

ANDRÉA RAQUEL FERNANDES CARLOS DA COSTA

**LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO NA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**RECIFE-PE
2015**

ANDRÉA RAQUEL FERNANDES CARLOS DA COSTA

**LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO NA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós - graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

**RECIFE-PE
2015**

Ficha catalográfica

C837L Costa, Andréa Raquel Fernandes Carlos da
Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio na cultura da cana-
de-açúcar / Andréa Raquel Fernandes Carlos da Costa. – Recife,
2015.

158 f. : il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Engenharia Agrícola, Recife, 2015.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Saccharum spp. 2. Cana-planta 3. Lâminas de água
4. Adubação nitrogenada 5. Crescimento 6. Produtividade
I. Rolim, Mário Monteiro, orientador II. Título

CDD 631

ANDRÉA RAQUEL FERNANDES CARLOS DA COSTA

**LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO NA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

APROVADA EM: 26 de Fevereiro de 2015.

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim (UFRPE)

Orientador

Prof. Dr. José Dantas Neto (UFCG)

Examinador

Prof. Dra. Edna Maria Bonfim-Silva (UFMT)

Examinadora

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto (EECAC - URFPE)

Examinador

Prof Dr. Ênio Farias França e Silva (UFRPE)

Examinador

DEDICO

*A minha mãe Rosalina Carlos e
minha filha Maria Eduarda Carlos
pelo amor e apoio incondicionais.*

*Não existem sonhos impossíveis
para aqueles que realmente acreditam que
o poder realizador reside no interior de
cada ser humano, sempre que alguém
descobre esse poder, algo antes
considerado impossível se torna realidade.*

“Albert Einstein”

AGRADECIMENTOS

É com imensa satisfação que expresso aqui o mais profundo e singelo agradecimento a todos aqueles que tornaram a realização deste trabalho possível.

A começar agradecendo a Deus, por estar sempre presente em minha vida e que através da sua presença, luz e força me abençoa e capacita para tudo aquilo que me destina.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco e a todos os professores da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos ensinamentos e por contribuírem de maneira acentuada à minha formação como profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade e receptividade.

A Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o período de realização do doutorado.

À EECAC (Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina) por permitir a realização da pesquisa no interior de suas instalações. Em especial ao diretor Dr. Djalma Euzébio Simões Neto pela disponibilidade, apoio, orientação e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor e orientador Dr. Mário Monteiro Rolim pelo apoio, incentivo, orientação, confiança e amizade.

Ao professor Dr. Manassés Mesquita da Silva por estar sempre disposto a me ajudar, pelos ensinamentos concedidos, experiência compartilhada e principalmente pelo início de uma grande amizade.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dra. Edna Maria Bonfim-Silva, Dr. Djalma Euzébio Simões Neto e Prof Dr. Ênio Farias França e Silva pelas valiosas sugestões que contribuirão para melhoria deste trabalho.

Aos meus pais, Aldivan Nunes e Rosalina Carlos e irmãos Diego Fernandes e Kayo Rodrigo, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em meus sonhos e me ensinarem que é possível realizá-los, além de me mostrar que perseverança, honestidade e simplicidade são as ferramentas ideais para atingirmos nossas metas.

A minha filha Maria Eduarda Carlos Galdino, pelo amor, carinho, paciência, por ser a minha grande motivação, por ter compreendido a minha ausência nos muitos

momentos desde que ingressei no doutorado e por ter conseguido suportar a saudade durante esses quatro anos.

A toda minha família pelo amor, carinho, incentivo, união, força, apoio e motivação.

Ao meu noivo João Paulo Nunes pelo companheirismo, amor, carinho, apoio, atenção e incentivo.

As minhas grandes e inesquecíveis amigas Ângela J. Fontenele, Mara Suyanne M. Dantas e Rochele S. Vasconcelos, por fazerem parte, sem dúvida alguma, de todos os momentos desta jornada.

