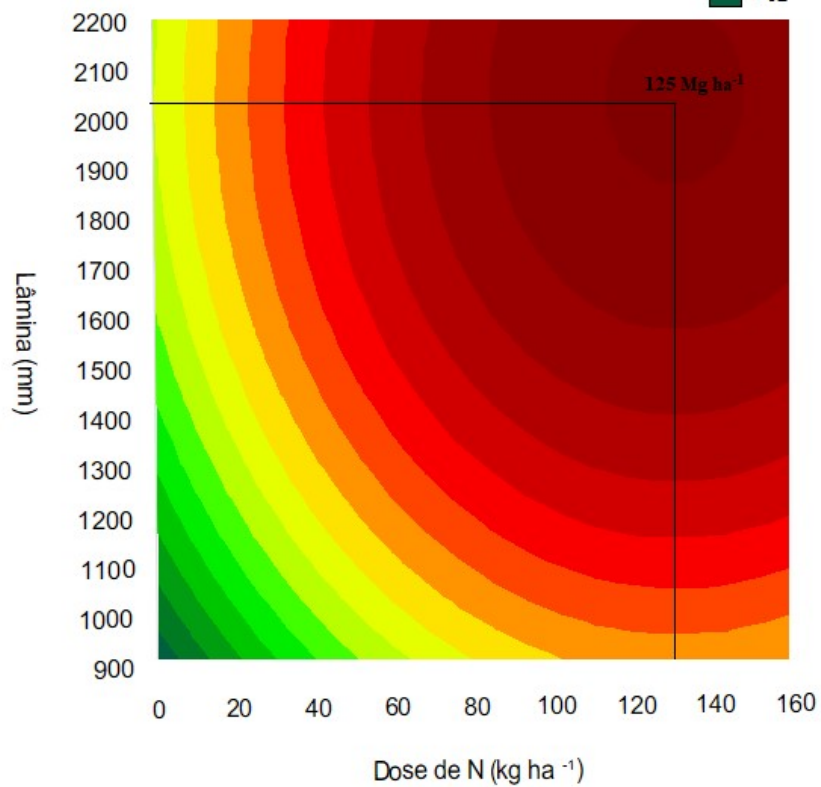


Figura 3. Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado.

Desta forma a produtividade máxima encontrada foi de 125 Mg ha⁻¹, obtidas a parti da combinação da lâmina de 2033 mm com a dose de 131 kg ha⁻¹ de N, encontradas na resolução das equações 14 e 15. A lâmina total da produtividade máxima foi 40% superior a lâmina de 100% da ETC (1456 mm), considerada a padrão. Para a dose de N o aumento em relação a dose padrão (80 kg ha⁻¹) superou os 60%.

Analisando através da equação que descreve a função de produção o tratamento que recebeu 80 kg de N ha⁻¹ (dose padrão) com a lâmina de 100% da ETC (N3L3) encontra-se uma produtividade de 112 Mg ha⁻¹. A máxima produtividade alcançada supera em 12% esse valor.

O menor valor da produtividade alcançada combinando-se a lâmina (0% ETC – 905 mm) e dose (0 kg ha⁻¹) foi de 64 Mg ha⁻¹. Temos então um aumento de 95% quando alcançamos a produtividade máxima. De acordo com Silva et al. (2010), um canavial economicamente produtivo deve ser conduzido por no mínimo cinco a seis cortes ou até quando a produtividade média for próxima a 65 Mg ha⁻¹.

A taxa marginal de substituição (TMS) para o solo não subsolado é apresentada na Tabela 6. A TMS mostra quanto pode-se substituir da lâmina (mm) por kg de N mantendo-se a mesma produtividade.

A TMS negativa indica que a água está sendo substituída pelo nitrogênio em proporções decrescentes. A partir do momento que a TMS é positiva a água passa a ser substituída por nitrogênio em quantidades crescentes, sendo então a substituição antieconômica.

A análise da Tabela 6 permite uma série de combinação de cenários para obtenção das mais diversas produtividades garantindo o manejo adequado das lâminas e das doses de N.

A TMS reforça a importância de um manejo adequado da irrigação e da adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar. Segundo Vale et al. (2013) o manejo inadequado da adubação nitrogenada nos canaviais pode levar à redução no rendimento e longevidade das culturas, diminuindo assim o número de cortes entre as reformas.

Observando a produtividade de 110 Mg ha⁻¹, o mais próximo do obtido em N3L3 (80 kg de N ha⁻¹ e lâmina de 1456 mm), observa-se que a menor dose de N aplicada para obtenção dessa produtividade é de 50 kg combinada com uma lâmina de 1810 mm, com uma TMS de -46,53, ou seja, para manter a mesma produtividade o acréscimo de um kg de N é seguido do decréscimo de 46,53 mm.

Tabela 6. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 70, 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha⁻¹ em solo não subsolado.

| N (kg ha ⁻¹) | 70 Mg ha ⁻¹ | | 80 Mg ha ⁻¹ | | 90 Mg ha ⁻¹ | | 100 Mg ha ⁻¹ | | 110 Mg ha ⁻¹ | | 120 Mg ha ⁻¹ | |
|--------------------------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | L (mm) | | L (mm) | | L (mm) | | L (mm) | | L (mm) | | L (mm) | |
| 10 | 986 | -11,68 | 1241 | -15,46 | 1639 | -31,02 | | | | | | |
| 20 | | | 1107 | -12,11 | 1412 | -18,06 | | | | | | |
| 30 | | | 997 | -9,85 | 1256 | -13,13 | 1672 | -28,75 | | | | |
| 40 | | | | | 1140 | -10,30 | 1461 | -16,07 | | | | |
| 50 | | | | | 1049 | -8,32 | 1327 | -11,59 | 1857 | -46,43 | | |
| 60 | | | | | 974 | -6,77 | 1225 | -8,88 | 1606 | -16,79 | | |
| 70 | | | | | | | 1147 | -6,95 | 1470 | -10,94 | | |
| 80 | | | | | | | 1086 | -5,44 | 1380 | -7,89 | | |
| 90 | | | | | | | 1038 | -4,16 | 1310 | -5,73 | 1810 | -18,55 |
| 100 | | | | | | | 1001 | -3,03 | 1261 | -4,05 | 1679 | -8,84 |
| 110 | | | | | | | 975 | -2,00 | 1230 | -2,64 | 1615 | -5,07 |
| 120 | | | | | | | 960 | -1,03 | 1209 | -1,34 | 1575 | -2,42 |
| 130 | | | | | | | 955 | -0,09 | 1202 | -0,12 | 1561 | -0,21 |
| 140 | | | | | | | 960 | 0,85 | 1208 | 1,11 | 1570 | 1,97 |
| 150 | | | | | | | 972 | 1,81 | 1225 | 2,38 | 1605 | 4,49 |
| 160 | | | | | | | 995 | 2,83 | 1255 | 3,77 | 1666 | 7,99 |

Nesta mesma produtividade de 110 Mg ha⁻¹ acima da dose de N de 140 kg ha⁻¹ é antieconômico substituir o fator lâmina (mm) por kg de N pois a partir daí a TMS é positiva. Um TMS de 1,11 indica que para cada kg de N acrescentado acrescenta-se também 1,11 mm de água para manter-se a mesma produtividade.

Percebe-se que o fator de água pode ser substituído pelo fator nitrogênio até certo ponto permitindo obter a mesma produtividade após o qual o volume de água aplicado ultrapassa a área de produção racional (LEITE et al., 2013).

Na Figura 3B observando as isoquantas identifica-se a região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar para este estudo. Dada a função de produção escolhida as lâminas de água e as doses de N que delimitam a região de produção racional correspondem aos mesmos valores que combinados resultam na produção máxima. Nessa região a TMS é nula ou infinita. A lâmina e a dose de N são respectivamente 2033 mm e 131 kg ha⁻¹.

Na Figura 4 é observa-se o comportamento da função de produção para o solo subsolado conforme descrita na equação 17.

$$\text{TCH sub} = 0,110317L + 0,458228N - 0,000032L^2 - 0,001661N^2 \quad \text{Eq.17}$$

Na Figura 4A observa-se o comportamento da produtividade em função da dose de N e da lâmina. Novamente, a produtividade cresce com ao aumento dos outros fatores até atingir um ponto de máxima. Nas isoquantas (4B) a região de produção máxima foi formada pela combinação da lâmina de 1729 mm com a dose de 137 kg ha⁻¹ de N alcançando uma produtividade de 127 Mg ha⁻¹ obtidas através das equações 18 e 19.

$$\frac{\partial Z}{\partial N} = 0,458228 - 3,322 * 10^{-3}N = 0 \quad \text{Eq.18}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = 0,110317 - 6,4 * 10^{-5}L = 0 \quad \text{Eq.19}$$

Analisando o tratamento que recebeu 80 kg de N ha⁻¹ (dose padrão) com a lâmina de 100% da ETC (N3L3) encontra-se uma produtividade de 118 Mg ha⁻¹. A máxima produtividade alcançada foi apenas, aproximadamente, 8% superior a produtividade com as doses padrões. A lâmina de irrigação encontrada foi 18% superior a lâmina de 100% da ETC, enquanto para a dose de N o aumento foi de 71%.

Nas duas condições de solo encontra-se valores de produtividade para N3L3 próximas as produtividades máximas. Segundo Roberts et al. (2008) lâminas altas com doses altas de N tem grande potencial de perdas, principalmente por meio da lixiviação. Mendonça et al. (2018) cultivando cana-de-açúcar em Minas Gerais também encontraram produtividades elevadas com aplicação de 80 kg ha⁻¹ suprimindo a ETC da cultura.

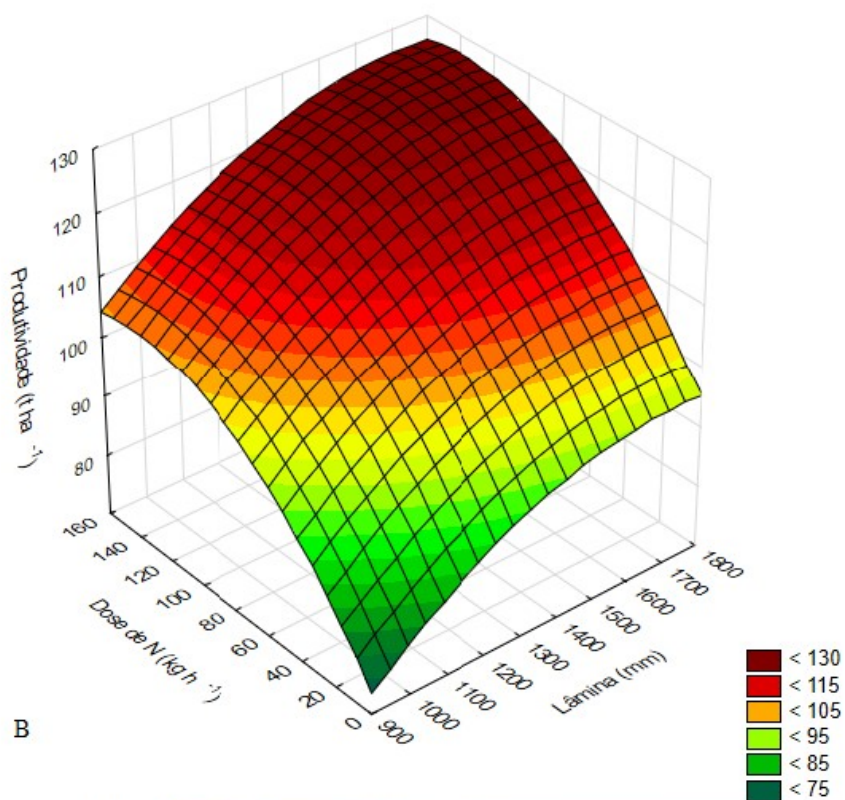
O menor valor de produtividade 74 Mg ha⁻¹ foi obtida na lâmina (0% ETC) e dose (0 kg ha⁻¹). A produtividade máxima representa um aumento de aproximadamente 70% em relação ao menor valor encontrado. Esse valor é superior aos 59,73 Mg ha⁻¹ encontrados por Costa et al. (2016) na cana-planta deste mesmo experimento para a mesma dose de N e aplicação de 0% da ETC.