Aos amigos da Pós-Graduação Alexandre, Aluísio, Adriana, Betinho, Breno, Carol, Celestino, Cleene, Daniel, Diogo, Eulâmpio, Francimar, Igor, Fábio, Gledson, Gian, Janice, Jéssica, Jerônimo, Jucicléia, Luiz, Mara, Marcelo, Marcos, Max, Miguel, Nadielan, Natália, Patrícia, Raquele, Renato, Robertson, Sávio, Thaís, Valdemir, Vinícius, Wellington, Wilka e Tatiana, pela gentileza, atenção, disposição, alegrias, angústias, conhecimentos compartilhados e agradáveis momentos de convivência.

Aos estagiários Agnis, Alexandre, Eliemerson, Eulâmpio, Emerson, Heitor, Mileny, Nonato e Pratini pela ajuda prestada durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários da EECAC e em especial a Bil, Carpina, Cosmo, Geraldo, Salim, Zé, Vadinho e Vital pela gentileza e disponibilidade em ajudar sempre que preciso.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho. É muito difícil agradecer a todos sem esquecer alguém, mas aos que esqueci meu pedido de perdão e meus agradecimentos sinceros.

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

Resumo.....	xvi
Abstract.....	xvii
CAPÍTULO I – Introdução geral e Revisão de Literatura.....	18
1. Introdução geral.....	19
2. Revisão de literatura.....	21
2.1. Aspectos gerais sobre a cultura da cana-de-açúcar	21
2.2. Irrigação.....	23
2.3. Efeito da adubação nitrogenada sobre as plantas.....	28
2.4. Absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar.....	32
2.5. Análise de crescimento das plantas.....	34
2.6. Função de produção.....	36
Literatura citada.....	38
CAPÍTULO II - Crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio.....	45
Resumo.....	46
Abstract.....	46
Introdução.....	47
Material e Métodos.....	48
Resultados e Discussão.....	53
Conclusões.....	65
Literatura citada.....	65
CAPÍTULO III – Concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.....	69
Resumo.....	70
Abstract.....	70
Introdução.....	71
Material e Métodos.....	72
Resultados e Discussão.....	77
Conclusões.....	87
Literatura citada.....	87
CAPÍTULO IV - Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.....	91

Resumo.....	92
Abstract.....	92
Introdução.....	93
Material e Métodos.....	95
Resultados e Discussão.....	100
Conclusões.....	108
Literatura citada.....	108
CAPÍTULO V- Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio.....	112
Resumo.....	113
Abstract.....	113
Introdução.....	114
Material e Métodos.....	115
Resultados e Discussão.....	121
Conclusões.....	128
Literatura citada.....	129
CAPÍTULO VI- Função de resposta da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio.....	133
Resumo.....	134
Abstract.....	134
Introdução.....	135
Material e Métodos.....	136
Resultados e Discussão.....	145
Conclusões.....	152
Literatura citada.....	152
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	156
APÊNDICE.....	158

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I- Introdução geral e Revisão de literatura

Tabela 1. Compostos nitrogenados e sua participação em alguns processos.....	28
--	----

CAPÍTULO II- Crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento.....	49
--	----

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado.....	51
--	----

Tabela 3. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento.....	52
---	----

Tabela 4. Resumo da ANOVA para as características acúmulo de biomassa seca (ponteiro, folha e colmo), altura de plantas, diâmetro de colmo e número de plantas de cana-de-açúcar submetida a lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N), avaliadas ao longo do ciclo da cultura (DAP).....	54
---	----

CAPÍTULO III - Concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento	73
---	----

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado.....	75
--	----

Tabela 3. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento.....	76
---	----

Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios da concentração de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) nos órgãos da planta (folha, ponteiro e colmo) em função das lâminas de água (L), doses de nitrogênio (N) e dias após o plantio (DAP).....	78
---	----

CAPÍTULO IV - Extração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento.....	95
--	----

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado.....	97
--	----

Tabela 3. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento.....	98
Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios do acúmulo de biomassa seca (BS), nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N).....	100
CAPÍTULO V- Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio	
Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento.....	116
Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado.....	118
Tabela 3. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento.....	119
Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios de produtividade de colmos e açúcar e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N).....	121
CAPÍTULO VI- Função de resposta da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio	
Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento.....	137
Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado.....	139
Tabela 3. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento.....	140
Tabela 4. Parâmetros utilizados para o cálculo do custo do milímetro de água aplicado na cultura da cana-de-açúcar pelo sistema de irrigação por aspersão.....	144
Tabela 5. Preço do fertilizante utilizado na adubação nitrogenada da cana-de-açúcar.....	144
Tabela 6. Resumo da ANOVA e valores médios de produtividade de colmos da cana-de-açúcar, cultivar RB 92579, em função das lâminas de água (L) e doses nitrogênio (N).....	145
Tabela 7. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar, no ciclo de cultivo da cana-planta,	

na região de Carpina-PE nas isoquantas de 110, 130, 150, 170 Mg ha ⁻¹	149
Tabela 8. Análise econômica para a lâmina de água dose de nitrogênio que maximizam o rendimento físico e receita líquida, estimados pelo modelo obtido...	152

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II- Crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental.....	50
Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta.....	51
Figura 3. Acúmulo de biomassa seca do ponteiro da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)	55
Figura 4. Acúmulo de biomassa seca da folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)	56
Figura 5. Acúmulo de biomassa seca do colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio.....	58
Figura 6. Altura de plantas da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de água.....	59
Figura 7. Altura de plantas da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B) ao longo do ciclo da cultura.....	60
Figura 8. Diâmetro de colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de irrigação.....	61
Figura 9. Diâmetro de colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio.....	62
Figura 10. Número de plantas de cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 em função das doses de nitrogênio.....	63
Figura 11. Número de plantas de cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 em função dos dias após o plantio e em cada lâmina de água.....	64

CAPÍTULO III – Concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental.....	74
Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta.....	75
Figura 3. Concentração de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)	79
Figura 4. Concentração de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio	80

Figura 5. Concentração de nitrogênio no colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)	81
Figura 6. Concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada lâmina de água....	83
Figura 7. Concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), cultivar RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio.....	84
Figura 8. Concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), cultivar RB92579, em função dos dias após o plantio.....	86
CAPÍTULO IV – Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio	
Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental.....	96
Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta.....	98
Figura 3. Acúmulo de biomassa seca do colmo, ponteiro e folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	102
Figura 4. Acúmulo de nitrogênio na folha (A), ponteiro (B) e colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio.....	105
Figura 5. Acúmulo de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	106
Figura 6. Acúmulo de fósforo no ponteiro (A) e colmo (B) da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio.....	106
Figura 7. Acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	107
CAPÍTULO V- Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio	
Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental.....	117
Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta.....	118
Figura 3. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	123
Figura 4. Produtividade de açúcar da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	124
Figura 5. °Brix da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água.....	125

Figura 6. Açúcar teórico recuperável da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	126
Figura 7. Teor de sacarose no colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B).....	127
Figura 8. Teor de fibra da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água.....	128

CAPÍTULO VI- Função de resposta da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental.....	138
Figura 2. Precipitação pluviométrica para períodos descendais.....	139
Figura 3. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade B92579, em função das lâminas de água e doses de nitrogênio.....	146
Figura 4. Função de resposta da produtividade da cana-planta em função das lâminas de irrigação e das doses de nitrogênio.....	149
Figura 5. Isoquantas, produtividade máxima e região de produção racional.....	151

LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo: O conhecimento das respostas da cana-de-açúcar à irrigação e adubação nitrogenada é fundamental para melhorar os rendimentos agroindustriais da cultura. Assim, objetivou-se por meio do presente estudo, avaliar o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio no crescimento (altura, diâmetro e número de plantas), acúmulo de biomassa seca e nutrientes, qualidade e produtividade e determinar a lâmina de água e a dose de nitrogênio de máxima eficiência econômica para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). A pesquisa foi realizada em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada em Carpina, Pernambuco. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm) e cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹), arranjados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. Utilizou-se a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579 e o sistema de irrigação por aspersão em linha. A maior dose de nitrogênio aplicada ao solo incrementou as variáveis acúmulo de biomassa seca do colmo, altura e número de plantas de cana-de-açúcar. As doses de nitrogênio aumentaram linearmente o acúmulo biomassa seca de folha e colmo da cana-de-açúcar, sendo os maiores acúmulos (18,38 e 65,43 Mg ha⁻¹) obtidos na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹. Os nutrientes mais acumulados pelas plantas foram nitrogênio>potássio>fósforo, sendo encontrados em maiores quantidades no colmo. As lâminas de água aumentaram o rendimento de colmos e açúcar linearmente, em todas as doses de nitrogênio aplicadas, sendo o máximo rendimento de colmos (186,4 Mg ha⁻¹) e de açúcar (28,89 Mg ha⁻¹) obtidos na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹ e na lâmina de água de 1854 mm. As quantidades de água e nitrogênio obtidas pela função de produção para se obter a máxima renda líquida foram de 1662 mm e 76 kg ha⁻¹, respectivamente. A máxima renda líquida foi alcançada com produtividade de 150 Mg ha⁻¹ de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, cana-planta, lâminas de água; adubação nitrogenada; crescimento, produtividade

IRRIGATION DEPTHS AND NITROGEN DOSES IN SUGARCANE

Abstract: Knowledge of the plant response to irrigation and nitrogen fertilization is fundamental to improving the agro-industrial yield this crop. Thus, it was performed this study in order to evaluate the effect of water depths and nitrogen doses on growth (height, diameter and plant number) , accumulation of dry biomass and nutrients, quality and productivity and to determine the water depth and nitrogen dose of maximum economic efficiency for sugarcane (*Saccharum spp.*). The research was conducted in field, at the Experimental Station of Sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, Pernambuco. The treatments consisted of four water depths (1498; 1614; 1739 and 1854 mm) and five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹), arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. It was used the sugarcane (cane plant), variety RB92579 and the line source sprinkler system. The greater nitrogen dose applied to the soil increased the variables dry biomass accumulation at the stem, height and number of sugarcane plants. Nitrogen doses increased linearly the dry biomass accumulation of leaf and sugarcane stem, being the highest accumulation (18.38 and 65.43 Mg ha⁻¹) obtained at the nitrogen dose of 120 kg ha⁻¹. The nutrients most accumulated by plants were nitrogen > potassium > phosphorus, being found in greater amounts in the stem. The water depths increased stems and sugar the yield linearly at all nitrogen doses applied, the highest yield of stems (186.4 Mg ha⁻¹) and sugar (28.89 Mg ha⁻¹) were obtained in the nitrogen dose of 80 kg ha⁻¹ and depth 1854 mm. The amount of water and nitrogen to obtain the maximum net income were 1662 mm and 76 kg ha⁻¹, respectively. The maximum net income was achieved with a productivity of 150 Mg ha⁻¹ of sugarcane.

Keywords: *Saccharum officinarum*; water depths; nitrogen fertilization; growth, productivity

CAPÍTULO I

Introdução geral e Revisão de literatura

1. Introdução geral

O Brasil destaca-se internacionalmente por seu grande potencial agrícola, ocupando atualmente a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol produzido pela cana-de-açúcar (MAPA, 2015), representando assim grande importância econômica, social e ambiental ao país.

A área cultivada com cana-de-açúcar colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2014/15 está estimada em 9,0 milhões de hectares, distribuídos em todos os Estados produtores conforme suas características. O Estado de São Paulo é o maior produtor com 51,43% (4,7 milhões de hectares), seguido por Goiás com 9,85% (896,1 mil hectares), Minas Gerais com 8,8% (800,9 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 7,63% (693,8 mil hectares), Paraná com 7,1% (642,98 mil hectares), Alagoas com 4,41% (401,3 mil hectares) e Pernambuco com 2,89% (263,0 mil hectares). Esses sete Estados são responsáveis por 92,07% da produção nacional. Os demais Estados produtores possuem áreas menores, com representações abaixo de 3% (CONAB, 2015).