Na Figura 4B os valores que combinados resultam na produtividade máxima, também delimitam a região de produção racional igualmente no solo não subsolado.

Na Tabela 7 é apresentada a TMS para o solo subsolado, onde uma grande variedade de cenários pode serem observados.

Analisando a produtividade de 120 Mg ha⁻¹, o mais próximo do obtido em N3L3 (80 kg de N ha⁻¹ e lâmina de 1456 mm) vemos que a menor dose de N aplicada para obtenção dessa produtividade é a mesma usada no tratamento N3L3.

A



B

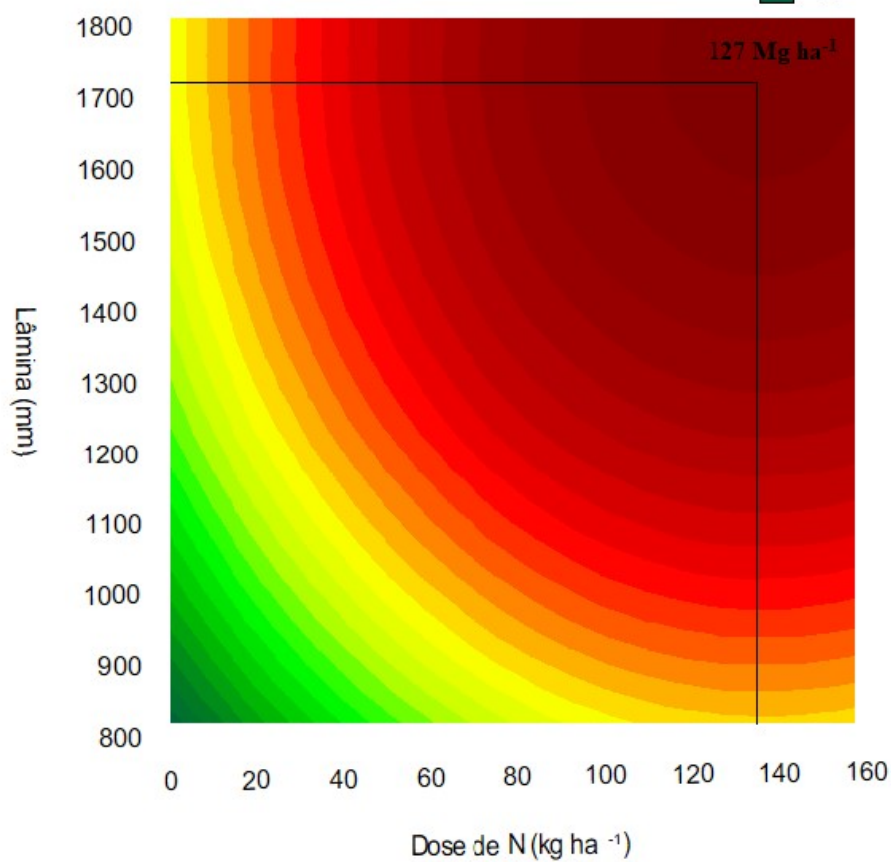


Figura 4. Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo subsolado.

Analisando a TMS (Tabela 7) observa-se que a menor produtividade economicamente viável encontrada foi de 80 Mg ha⁻¹ e a maior foi de 120 Mg ha⁻¹ com uma dose de N não superior a 130 kg ha⁻¹. Abaixo de 80 e acima de 120 Mg ha⁻¹ a TMS fica positiva indicando doses crescentes dos dois recursos para aumento ou manutenção da produtividade.

Tabela 7. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha⁻¹ em solo subsolado.

| N (kg ha ⁻¹) | 80 Mg ha ⁻¹ | | 90 Mg ha ⁻¹ | | 100 Mg ha ⁻¹ | | 110 Mg ha ⁻¹ | | 120 Mg ha ⁻¹ | |
|--------------------------|------------------------|--------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | L (mm) | |
| 10 | 1030 | -10,28 | 1170 | -11,92 | 1639 | -74,28 | | | | |
| 20 | | | 1070 | -9,32 | 1403 | -18,85 | | | | |
| 30 | | | 980 | -7,50 | 1256 | -11,89 | | | | |
| 40 | | | | | 1150 | -8,81 | 1550 | -28,53 | | |
| 50 | | | | | 1060 | -6,85 | 1349 | -12,06 | | |
| 60 | | | | | 995 | -5,53 | 1249 | -8,46 | | |
| 70 | | | | | 951 | -4,55 | 1200 | -6,69 | | |
| 80 | | | | | | | 1140 | -5,12 | 1456 | -13,19 |
| 90 | | | | | | | 1080 | -3,85 | 1400 | -7,59 |
| 100 | | | | | | | 1050 | -2,91 | 1350 | -5,21 |
| 110 | | | | | | | 1020 | -2,05 | 1290 | -3,31 |
| 120 | | | | | | | 1010 | -1,30 | 1270 | -2,03 |
| 130 | | | | | | | 1000 | -0,57 | 1250 | 0,86 |
| 140 | | | | | | | 1000 | 0,15 | 1250 | 0,23 |
| 150 | | | | | | | 1000 | 0,86 | 1260 | 1,34 |
| 160 | | | | | | | 1010 | 1,6 | 1280 | 2,56 |

Comparando o solo sem e com subsolagem observa-se que as produtividades de 125 e 127 Mg ha⁻¹ para o solo sem e com subsolagem respectivamente são bastante próximas, o que acontece quando comparadas as doses de N; 131 e 137 kg ha⁻¹ também para os solos sem e com subsolagem. Quando comparadas as lâminas que combinadas com a dose de N alcançam essas produtividades essa diferença aumenta bastante. Quase 18% entre as lâminas aplicadas, uma diferença de 304 mm.

Esses valores são inferiores a produtividade obtida por Costa et al. (2016) na cana-planta para o mesmo experimento (170 Mg ha⁻¹).

A condição de solo não subsolado resultou em uma maior lâmina para alcançar a máxima produtividade. Segundo Alameda et al. (2012) a compactação do solo provoca menor desenvolvimento das raízes o que dificulta a absorção de água e nutrientes pela planta.

Segundo Cherubin et al. (2016) o aumento da compactação do solo promove decréscimo do potencial de rendimento na quarta e quinta soca. Assim, é fundamental a utilização de práticas que reduzam a compactação do solo, como a subsolagem, e minimizem os danos na estrutura do solo que prejudicam a absorção de água e nutrientes e promove a diminuição do rendimento da cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2014).

Fatores como genótipo, idade das plantas, região de cultivo além dos estudados podem influenciar a produtividade da cana-de-açúcar, por isso na literatura encontramos diversos valores de produtividades.

Cardoso et al. (2016) relatou que a produtividade média da cana-de-açúcar irrigada no Brasil pode atingir valores maiores que 140 Mg ha⁻¹. Silveira et al. (2002) encontraram produtividades entre 122 e 151 Mg ha⁻¹ com aplicação de fertilizantes convencionais em regime de irrigação. Assim como os valores encontrados neste estudo em condições de irrigação, esses valores são superiores a produtividade média do Brasil, que é de 73,73 kg ha⁻¹ segundo a CONAB (2018), resultando no entendimento de que vale a pena irrigar e adubar a cana-de-açúcar de forma eficiente.

Rendimento de açúcar e álcool

Segundo Moraes et al. (2016) é importante que se conheça e entenda as correlações existentes entre os atributos produtivos e os tecnológicos da planta com os do solo, de forma a contribuir não apenas com a redução dos custos, mas também como forma de proporcionar o aumento da produtividade da cultura e da qualidade do material colhido.

O entendimento da interação entre os fatores que limitam a produtividade é de suma importância para a indústria sucroalcooleira, pois assim podemos identificar o manejo adequado para alcançar os maiores rendimentos.

Na Tabela 8 é apresentada a análise de variância para o rendimento de açúcar (Aç), álcool anidro (AA) e Álcool hidratado (Ah).

Na Figura 5 são apresentadas as análises dos desdobramentos das interações. entre as doses de N e as lâminas e entre as lâminas e o solo sem e com subsolagem.

Na Figura 5A, 5C e 5E podem ser observados o desdobramento das doses de N dentro de cada lâmina e das lâminas dentro de cada dose de N para o açúcar standard, álcool anidro e álcool hidratado respectivamente.

Tabela 8. Resumo da ANOVA do rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N).

| Fv | GL | QM AÇ | QM AA | QM AH | F |
|--------|-------|--------|-------|-------|----------|
| Bloco | 2 | 5,58 | 2,10 | 2,28 | 0,36ns |
| N | 4 | 118,24 | 44,49 | 48,27 | 7,70** |
| erro 1 | 8 | 15,34 | 5,77 | 6,26 | |
| L | 3 | 139,58 | 52,52 | 56,99 | 6,43* |
| erro 2 | 6 | 21,70 | 8,16 | 8,86 | |
| Sub | 1 | 155,10 | 58,36 | 63,32 | 206,14** |
| erro 3 | 2 | 0,75 | 0,28 | 0,30 | |
| NxL | 12 | 15,34 | 5,77 | 6,26 | 2,93* |
| NxS | 4 | 13,46 | 5,07 | 5,50 | 2,57ns |
| LxS | 3 | 16,02 | 6,03 | 6,54 | 3,06* |
| NxLxS | 12 | 90,06 | 3,41 | 3,70 | 1,73ns |
| erro 4 | 23 | 5,22 | 1,97 | 2,13 | |
| Total | 119 | | | | |
| CV 1% | 23,51 | | | | |
| CV 2% | 27,97 | | | | |
| CV 3% | 5,21 | | | | |

O maior valor encontrado de rendimento de açúcar, álcool anidro e álcool hidratado ocorreu na interação entre a lâmina de 1732 mm com a dose de 80 kg de N ha⁻¹. Com exceção da dose 0 kg ha⁻¹, cujo rendimento de açúcar foi menor para 1732 mm.

A lâmina de 905 mm dentro de todas as doses também apresentou rendimentos baixos que só se diferenciaram na dose de 160 kg de N ha⁻¹. Onde a falta de água foi compensada por uma maior oferta de N.