A expansão do mercado de açúcar e etanol leva o setor sucroalcooleiro a projetar a necessidade de aumento da produção de cana-de-açúcar, devido à competitividade do mercado, sendo necessários alguns investimentos. Nesse contexto, os avanços tecnológicos podem contribuir consideravelmente para o crescimento do agronegócio nacional.

A tecnologia da irrigação tem contribuído significativamente para o aumento da produtividade agrícola, incorporando ao sistema produtivo áreas que apresentam problemas relacionados à distribuição das chuvas e reduzindo os riscos de produção devido a períodos de escassez de água.

Em algumas regiões produtoras de cana-de-açúcar, como por exemplo, o Estado de Pernambuco, em que a precipitação se concentra em quatro meses (abril, maio, junho e julho), a capacidade produtiva da cultura torna-se comprometida, bem como a habilidade da planta em absorver de forma eficiente os nutrientes, nesse caso, uma das soluções agrônômicas para aumentar a produtividade agrícola e longevidade dos canaviais é ao uso da irrigação.

Recentemente a irrigação desenvolveu-se acentuadamente, apresentando equipamentos e sistemas para as mais distintas condições, porém o fornecimento de água às culturas via irrigação corresponde a um significativo incremento nos custos de

produção, logo o uso eficiente da água na agricultura irrigada, tem suscitado estudos envolvendo a resposta das culturas à irrigação.

Além do uso de sistemas de irrigação, o fornecimento de nutrientes de forma balanceada e na quantidade exigida pela cultura também é fator determinante no aumento da produtividade e na qualidade final da cana-de-açúcar.

Entre os nutrientes essenciais à planta o nitrogênio é um dos mais requeridos pela cana-de-açúcar. Assim, a demanda da cultura por esse nutriente é suprida muitas vezes com fertilizantes, fazendo com que a participação do nitrogênio no processo produtivo seja parte substancial em relação ao custo total de implantação e manutenção dos canaviais.

No entanto, é de vital importância estudar como a quantidade e a qualidade da cana-de-açúcar produzida é influenciada pela irrigação e adubação nitrogenada. A capacidade das plantas em absorver nutrientes, por exemplo, pode ser decorrente de suas características morfológicas. Acredita-se que a ação conjunta de fatores como variedades, idade da planta, clima, disponibilidade hídrica e de nutrientes, como o nitrogênio, afetam as características das plantas e conseqüentemente o seu crescimento e desenvolvimento.

Porém, são poucos os trabalhos que relatam o efeito da irrigação e adubação nitrogenada no crescimento, acúmulo de nutrientes, produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Dessa maneira, justifica-se o conhecimento das respostas da cultura a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, definindo o manejo a ser praticado, visto que a cultura possa apresentar maior rendimento e um produto de melhor qualidade, proporcionando um maior retorno econômico para os produtores.

Assim, objetivou-se por meio desse trabalho avaliar o crescimento, o acúmulo de nutrientes, a qualidade e a produtividade, além da determinação da melhor lâmina e da dose econômica para cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio.

2. Revisão de literatura

2.1. Aspectos gerais sobre a cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta de ciclo semi-perene, típica de climas tropicais e subtropicais pertencente à família Poaceae, classe Liliopsida, subclasse Commiliniidae e ordem Cyperales (Castro & Kluger, 2001). Segundo Paranhos (1987), a ordem Cyperales, caracteriza-se por apresentar flores pequenas, sem perianto e protegidas por brácteas secas, reunidas em inflorescências. O fruto é seco do tipo cariopse e com semente de endosperma abundante. O caule é um colmo com nós e entrenós (ocos ou cheios). A espécie (*Saccharum* spp) são plantas eretas e rizomatosas e sua inflorescência é formada por racemos arranjados em grandes panículas.