A menor lâmina não foi suficiente para suprir todas as necessidades da planta, o que provocou a queda de rendimento. A deficiência hídrica não se limita apenas às regiões áridas e semiáridas do mundo, em regiões consideradas úmidas a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o desenvolvimento e prejudicar a produtividade das culturas (SILVA et al., 2014).

O estresse hídrico afeta a planta de várias formas. A planta fecha os estômatos para diminuir a perda de água e acaba absorvendo menos CO₂ que seria usado na fotossíntese ocasionando diminuição da fotossíntese líquida. Somados aos efeitos na fase bioquímica da fotossíntese existem os danos aos fotossistemas responsáveis pela captura do fóton de luz, o que diminui também o desempenho da fase fotoquímica.

A falta de água também dificulta a absorção de nutrientes e esses efeitos somados resultam na diminuição de produtividade e rendimento de açúcar e álcool. Segundo

Bastos et al. (2016) a água interage com N, de modo a influenciar o total de açúcar recuperável.

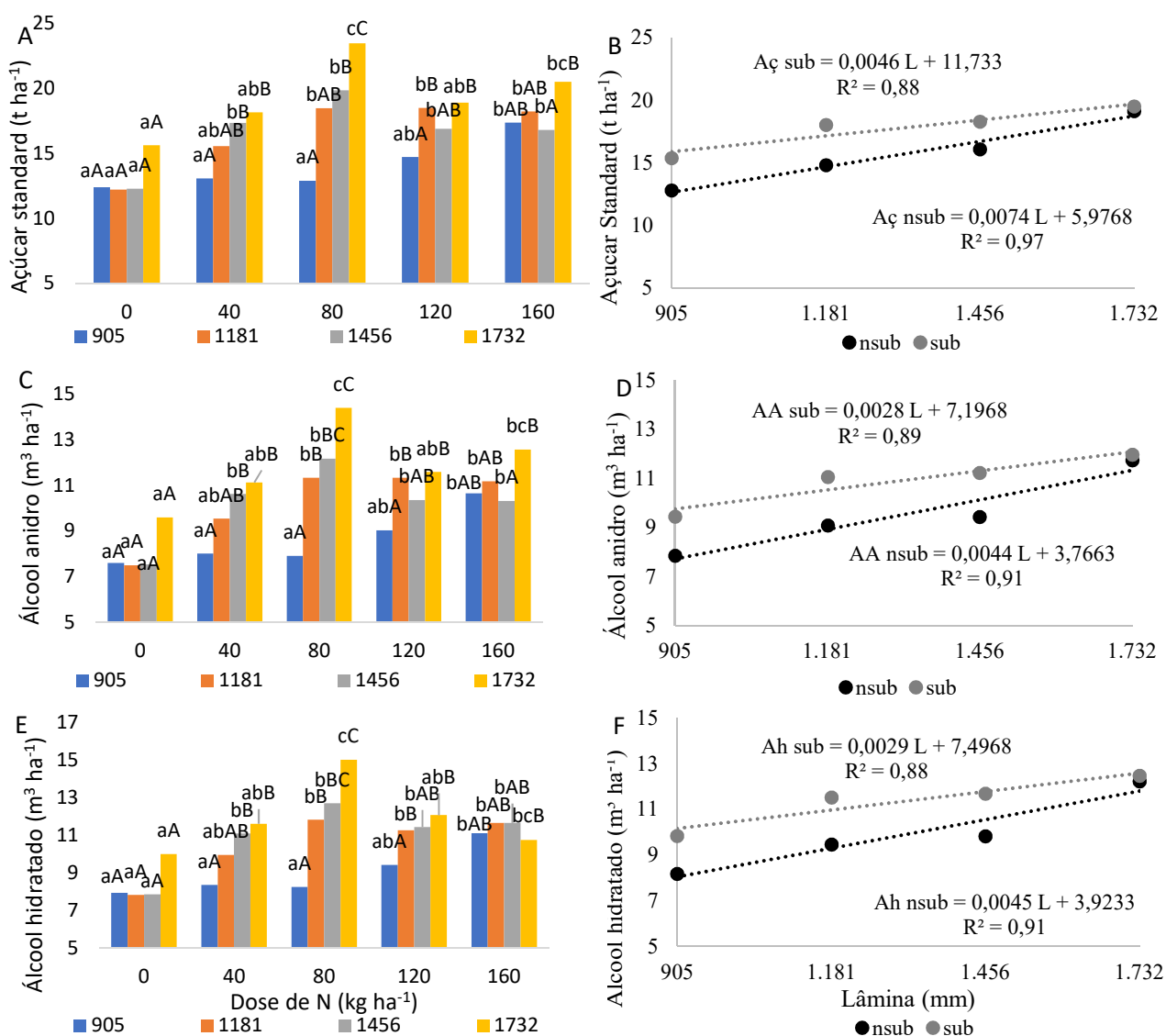


Figura 5. Desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas (A, C e E) e entre as lâminas e o solo não subsolado (nsub) e subsolado (sub) (B, D, F) para o rendimento de açúcar standard (Aç), álcool anidro (AA) e Álcool hidratado (Ah). Letras minúsculas para o desdobramento das lâminas dentro de cada dose e letras maiúsculas para o desdobramento das doses dentro de cada lâmina.

A falta de N também desempenha seu papel nos menores rendimentos encontrados. O N participa da composição de diversas moléculas na planta e a baixa disponibilidade desse nutriente provoca diminuição do crescimento, área foliar e menores teores de pigmentos fotossintéticos. Segundo Rhein et al. (2016) a produtividade e o rendimento açúcar aumentam linearmente com o incremento das doses de nitrogênio aplicadas.

Na Figura 5B pode ser observada o desdobramento da dose de N para os solos sem e com subsolagem para o rendimento açúcar standard. Quanto maior a lâmina de irrigação maior o rendimento de açúcar. Além disso o solo subsolado apresentou maiores rendimentos em relação ao solo não subsolado. Um aumento médio de 13% no rendimento de açúcar.

Aplicando-se as lâminas máximas nas equações que descrevem o comportamento do rendimento de açúcar encontramos 19,7 e 18,79 t de açúcar ha⁻¹ para o solo com e sem subsolagem respectivamente. Isso representa um aumento de aproximadamente 5% nos rendimentos para o solo subsolado. Comparando-se os rendimentos de açúcar para 1456 mm (100% da ETC) essa diferença aumenta para aproximadamente 10% com 18,43 e 16,75 Mg ha⁻¹ para o solo com e sem subsolagem respectivamente.

O desdobramento do rendimento de álcool anidro em função da lâmina total no solo com e sem subsolagem pode ser observado na Figura 5D. O solo subsolado na lâmina máxima apresentou um rendimento de 12,04 m³ ha⁻¹ enquanto no solo não subsolado o rendimento foi de 11,37 m³ ha⁻¹, uma diferença de 6% entre si. Para o álcool hidratado (Figura 5F) os rendimentos nas lâminas máximas foram 11,71 m³ ha⁻¹ e 13,07 m³ ha⁻¹, resultando em aproximadamente 12% de diferença entre os solos. Notadamente essas diferenças se alteram quanto menor a lâmina aplicada, chegando a uma diferença média de 15% em ambos os casos.

CONCLUSÃO

A subsolagem do solo proporcionou uma menor aplicação de água em relação ao solo não subsolado para obtenção de produtividades semelhantes.

Doses de N entre 80 a 160 kg ha⁻¹ e lâminas totais entre 1456 e 1731 mm proporcionam os maiores rendimentos de açúcar e álcool.

As combinações de doses de N e lâminas escolhidas para alcançar determinadas produtividades ou rendimentos de açúcar e álcool devem se encontrar dentro da região de produção racional.

BIBLIOGRAFIA

Alameda, N. P. R. D.; Anten, R. V. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil e Tillage Research*, v. 120, p. 121-129, 2012.

- Basnayake, J.; Jackson, P. A.; Inman-Bamber, N. G.; Lakshmanan, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. *Journal of experimental botany*, v. 66, p. 3945–3958, 2015.
- Bastos, A. V. S.; Silva, M. V.; Silva, E. C.; Teixeira, M. B.; Muraoka, T.; Soares, F. A. L.; Coelho, R. D. Agroindustrial yield of sugarcane grown under different levels of water replacement and nitrogen fertilization. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p. 2623-2629, 2016.
- Cardozo, N. P.; Bordonal, R. O.; Scala Jr, N. L. Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3988-3997, 2016.
- Cavalcanti, F. J. de A. (Coord.). *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2a. aproximação*. 2 ed. rev. Recife: IPA, 2008. 212 p.
- Cherubin, M. R.; Karlen, D. L.; Cerri, C. E. P.; Franco, A. L. C.; Tormena, C. A.; Davies, C. A.; Cerri, C. A. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil *PLoS One*, v. 11, p. 1-26, 2016.
- CONAB. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*, v. 5 – Safra 2018/19, n.3– terceiro Levantamento, Brasília, 2018. 75 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em 24 jan. 2019.
- Costa, A. R. F. C.; Rolim, M. M.; Bonfim-Silva, E. M.; Neto, D. E. S.; Pedrosa, E. R. M. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, v. 10, p. 362, 2016
- Dantas Neto, J.; Figueredo, J. L. C.; Farias, C. H. A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.283-288, 2006.
- Dias, H. B.; Sentelhas, P. C. Dimensioning the Impact of Irrigation on Sugarcane Yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, p. 29-37, 2019.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.
- Embrapa. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3ª ed. Rio de Janeiro; 2013. 353p.
- Fernandes, A. C. *Cálculos na Agroindústria da Cana-de-Açúcar - 3ª Edição*. Picacicaba, STAB. 2011, 416p.
- Ferreira, D. F. *Sisvar – sistema de análise de variância para dados balanceados*. Lavras: UFLA, 1998, 19p.

- Hanks, R. J.; Keller, J.; Rasmussen, V. P.; Wilson, G. D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. *Soil science Society of American Journal*, v. 40, p. 426-429, 1976.
- Heady, E. O.; Dillon, J. L. *Agricultural Production Functions*. Iowa State University Press: Ames, IA, 1961, 73 p.
- Hexem, R. W.; Heady, E. O. *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*. Iowa State University Press, 1978, 460 p.
- Inman-Bamber, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field crops research*, v. 89, p. 107–122, 2004.
- Leite, G. H. P.; Crusciol, C. A. C.; Silva, M. A. Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 32, p. 129-138, 2011.
- Leite, K. N.; Costa, R. N. T.; Crisótomo, J. R.; Frizonne, J. A.; Marinho, A. B.; Economic analysis of cashew early dwarf crop BRS – 189 depending on water levels and doses of potassium fertilization. *Engenharia Agrícola*, v.33, p.739- 747, 2013.
- MDIC, 2018. Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços. *Exportação Brasileira (2018)*. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/series-historicas/>. Acesso em: 17 jan 2019.
- Mendonça, H. V.; Martins, C. E.; Rocha, W. S. D.; Borges, C. A. V.; Ometto, J. P. H. B.; Otenio, M. H. Biofertilizer replace urea as a source of nitrogen for sugarcane production. *Water, Air, e Soil Pollution*, v. 229, p. 216, 2018.
- Moraes, E. R.; Domingues, L. A. S.; Medeiros, M. H.; Peixoto, J. V. M.; Lana, R. M. Q. Produtividade e características agronômicas da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 3, p. 27–32, 2016.
- Rhein, A. F.; Pincelli, R. P.; Arantes, M. T.; Dellabiglia, W. J.; Kölln, O. T.; Silva, M. D. A. Technological quality and yield of sugarcane grown under nitrogen doses via subsurface drip fertigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, p. 209-214, 2016.
- Roberts, T. L. Improving nutrients use efficiency. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v.32, p.177-182, 2008.
- Silva, M. A.; Arantes, M. T.; Rhein, A. F. L.; Gava, G. J. C.; Kolln, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.241-249, 2014.

- Silva, M. A.; Cato, S. C.; Costa, A. G. F. Produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar submetida à aplicação de biorregulador e fertilizantes líquidos. *Ciência Rural*, v. 40, p. 774-780, 2010
- Silva, N. F.; Cunha, F. N.; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L.; Silva, E. C.; Coelho, R. D.; Cabral, F. F. Development and yield of irrigated sugarcane as affected by nitrogen sources and rate in Brazilian cerrado Oxisol. *Journal of Agricultural Science*, v. 11, p. 267-281, 2019.
- Silveira, L. C. I.; Barbosa, M. H. P.; Oliveira, M. W. Manejo de variedades de cana-de-açúcar predominantes nas principais regiões produtoras de cachaça de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, v. 23, p. 25–32, 2002.
- Singh, K.; Brar, A. S. Effect of planting methods and irrigation schedules on cane yield, quality, economic and water productivity of spring sugarcane (*Saccharum officinarum*) in South Western Punjab. *Indian Journal of Agronomy*, v. 60, p. 601–605, 2015.
- Souza, G. S.; Souza, Z. M.; Barboza, R. S.; Sobreira, R. B.; Silva, F. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 8, p. 135-146, 2014.
- Statsoft, Inc. STATISTICA—data analysis software system. Ver. 10. 0. Computer software, 2011.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3ª edição revista e atualizada. Brasília, DF: EMBRAPA. 2017, 573 p.
- Vale, D. W.; Prado, R. M.; Cantarella, H.; Fonseca, I. M.; Avalhães, C. C.; Correia, M. A. R.; Barbosa, M. P. Ammonium and nitrate in soil and ratoon sugarcane grown in function of nitrogen on Oxisol. *Journal of Plant Nutrition*, v.36, p.201-213, 2013.

CAPÍTULO III - FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA *a* EM CANA-DE-AÇÚCAR
CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E
SUBSOLAGEM

FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA *a* EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica e social no Mundo e o manejo hídrico e nutricional deve ser avaliado de modo adequado. A fluorescência da clorofila é uma análise que avalia a performance fotossintética da planta de forma não destrutiva, sendo uma ferramenta importante para avaliar o estresse hídrico e equilíbrio nutricional. Com base nisso foi realizado um experimento em campo na cana-de-açúcar cultivada com diferentes doses de N, lâminas de irrigação em solo sem e com subsolagem. Foi realizado um experimento em campo em uma cana soca na 4^o folha de cultivo. Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro lâminas de irrigação (0, 50, 100 e 150% da evapotranspiração da cultura) e 5 doses de N (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹), com as plantas cultivadas em solo com e sem subsolagem. As doses de nitrogênio e as lâminas foram arranjadas em faixas em condições sem e com subsolagem com delineamento em blocos, 5×4×2 com 3 repetições. A fluorescência da clorofila *a* foi determinada com o auxílio do fluorômetro. As medições foram realizadas aos 150 dias em folhas adaptadas ao escuro após a colheita da 3^o folha, das 7:00 as 10 horas da manhã. A partir dos dados coletados foram calculados os parâmetros do Teste - JIP. A absorção e o fluxo de energia capturada por centro de reação aumentaram, evidência da inativação dos centros de reações, com a presença de estresse hídrico e baixas doses de nitrogênio de forma mais pronunciada no solo não subsolado. O desempenho da fotoquímica em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em solo subsolado é maior do que nas cultivadas em solo não subsolado. Lâmina maiores ou iguais a 100% da ETC e doses de N maiores ou iguais a 80 kg ha⁻¹ foram mais eficientes fotossinteticamente tanto em condições de solo não subsolado quanto em solo subsolado.

Palavras-chave: fluorescência transiente; irrigação; nitrogênio; *Saccharum officinarum*

CHLOROPHYLL *a* FLUORESCENCE IN SUGARCANE GROWN UNDER DIFFERENT NUTRITIONAL AND WATER MANagements AND SUBSOILED

ABSTRACT

Sugarcane is a culture of great economic and social importance in the world, and water and nutritional management must be adequately evaluated. The chlorophyll fluorescence

is an analysis that evaluates the photosynthetic performance of the plant in a non-destructive way, being an important tool to evaluate the water stress and nutritional balance. Based on this, a field experiment was carried out on a soca cane with the objective of identifying the changes in the photochemical phase of the plants. The treatments consisted in the application of four irrigation slides referring to 0, 50, 100 and 150% of the Culture Evapotranspiration (ETC); 5 doses of Nitrogen: 0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹ in no subsoiled and without subsoiling. The experiment was in randomized blocks with factorial arrangement 5x4x2 with 3 replicates. The fluorescence of chlorophyll a was determined using the fluorometer. Measurements were performed at 150 days on leaves adapted to the dark after harvesting the 3rd leaf, from 7:00 am to 10:00 am. From the collected data the relative variable fluorescence, the kinetic difference and the parameters of the JIP Test were calculated. The uptake and energy flow captured by reaction center increased, evidence of inactivation of reaction centers, with the presence of water stress and low doses of nitrogen more pronounced in the no subsoiled. The performance of photochemistry in sugarcane plants grown in subsoiled soil is higher than in those grown in no subsoiled soil. The 100% ETC laminate was the most efficient photosynthetically in both no subsoiled and subsoiled conditions. Using the 100% ETC dose the N rates of 40 and 80 kg ha⁻¹ under subsurface soil conditions and 80 and 120 kg ha⁻¹ under no subsoiled conditions are the most efficient photosynthetically.

Keywords: transient fluorescence; hydric stress; nitrogen; *Saccharum officinarum*

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância mundial e se destaca na produção de açúcar e etanol. Em 2017 a produção de cana-de-açúcar no mundo foi de 1,9 bilhão de toneladas com mais de 50% da produção concentradas nas américas, sendo o Brasil o maior produtor mundial (FAOSTAT, 2019).

No Brasil a cana-de-açúcar é produzida principalmente em condições de sequeiro e está susceptível a períodos de escassez hídrica, sendo esse o maior limitador para a sua produção. Segundo Li et al. (2016) o estresse hídrico resulta na foto-inibição, que inclui danos ao aparelho fotossintético e provoca a inativação irreversível de fotossistema II (PSII) em condições progressivas de estresse hídrico.

Além da água, a baixa disponibilidade de nitrogênio (N) também se destaca como um limitador do desenvolvimento da cana-de-açúcar por provocar alterações nos centros de reações dos fotossistemas. A deficiência de N provoca alterações na função do

fotossistema I (PSI) e fotossistema II (PSII), que afetam a conversão de energia fotoquímica (HURA et al., 2007; WANG et al., 2016).

Um fator que surge com uma agravante em situações de estresse hídrico ou déficit de N é a compactação do solo. A compactação é causada principalmente pela utilização desordenada de máquinas e implemento agrícolas no campo e afeta a absorção de água e nutrientes pelas plantas.

A fotossíntese é sensível a alterações abióticas e embora a maior parte dos estudos foquem nas mudanças ligadas direta ou indiretamente a fase bioquímica da fotossíntese a fase fotoquímica, através da técnica de fluorescência da clorofila *a*, também pode ser usada para diagnosticar o impacto do estresse hídrico e do déficit de N sobre fotossíntese da planta. A fluorescência da clorofila pode fornecer pontos de referência únicos para melhorar os modelos de produtividade agrícola de forma global (GUANTER et al., 2014; MALASPINA et al., 2014).

As técnicas de fluorescência de clorofila são confiáveis, não invasivas e simples para a avaliação do transporte de elétrons dos processos fotossintéticos relacionados (KALAJI et al., 2012). É uma ferramenta poderosa para avaliação de danos ao aparato fotossintético em diferentes condições ambientais.

Desta forma o trabalho teve como objetivo identificar através da avaliação da fluorescência da clorofila *a* a influência de doses de N, lâminas de irrigação em solo com e sem subsolagem sobre a fase fotoquímica da cana de açúcar.

MATERIAIS E MÉTODOS

Instalação do experimento

O experimento foi realizado em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina - EECAC/UFRPE, com coordenadas 7° 51' 13'' S, 35° 14' 10'' W, a 180 m de altitude, em uma cana soca na 4ª folha de cultivo dando continuidade ao trabalho iniciado por (COSTA, 2016).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, conforme EMBRAPA (2013). Foi realizada a caracterização química (Tabela 1) e física (Tabela 2) do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm de acordo com Teixeira et al. (2017). O histórico de adubação da área encontra-se na Tabela 3.

Tabela 1 - Caracterização química do solo da área experimental.

| Análises químicas 4º folha | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------|-------------|-------|---------------------|---|
| Camada | pH | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Al ⁺³ | H+Al | CTC | V | M | P |
| Cm | H ₂ O | -----Cmolc dm ⁻³ ----- | | | | | -----%----- | | mg dm ⁻³ | |
| 0-20 | 5,1 | 0,08 | 1,5 | 0,3 | 0,3 | 3,9 | 5,78 | 32,52 | 13,76 | 7 |
| 20-40 | 5,0 | 0,06 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 4,0 | 5,26 | 23,95 | 32,26 | 7 |

pH – Potencial hidrogeniônico em água; K⁺ - Potássio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg³⁺ – Magnésio; Al³⁺ – Alumínio; H+Al – Hidrogênio + Alumínio; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m-Saturação por alumínio; P – Fósforo.

Tabela 2 - Caracterização física do solo da área experimental.

| Análises físicas 4º folha | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------|--------|---|------------------|-----------------|--|
| Camada | Ds ¹ | Ds ² | Areia | Silte | Argila | Θ _{CC} | Θ _{PMP} | Classe textural | |
| Cm | Mg m ⁻³ | Mg m ⁻³ | -----g kg ⁻¹ ----- | | | ----m ⁻³ m ⁻³ --- | | | |
| 0-20 | 1,71 | 1,54 | 848,7 | 13,9 | 137,4 | 0,15 | 0,10 | Franco arenoso | |
| 20-40 | 1,86 | 1,55 | 826,2 | 16,4 | 157,4 | 0,18 | 0,12 | Franco arenoso | |

1 – Densidade do solo sem subsolagem; 2- Densidade do com subsolagem; Θ_{CC} – Umidade na capacidade de campo; Θ_{PMP} – Umidade no ponto de murcha permanente.

Tabela 3 - Manejo da adubação durante o cultivo da área.

| Adubação | | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| Folha | P ₂ O ₅ | Fonte | K ₂ O | Fonte | N0 | N1 | N2 | N3 | N4 | Fonte |
| | kg ha ⁻¹ | | kg ha ⁻¹ | | kg ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | |
| 1º | 30 | SFS | 60 | KCl | 0 | 20 | 40 | 80 | 120 | Ureia |
| 2º | 0 | ----- | 80 | KCl | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | Ureia |
| 3º | 0 | ----- | 80 | KCl | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | (NH ₄) ₂ SO ₄ |
| 4º* | 0 | ----- | 80 | KCl | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | (NH ₄) ₂ SO ₄ |

P₂O₅ – Óxido de fósforo; K₂O – Óxido de potássio; KCl -Cloreto de potássio; N – Nitrogênio; (NH₄)₂SO₄ – Sulfato de amônio; *A aplicação de N foi parcelada em duas vezes para doses ≥80 kg ha⁻¹, a primeira por ocasião do corte da 3º folha e a outra 30 dias depois.

Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro lâminas de irrigação (L) e cinco doses de nitrogênio (N) em solo com e sem subsolagem. As doses de nitrogênio foram N1 = 0; N2= 40; N3 = 80, dose padrão segundo Cavalcanti (2008); N4 = 120 e N5 =160 kg ha⁻¹. As lâminas totais de água aplicadas via irrigação foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura (ETC), sendo (L1, L2, L3 e L4) 0, 50, 100 e 150% da ETC respectivamente conforme a Tabela 4.

Foi utilizado um sistema de irrigação por aspersão em linha, “line source sprinkler system”. O sistema de irrigação por aspersão em linha foi descrito por Hanks et al. (1976), consiste em uma única linha de aspersores em campo sobrepostos. A disposição dos aspersores muito próximos em uma única linha permite uma sobreposição de jatos de água, proporcionando maior precipitação ao longo da linha lateral e um gradiente decrescente perpendicularmente ao tubo. Este sistema, desenvolvido para fins experimentais, permite a obtenção de diferentes níveis de água aplicados.

O sistema foi constituído de uma linha central com sete aspersores, espaçados a cada 15 m. Os aspersores usados foram do tipo mini-canhão KS 1500 mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de $13,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e 60 m de diâmetro molhado.

Tabela 4. Lâminas de irrigação e totais aplicadas no experimento.

| Lâmina | ETC | Precipitação | Lâmina aplicada | Lâmina Total |
|--------|-----|--------------|-----------------|--------------|
| | % | Mm | Mm | Mm |
| L1 | 0 | 905 | 0 | 905 |
| L2 | 50 | 905 | 275 | 1180 |
| L3 | 100 | 905 | 551 | 1456 |
| L4 | 150 | 905 | 826 | 1731 |

No início do 3º ciclo de cultivo foi feita subsolagem em metade de cada parcela experimental a uma profundidade média de 50 cm, criando assim a condição subsolada e não subsolada que persistiu durante o 4º ciclo de cultivo.

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de $33,0 \text{ m}^2$. A área útil correspondeu às três fileiras centrais descontando-se um metro de cada lado no sentido do comprimento, ficando com 4,0 m de comprimento, resultando em uma área útil de $13,2 \text{ m}^2$. De acordo com croqui da área experimental (Figura 1).

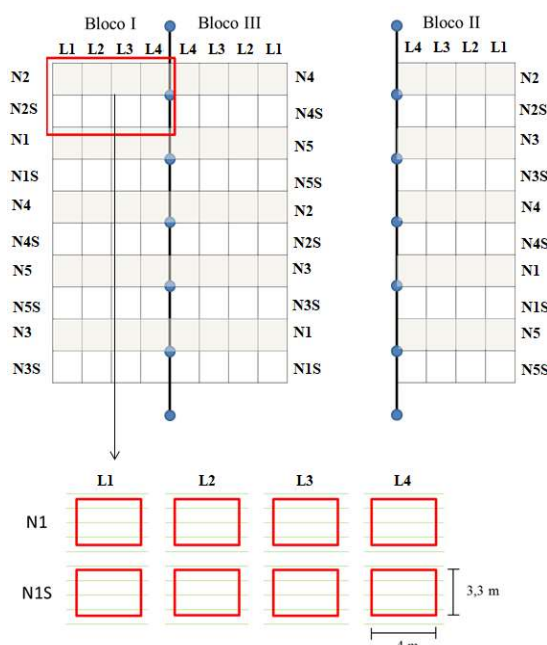


Figura 1. Croqui da área experimental com detalhamento da parcela experimental e os tratamentos. N1, N2, N3, N4 e N5 (0, 40, 80, 120, 160 kg ha^{-1} respectivamente). L1, L2, L3 e L4 (0, 50, 100 e 150% da ETC). O S em frente ao nome do fator indica que o solo foi com subsolagem e a ausência de S indica o solo sem subsolagem.

A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB92579, cana-soca em 4º folha de cultivo.

As doses de nitrogênio e as lâminas foram arranjadas em faixas, em condições subsoladas e não subsoladas com delineamento em blocos, resultando em um experimento 5×4×2 com 3 repetições.

Manejo da irrigação

A evapotranspiração diária da cultura (ETC - mm) foi calculada utilizando dados coletados em tanque classe A existente próximo à área de cultivo pela seguinte equação:

$$ETC = ECA \times Kp \times Kc \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

ECA é a evaporação do tanque Classe A, mm;

Kp é o coeficiente do tanque Classe A;

Kc é o coeficiente de cultura.

O valor de Kp foi obtido a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa fornecidos por uma estação meteorológica local, e evaporação do tanque classe A utilizado os valores recomendados por Doorenbos e Kassam (1994).

O Kc utilizado foi o recomendado também por Doorenbos e Kassam (1994) (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de Kc para cana-soca

| Idade da Cana (Meses) | Período de desenvolvimento | Kc |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 0-1 | Do plantio a 25% de cobertura | 0,55 |
| 1-2 | De 25 a 50% de cobertura | 0,80 |
| 2-2,5 | De 50 a 75% de cobertura | 0,90 |
| 2,5-4 | De 75% a cobertura completa | 1,00 |
| 4-10 | Cobertura total do solo | 1,05 |
| 10-11 | Início da Maturação | 0,80 |
| 11-12 | Maturação | 0,60 |

A Figura 2 apresenta os dados de precipitação e lâmina de irrigação durante o período de experimento.

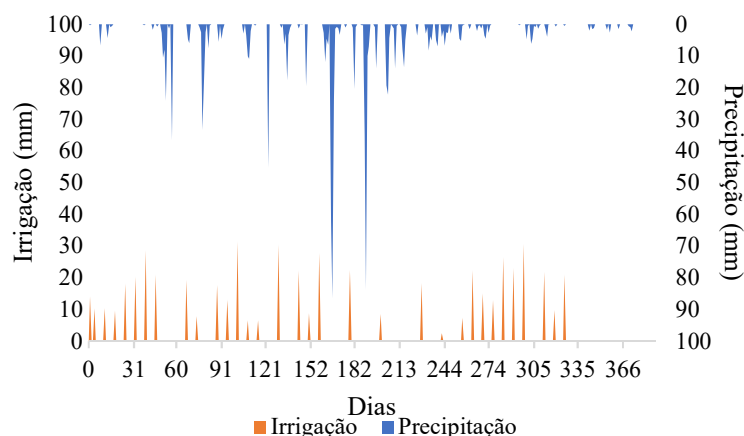


Figura 2 - Precipitação e lâmina de irrigação aplicada durante o experimento.

Leitura da Fluorescência da clorofila *a*

A fluorescência da clorofila foi determinada com o auxílio do fluorômetro FluorPen, modelo F100 (Photon Systems Instruments). As medições foram feitas aos 150 dias após a colheita da 3ª folha das 7:00 às 10 horas da manhã. Três folhas +1 por parcela foram adaptadas ao escuro por 30 minutos com o auxílio de pinças e depois foi realizada a leitura da fluorescência. A partir dos dados coletados foram calculadas a fluorescência variável relativa, a diferença cinética e os parâmetros do Teste - JIP.

Teste JIP

A partir das intensidades de fluorescência medidas foram calculados os parâmetros estabelecidos pelo Teste - JIP e Derivações do Test - JIP obtidas das análises da fluorescência da clorofila *a* de acordo com Strasser et al. (2004), Yusuf et al. (2010) e Redillas et al. (2011) (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo dos parâmetros, fórmulas e sua descrição com dados extraídos de fluorescência da clorofila *a* (OJIP).

| Parâmetros extraídos da curva OJIP | Descrição |
|------------------------------------|--|
| F50 μ s ou Fo | Intensidade de fluorescência mínima a 50 μ s |
| F100 μ s e F300 μ s | Intensidade de fluorescência a 100 e 300 μ s, respectivamente |
| Fj e Fi | Intensidade de fluorescência no passo J (2 ms) e no passo I (30 ms), respectivamente |
| FP ou Fm | Fluorescência máxima no passo P |
| Parâmetros derivados da curva OJIP | |

| | |
|--|---|
| $F_v = F_m - F_o$ | Fluorescência variável |
| $V_j = (F_{2\text{ ms}} - F_o)/(F_m - F_o)$ | Fluorescência variável relativa no passo J (2 ms) |
| $V_i = (F_{30\text{ ms}} - F_o)/(F_m - F_o)$ | Fluorescência variável relativa no passo I (30 ms) |
| F_v/F_m | Rendimento quântico máximo fotoquímico primário em $t = 0$ |
| $M_o = 4 (F_{300\ \mu\text{s}} - F_o)/(F_m - F_o)$ | Declividade inicial (em ms^{-1}) da fluorescência transiente $V = f(t)$ |
| $N = S_m * (M_o/V_j)$ | Número de giros de redução, oxidação e re-redução de QA no tempo entre a luz ser ligada até atingir F_m |
| $S_m = E_{Co}/RC = \text{Area}/(F_m - F_o)$ | Área complementar total normalizada acima da curva OJIP |
| $S_s = V_j/M_o$ | Área complementar total normalizada acima da curva transiente entre os passos O e J |

Razões de fluxo de energia

| | |
|---|--|
| $\psi E_o = E_{To}/TR_o = 1 - V_j$ | Probabilidade (no tempo 0) de um éxciton capturado mover um elétron na cadeia de transporte de elétrons após QA^- |
| $\phi E_o = \phi P_o * \psi_o = 1 - (F_j/F_m) = E_{To}/ABS$ | Rendimento quântico de transporte de elétrons de QA^- para o intersistema de aceptores de elétrons |
| $\phi D_o = D_{Io}/ABS = 1 - \phi P_o = F_o/F_m$ | Rendimento quântico fotoquímico para dissipação de calor. |
| $\delta R_o = R_{Eo}/E_{To} = (1 - V_i)/(1 - V_j)$ | Eficiência com que um elétron pode mover dos aceptores de elétrons do intersistema reduzidos para os aceptores finais do FSI |
| $\rho R_o = R_{Eo}/TR_o = \psi E_o \delta R_o$ | Eficiência de um éxciton capturado de mover um elétron dentro da cadeia transportadora a partir de QA^- até os aceptores finais do PSI |
| $\phi R_o = R_{Eo}/ABS = \phi P_o * \psi E_o * \delta R_o$ | Rendimento quântico de redução dos aceptores finais de elétrons do FSI por fóton absorvido |

Fluxos específicos por centro de reação (CR)

| | |
|--|--|
| $ABS/CR = M_o * (1/V_j) * (1/\phi P_o)$ | Fluxo de absorção por CR |
| $TR_o/CR = M_o/V_j$ | Fluxo de energia capturado por CR em $t = 0$ |
| $E_{To}/CR = (M_o/V_j) * \psi E_o = (M_o/V_j) * (1 - V_j)$ | Fluxo de transporte de elétrons por CR em $t = 0$ |
| $R_{Eo}/CR = (R_{Eo}/E_{To}) * (E_{To}/CR)$ | Redução dos aceptores finais do lado receptor de elétrons do FSI por CR em $t = 0$ |
| $D_{Io}/CR = ABS/CR - TR_o/CR$ | Fluxo de energia dissipada por CR no $t=0$ |

Fluxos Fenomenológicos

| | |
|---|--|
| ABS/CS_o | Absorção por sessão transversal (cross section – CS) |
| $TR_o/CS_o = (1 - (F_o/F_m)) * F_o$ | Captura no instante 0 por CS |
| $E_{To}/CS_o = (1 - (F_o/F_m)) * (1 - V_j) * F_o$ | Transporte de elétrons no instante 0 por CS |
| $D_{Io}/CS = (ABS/CS) - (TR_o/CS)$ | Dissipação de energia no instante 0 por CS |

Índice de Performance

| | |
|---|---|
| $[\gamma RC/(1 - \gamma CR)] = CR/ABS = (CR/TR_o)(TR_o/ABS) = (V_j/M_o)(F_v/F_m)$ | Densidade de CR por clorofila |
| $[\phi P_o/(1 - \phi P_o)] = TR_o/D_{Io} = F_v/F_o$ | Desempenho para reações redox da fotoquímica primária |
| $[\psi E_o/(1 - \psi E_o)] = E_{To}/(d\text{ QA-}/dt\text{ o})$ | Desempenho das reações das fases terminais da fotoquímica |
| $\delta R_o / (1 - \delta R_o)$ | Desempenho das reações para as reações redox dos aceptores finais no lado receptor do FSI |

$$PIABS = [\gamma CR / (1 - \gamma CR)] [\phi P_o / (1 - \phi P_o)]$$

$$[\psi E_o / (1 - \psi E_o)]$$

$$PI_{total} = [\gamma CR / (1 - \gamma CR)] [\phi P_o / (1 - \phi P_o)]$$

$$[\psi E_o / (1 - \psi E_o)] [\delta R_o / (1 - \delta R_o)]$$

Índice de vitalidade para conservação de energia para redução do instersistema
Índice de vitalidade para conservação de energia para redução dos aceptores finais do FSI

Os dados do Teste JIP foram normalizados para fins de comparação.

$$VN = \frac{\text{Testemunha} - \text{tratamento}}{\text{Testemunh}} \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

VN é o valor normalizado

Testemunha é o valor do tratamento testemunha

Tratamento é o valor dos outros tratamentos

Os tratamentos testemunhas foram definidos com 100% da ETC, 80 kg de N ha⁻¹ (dose padrão).

Análise estatística

Para o Teste-JIP foi feita análise de variância para identificar diferença e interações entre os tratamentos utilizando o Software Sisvar 5.6 (FERREIRA, 1998). Encontram-se nos gráficos apenas a variáveis com diferenças significativas (P≤0,05).

A comparação do comportamento do teste-JIP em condições de solo não subsolado e subsolado foi realizada utilizando componentes principais. Os autovalores e autovetores foram gerados a partir da matriz de covariância das variáveis originais utilizando o Software Statistica 10 (STATSOFT, 2011). Para fins de comparação dos dados foram utilizadas as componentes que somadas explicavam mais de 70% da variância total para cada ano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste-JIP

Na Figura 3 observa-se o desdobramento da interação entre as doses de N e o solo com e sem subsolagem significativo pelo teste F (P<0,05).

Analisando a Figura 3A a fluorescência inicial (Fo) para N4 e N5 (120 e 160 kg ha⁻¹ respectivamente) foi menor que para N3 (80 kg ha⁻¹). Diferentemente dos valores encontrados para N1 e N2 (0 e 40 kg ha⁻¹ respectivamente).

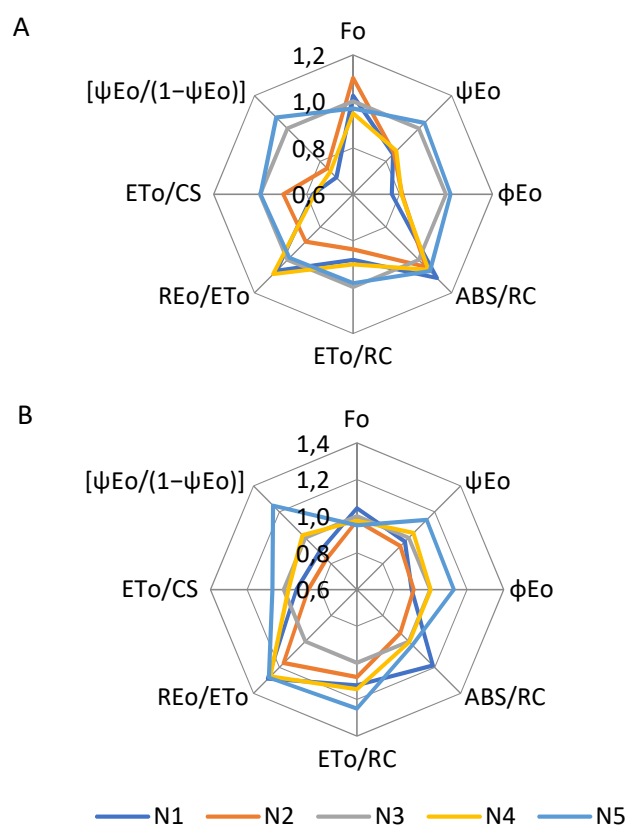


Figura 3. Desdobramento da interação entre as doses de N em condições de solo não subsolados (A) e subsolados (B) em cultivo de cana-de-açúcar.

Antes da determinação da determinação de F_o o fotossistema encontrava-se oxidado (BAKER e ROSENQVST, 2004), esperando a presença da luz para que ocorra sua saturação. Quando os fótons de luz atingem a molécula de clorofila essa energia é transferida para os centros de reação através de um processo largamente conhecido como energia de ressonância (ANDREWS et, al. 2011); essa energia ao atingir o centro de reação do fotossistema II (PSII) deveria ser absorvida, porém quando ocorre alguma alteração na homeostase da planta o fotossistema é afetado e a energia que o atinge é dissipada na forma de fluorescência e calor em níveis maiores do que uma planta sadia.

Menores valores de F_o indicam centros de reações mais ativos e conseqüentemente maior eficiência na fotoquímica, enquanto maiores valores indicam menor eficiência, visto que mais energia está sendo perdida na forma de fluorescência e não está sendo utilizada para a produção de ATP e NADPH.

Analisando F_o no solo subsolado (Figura 3B) observa-se que a F_o foi maior que a dose padrão (N3) nas condições de N1, ou seja, sem aplicação de N. A deficiência de N aumenta F_o por inativar centro de reações, diferente do que ocorreu no solo não subsolado

esse aumento de F_o não se estendeu a N_2 , indicando que o solo subsolado contribui para o aumento na absorção do N.

O aumento do número de centros de reações ativos para N_5 em condições não subsoladas também aumentou a probabilidade (no tempo 0) de um éxciton capturado mover um elétron na cadeia de transporte de elétrons após QA^- (molécula de quinona reduzida) (ψE_o) (Figura 3A). Em condições subsoladas ψE_o aumentou para N_4 e N_5 (Figura 6B). Oukarroum et al. (2015) encontraram aumento da formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) com a diminuição de ψE_o e conseqüentemente seu aumento protege o fotossistema da formação dessas espécies.

O mesmo ocorreu com o rendimento quântico de transporte de elétrons de QA^- para o intersistema de aceptores de elétrons (ϕE_o). Se o número de centro de reações diminui ou aumenta, o rendimento quântico também vai diminuir ou aumentar acompanhando-o.

O fluxo de absorção por centro de reação (ABS/RC) aumentou para N_0 , N_1 , N_3 e N_4 em condições não subsoladas (Figura 3A) e aumentou apenas para N_1 em condições subsoladas. Quanto menos centros de reações ativos maior o ABS/RC. Corroborando com dados anteriores denotando que em condições subsoladas comparadas as condições não subsoladas tem-se melhores condições de absorção de N pelas plantas o que contribui para o aumento do número de centro de reações ativos.

Quanto melhor as condições de cultivo da planta maior deve ser o fluxo de elétrons. O fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ET_o/RC) seguiu um caminho contrário a ABS/RC. Em condições não subsoladas ocorreu diminuição para todos as doses de N diferentes da dose padrão enquanto que, em condições subsoladas ET_o/Rc aumentou.

A eficiência com que um elétron pode mover dos aceptores de elétrons do intersistema reduzidos para os aceptores finais do FSI (RE_o/ET_o) aumentou de maneira mais pronunciada em condições subsoladas (Figura 3B) do que em condições não subsoladas (Figura 3A) o que indica que a condição subsolada aumenta a eficiência da fase fotoquímica não apenas em sua fase inicial, mas também nas fases finais o que ocasionará maior produção de ATP e NADPH. Valores altos de RE_o/ET_o podem resultar em um aproveitamento mais eficiente da radiação evitando a formação de espécies reativas de oxigênio (NISHIYAMA et al., 2011).

O transporte de elétrons no instante 0 por sessão transversal (ETo/CS) foi maior em N5 para a condição não subsolada (Figura 3A) e subsolada e (Figura 3B), indicando que N5 aumentou o número de centro de reações ativos por unidade de área na folha.

Para o desempenho das reações redox nas fases terminais da fotossíntese [$\psi E_o/(1-\psi E_o)$] os valores foram maiores em N5 para as condições não subsoladas e em N4 e N5 em condições não subsoladas.

Na Figura 4 observa-se o desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas de irrigação ($P < 0,05$). A fluorescência máxima em L1 (0% da ETC) aumentou apenas para N2 (Figura 4A), permaneceu com valores próximos para todas as doses de N em L2 e L3 (50 e 100 % da ETC respectivamente) e para L4 (150% da ETC) aumentou apenas em N1. A lâmina L4 apresentou maiores reduções de Fm.

O valor de Fm é obtido quando toda quinona é reduzida e os centros de reação ficam fechados. Valores mais baixos de Fm indicam que existem menos moléculas de clorofila para captura de energia, ou seja, menos centros de reações ativos. Essa redução ter aparecido de forma mais pronunciada em L4 é um indicativo que o excesso de água estava prejudicando de alguma forma o aparato fotossintético.

A fluorescência variável ($F_v = F_m - F_o$) responde as variações em F_o e F_m . Para a L1 F_v aumentou apenas em N2 (Figura 4A), principalmente devido a F_m que também foi elevada para essa lâmina. Em L2 a F_v diminuiu para todos os tratamentos em relação a dose padrão (N3) (Figura 4B). Na L3 a F_v aumentou para N2 e N5 (Figura 4C) e em L4 aumentou apenas em N5 (Figura 4D).

O rendimento fotoquímico primário F_v/F_m é uma variável de grande sensibilidade para alterações no aparato fotossintético. Esse parâmetro é frequentemente usado para avaliar o grau de dano causado pelo estresse abiótico e definir as sensibilidades diferenciais das plantas ao estresse (WANG et al., 2012; ZUSHI et al., 2012).

Analisando a Figura 4A pode-se observar que em L1 as doses de N1, N2, N4 e N5 apresentaram diminuição, embora pequena, dos valores de F_v/F_m . Assim como em L2 (Figura 4B). Analisando L3 (Figura 4C) todos as doses tiveram valores F_v/F_m menores que N3, com exceção para N5. Em L4 apenas N4 e N5 tiveram maiores rendimentos quânticos que a dose padrão.

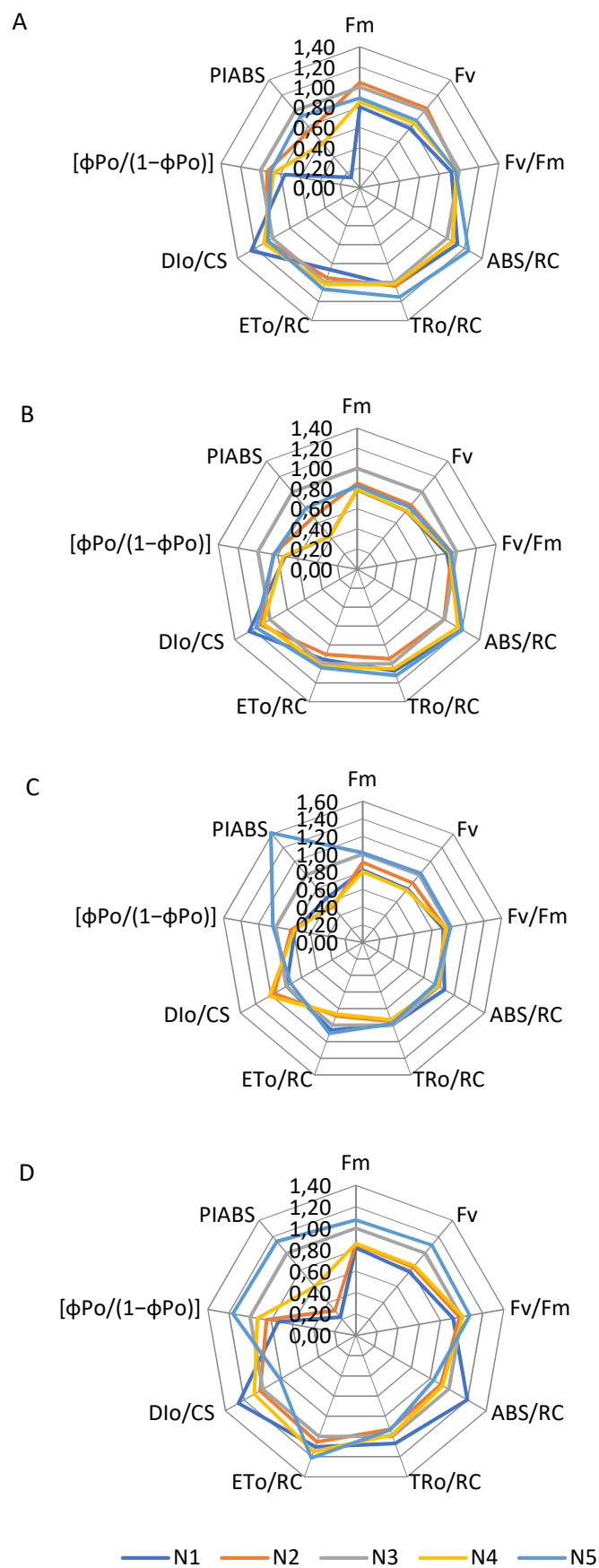


Figura 4. Desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas de irrigação em cultivo de cana-de-açúcar. (A) L1- 0% da ETC, (B) L2-50% da ETC, (C) L3-100% da ETC, (D) L4-150% da ETC.

Vemos claramente a interação entre as lâminas e as doses de N observando o comportamento de Fv/Fm. Em L3 que representa 100% da ETC a lâmina proporcionou melhor aproveitamento do N enquanto em L4 (150% da ETC) a oferta de mais água não provocou o melhor desempenho fotossintético da cana-de-açúcar como seria de se esperar, apenas nas dose N4 e N5 é que foi possível compensar o efeito da lixiviação do N provocado pela maior aplicação de água.

Corroborando Rhein e Silva (2017) também encontram um aumento de Fv/Fm em plantas de cana-de-açúcar (SP80-3280) com incremento de doses de nitrogênio, particularmente sob a aplicação de 100 e 150 kg N ha⁻¹.

O fluxo de absorção por centro de reação (ABS/RC), o fluxo de energia capturada por centro de reação (TRo/RC) e o fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ETo/RC) quando aumentam indicam inativação de centros de reações, pois corre uma condensação das reações em menos sítios. Sua diminuição indica mais sítios de reações ativos, o que provoca uma distribuição da energia capturada.

Para L1 aumentaram principalmente em N4 e N5 (Figura 4A), um indicativo que o aumento da dose de N não é suficiente para compensar a falta de água nessa condição. Analisando L2 as doses N1, N4 e N5 aumentaram seus valores de ABS/RC, TRo/RC e ETo/RC (Figura 4B) enquanto quem em L3 a dose N4 e N5 apresentou menores valores de ABS/RC, TRo/RC e ETo/RC. Para L4 ABS/RC, TRo/RC e ETo/RC aumentaram para N1 e decresceram para as outras doses.

O aumento da ABS/RC, TRo/RC e ETo/RC, indicam menor número de centros de reações ativos. Isso se deve ao fato de L1 ter menor disponibilidade de água, o que provoca diminuição da capacidade fotossintética enquanto em L4 o excesso de água parece provocar a lixiviação do N e diminuir a disponibilidade nas menores doses, enquanto N4 e N5 por serem doses maiores compensam o fator lixiviação permitindo uma melhor oferta de N para a planta. Segundo Zhou et al. (2019) a falta de água desativa os centros de reações PSII e diminuiu a conectividade entre as unidades PSII.

O fluxo de energia dissipada por secção transversal (DIO/CS) aumentou para os para os tratamentos diferentes de N3 em L1 (Figura 4A) e em L2 (Figura 4B). Em L3 as doses N1 e N5 diminuíram DIO/CS enquanto N2 e N4 aumentaram (Figura 4C) e em L4 apenas N5 diminuiu o valor de DIO/CS.

Os valores de DIO/CS estão relacionadas a dissipação de energia na forma de calor. Os valores de DIO/CS corroboram com os dados apresentados nas outras variáveis. As menores lâminas provocaram maiores danos na fotoquímica independente das doses

de N, enquanto a maior lâmina apresenta os melhores resultados apenas para as maiores doses de N.

O elevado valor de DIo/CS em alguns tratamentos é um indicativo de fotoinibição. A fotoinibição ocorre quando a energia capturada excede a utilizada na fotossíntese, geralmente com um aumento de temperatura, resultado da perda de energia na forma de calor (CHENG et al., 2016). A dissipação de energia é um mecanismo que permite assegurar a relação de produção de ATP/NADPH (KRAMER et al., 2004; KRAMER e EVANS, 2011).

Segundo Xue et al. (2018) o aumento de DIo/CS , ABS/RC e ETo/RC em condições estressantes sugere que uma fração dos centros de reação ativa foi inativado, o que também foi confirmado por diminuições nos índices de desempenho estudados.

O desempenho para reações redox da fotoquímica primária ($[\phi Po/(1-\phi Po)]$) e o Índice de vitalidade para conservação de energia para redução do instersistema (PIABS) são índices de performance da fotoquímica. Enquanto $[\phi Po/(1-\phi Po)]$ trata das reações iniciais da fotossíntese até o PSII o PIABS trata da fotoquímica como um todo.

Os dois índices apresentaram comportamentos semelhantes. Analisando L1 (Figura 4A) e L2 (Figura 4B) observa-se que houve diminuição dos índices para todos as doses de N. Em L3 (Figura 4C) e em L4 (Figura 4D) a dose N5 se destaca com os maiores valores para os índices. Para Yusuf et al. (2010) este parâmetro é o mais sensível do Teste-JIP porque incorpora vários parâmetros que são avaliados a partir da fluorescência transiente OJIP.

Os índices de performance refletem todo o comportamento fotossintético detalhado até agora, onde a falta ou o excesso de água são igualmente importantes para o desenvolvimento da planta e a interação com entre os fatores lâminas e doses de N só pode se compensar até certo ponto.

Relação entre os parâmetros do teste-JIP

A análise de componentes principais foi usada para resumir os parâmetros do teste-JIP estudados em condições não subsoladas (Figura 5) e subsoladas (Figura 6). Foram encontradas duas componentes principais que explicam a variância total nessas condições (Tabela 7). De acordo com Kaiser (1958), foram consideradas somente as componentes principais (CP) que explicam mais de 70% da variância quando acumuladas.

Tabela 7. Resumo das componentes principais da análise de componentes principais em condições subsoladas e não subsoladas.

| Componente | Não subsolado | | | Subsolado | | |
|------------|---------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| | Autovalor | Porcentagem | | Autovalor | Porcentagem | |
| | | Variância | Acumulada | | Variância | Acumulada |
| 1 | 11,58 | 64,34 | 64,34 | 8,94 | 49,68 | 49,68 |
| 2 | 3,08 | 17,14 | 81,48 | 4,69 | 26,06 | 75,74 |

Na figura 5 (solo não subsolado) podemos observar a correção entre as variáveis que descrevem as modificações nos centros de reações (RC) e fluxo de energia por secção transversal (CS). Tanto ABS/RC quanto TRo/RC apresentaram aumento com o déficit hídrico e com as doses de N abaixo do padrão principalmente no solo não subsolado.

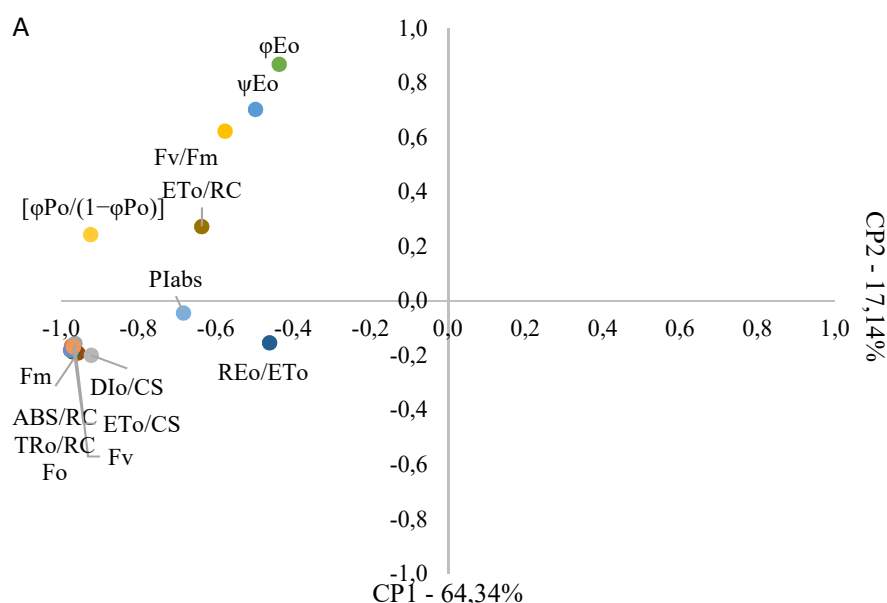


Figura 5. Análise de componentes principais dos parâmetros do teste-JIP, gráfico de correlações, em condições de solo não subsolado.

Como a absorção e o fluxo de energia capturada por centro de reação aumentaram, evidência da inativação dos centros de reações com a presença de estresse, isso provocou para as mesmas condições redução de ETo/CS, como temos menos centros de reações isso diminui o transporte de elétrons por secção transversal. O comportamento desses parâmetros do teste-JIP indica que parte da energia capturada estava sendo perdida, por isso o aumento de DIo/RC.

Temos então que a taxa de absorção de energia luminosa excede a taxa de consumo o que resulta em fotoinibição. Takahashi e Badger (2011) relataram que um excesso de

energia luminosa absorvida pelos pigmentos fotossintéticos para acelerar a fotoinibição através da supressão do reparo do PSII.

F_o , F_m e F_v obviamente estão bastante relacionados entre si. Um aumento em F_o indica dano ao aparato fotossintético e conseqüentemente provocará diminuição de F_m e F_v .

Esses parâmetros dominam a variância da CP1 e explicam o menor desempenho da fotossíntese, diferente do que ocorre no solo subsolado, onde os parâmetros que descrevem o desempenho fotossintético adequado foram agrupados de forma oposta àqueles que indicam dano ao PSII.

O menor desempenho da fotossíntese no solo não subsolado em relação ao solo subsolado ficou evidente neste trabalho. Analisando a Figura 6 (solo subsolado) encontramos uma alta correlação entre F_v/F_m , $[\phi P_o/(1-\phi P_o)]$ e PIABS e que esses parâmetros relacionados ao desempenho da fotossíntese decrescem com o aumento de ABS/RC, TRo/Rc e DIo/RC.

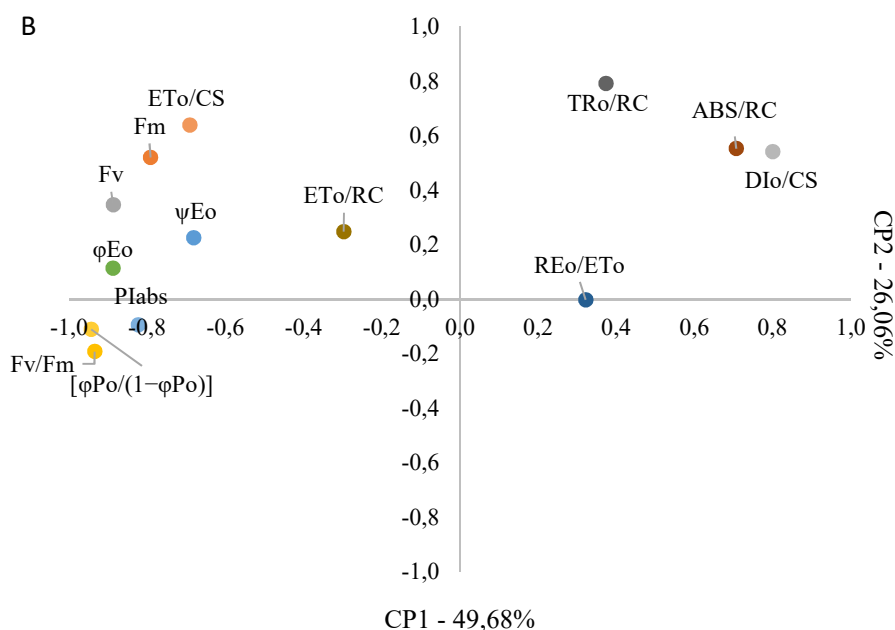


Figura 6. Análise de componentes principais dos parâmetros do teste-JIP, gráfico de correlações, em condições de solo subsolado.

A análise de componentes principais corrobora com a análise da fluorescência variável e diferença cinética, além do teste-JIP. Kalaji et al. (2018) também encontraram relação entre os parâmetros do teste-JIP que se relacionam ao estresse e entre os índices que refletem desempenho do fotossistema em plantas não estressadas.

CONCLUSÃO

O desempenho da fotoquímica em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em solo subsolado é maior do que nas cultivadas em solo não subsolado.

Lâmina de maiores ou iguais a 100% da ETC e doses de N superiores maiores ou iguais a 80 kg ha⁻¹ foram mais eficientes fotossinteticamente tanto em condições de solo não subsolado quanto em solo subsolado.

BIBLIOGRAFIA

Andrews, D. L.; Curutchet, C.; Scholes, G. D. Resonance energy transfer: beyond the limits. *Laser e Photonics Reviews*, v. 5, p. 114-123, 2011.

Baker, N. R.; Rosenqvst, E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, v. 55, p. 1607-1621, 2004.

Cavalcanti, F. J. De A. (Coord.). *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2a. aproximação*. 2 ed. rev. Recife: IPA, 2008. 212 p.

Cheng, L.; Wang, Y.; He, Q.; Li, H.; Zhang, X.; Zhang, F. Comparative proteomics illustrates the complexity of drought resistance mechanisms in two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under dehydration and rehydration. *BMC plant biology*, v. 16, p. 188, 2016.

Costa, A. R. F. C.; Rolim, M. M.; Bonfim-Silva, E. M.; Neto, D. E. S.; Pedrosa, E. R. M. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, v. 10, p. 362, 2016

Doorenbos, J.; Kassan, A.H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.

Embrapa. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3^a ed. Rio de Janeiro; 2013. 353 p. Faostat. Statistical databases. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 09 jan 2019.

Ferreira, D. F. *Sisvar – sistema de análise de variância para dados balanceados*. Lavras: UFLA, 1998, 19p.

Guanter, L; Zhang, Y.; Jung, M.; Joiner, J.; Voigt, M.; Berry, J. A.; Frankenberg, C.; Huete, A. R.; Zarco-Tejada, P.; Lee, J. E. Global and timeresolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, p. E1327–E1333, 2014.

- Hanks, R. J.; Keller, J.; Rasmussen, V. P.; Wilson, G. D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. *Soil science Society of American Journal*, v.40, p. 426-429, 1976.
- Hura T, Hura K, Grzesiak M, Rzepka A. Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C3 and C4 plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 29, p. 103–13, 2007.
- Kaiser, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, v. 23, p. 187-200, 1958.
- Kalaji, H. M.; Govindjee, V.; Goltsev, K.; Bosa, S. I.; Allakhverdiev; Strasser, R. Experimental in vivo measurements of light emission in plants: a perspective dedicated to David Walker. *Photosynthesis Research*, v, 114, p. 69–96, 2012.
- Kalaji, H. M.; Račková, L.; Paganová, V.; Swoczyna, T.; Rusinowski, S.; Sitko, K. Can chlorophyll-a fluorescence parameters be used as bio-indicators to distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill? *Environmental and Experimental Botany*, v. 152, p. 149-157, 2018.
- Kramer, D. M.; Avenson, T. J.; Edwards, G. E. Dynamic flexibility in the light reactions of photosynthesis governed by both electron and proton transfer reactions. *Trends Plant Science*, v. 9, p. 349-357, 2004.
- Kramer, D. M.; Evans, J. R. The importance of energy balance in improving photosynthetic productivity *Plant Physiol*, v. 155, p. 70-78, 2011.
- Li, C.; Nong, Q.; Solanki, M. K.; Liang, Q.; Xie, J.; Liu, X.; Li, Y.; Wang, W.; Yang, L.; Li, Y. Differential expression profiles and pathways of genes in sugarcane leaf at elongation stage in response to drought stress. *Scientific reports*, v. 6, p. 1-11, 2016.
- Malaspina, P.; Giordani, P.; Faimali, M.; Garaventa, F.; Modenesi, P. Assessing photosynthetic biomarkers in lichen transplants exposed under different light regimes. *Ecological Indicators*, v. 43, p. 126–131, 2014.
- Nishiyama, Y.; Suleyman, I. A.; Murata, N. Protein synthesis is the primary target of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. *Physiologia Plantarum*, v.142, p.35-46, 2011.
- Oukarroum, A.; Bussotti, F.; Goltsev, V.; Kalaji, H. M. Correlation between reactive oxygen species production and photochemistry of photosystems I and II in *Lemna gibba* L. plants under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, v. 109, p. 80-88, 2015.

- Redillas, M. C. F. R.; Strasser, R. J.; Jeong, J. S.; Kim, Y. S.; Kim, J. K. The use of JIP test to evaluate drought-tolerance of transgenic rice overexpressing OsNAC10. *Plant Biotechnology Report*, v. 5, p.169-175, 2011.
- Rhein, A. F. L.; Silva, M. A. Nitrogen doses on physiological attributes and yield of sugarcane grown under subsurface drip fertigation. *Journal of Plant Nutrition*, v. 40, p. 227-238, 2017.
- Statsoft, Inc. STATISTICA–data analysis. Ver. 10. 0. Computer software, 2011.
- Strasser, R. J.; Srivastava, A.; Tsimilli-Michael, M. Analysis of fluorescence transient, In: G. Papageogiou, Govindjee (eds.), *Chlorophyll Fluorescence: a Signature of Photosynthesis, Advances in Photosynthesis and Respiration*. v. 19, p. 321-362, 2004.
- Takahashi, S.; Badger, M. R. Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. *Trends in Plant Science*, v. 16, p. 53-60, 2011.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3ª edição revista e atualizada. Brasília, DF: EMBRAPA. 2017, 573 p.
- Wang, X.; Wang, L.; Shangguan, Z. Leaf gas exchange and fluorescence of two winter wheat varieties in response to drought stress and nitrogen supply. *PloS one*, v. 11, p. e0165733, 2016.
- Wang, Z.; Chen, L.; Ai, J.; Qin, H.; Liu, Y.; Xu, P.; Jiao, Z.; Zhao, Y.; Zhang, Q. Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in Amur Grape (*Vitis amurensis* Rupr.). *Photosynthetica*, v. 50, p. 189-196, 2012.
- Xue, Z. C.; Li, J. H.; Li, D. S.; Li, S. Z.; Jiang, C. D.; Liu, L. A.; Wang, S. Y.; Kang, W. J. Bioaccumulation and photosynthetic activity response of sweet sorghum seedling (*Sorghum bicolor*) to cadmium stress. *Photosynthetica*, v. 56, p. 1422-1428, 2018.
- Yusuf, M. A.; Kumar, D.; Rajwanshi, R.; Strasser, R. J.; Tsimillimichael, M.; Govindjee; Sarin, N. B. Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic Brassica juncea plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1797, p. 1428-1438, 2010.
- Zhou, C.; Le, J.; Hua, D.; He, T.; Mao, J. Imaging analysis of chlorophyll fluorescence induction for monitoring plant water and nitrogen treatments. *Measurement*, v. 136, p. 478-486, 2019.
- Zushi, K.; Kajiwara, S.; Matsuzoe, N. Chlorophyll a fluorescence OJIP transient as a tool to characterize and evaluate response to heat and chilling stress in tomato leaf and fruit *Scientia Horticulturae*, v. 148, p. 39-46, 2012.