De origem provavelmente asiática, o seu cultivo iniciou-se há cerca de 10.000 anos a.C. em Papua Nova Guiné, expandindo-se na Polinésia. Por volta de 1.000 anos a.C. teve sua expansão na Península Malaia, Indochina e Baía de Bengala. No início do ano 640 d.C. atingiu o Mediterrâneo e no século IX teve-se a primeira descrição do processo da cultura e fabricação do açúcar na Índia (ÚNICA, 2015).

Já no século XII, a cana chegou aos territórios portugueses, onde se tornou centro de pesquisas de novas culturas e aperfeiçoamento de tecnologia de plantio. Nesse período, enquanto algumas terras portuguesas não se mostravam tão favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, outras se mostravam com excelentes tipos de solo e clima para a produção como no caso da Ilha Madeira (Magalhães, 2009).

A introdução da cana-de-açúcar nas Américas ocorreu por volta de 1.493 d.C., na segunda viagem de Cristovão Colombo, levando os colmos de cana-de-açúcar em regiões como a Republicana Dominicana (Figueiredo, 2008). Em território nacional, a cultura chegou por volta de 1.532, introduzida por Martin Afonso de Souza, que fundou o primeiro engenho de açúcar brasileiro (denominado São Jorge dos Erasmos) na capitania de São Vicente, hoje Baixada Santista, litoral de São Paulo, implantando as variedades creola e caiana. Três anos depois, em 1.535, Jerônimo de Albuquerque implantou o primeiro engenho de açúcar no Nordeste, nas proximidades de Olinda, Pernambuco (ÚNICA, 2015).

Hoje o Brasil encontra-se na posição de maior produtor mundial da cultura, seguido da Índia, China e México. No país é considerada uma das principais culturas agrícolas, sendo a principal fonte de matéria-prima para as agroindústrias do açúcar e etanol, além

de representar grande fonte de geração de empregos e renda no meio rural (Cardoso, 2010).

As regiões de cultivo são Sudeste, Centro-Oeste, Sul, Norte e Nordeste, permitindo duas safras por ano. Sua agroindústria gera cerca de um milhão de empregos diretos na área rural e outros 300 mil diretos e indiretos na área industrial, proporcionando, grande contribuição social para o Brasil (SINDAÇÚCAR, 2003). Dessa forma, durante todo o ano, o Brasil produz açúcar e etanol, para os mercados interno e externo (UNICA, 2015).

A produtividade média brasileira para a safra de 2014/2015 está estimada em 77,14 Mg ha⁻¹, 4,6% menor que na safra 2013/14, que foi de 79,74 Mg ha⁻¹. A região Nordeste possui uma área cultivada com cerca de 979,0 mil hectares, com uma produtividade em torno de 56,75 Mg ha⁻¹ e uma produção para a safra 2014/2015 estimada em 55,6 mil toneladas. Em Pernambuco, para a safra 2014/2015, serão cultivados 260,1 mil hectares, nos quais se estima obter uma produção de 14,4 mil toneladas de cana-de-açúcar para todos os usos e produtividade de 56,6 Mg ha⁻¹, a qual se estima que seja utilizada como matéria-prima na produção de aproximadamente, 1,7 mil toneladas de açúcar e mais de 314,9 mil litros de etanol (CONAB, 2015).

A sua importância é devido à sua múltipla utilidade, podendo ser empregada “in natura”, sob a forma de forragem, para alimentação animal, ou como matéria prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e etanol. Seus resíduos também têm grande importância econômica: o vinhoto e a torta de filtro são utilizados como adubos e o bagaço resultante da moagem e a palhada resultante da colheita são utilizados pelas próprias usinas no aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica. O bagaço de cana é o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil, se extrai aproximadamente 280 kg Mg⁻¹ de cana moída. Estima-se que a cada ano sejam produzidos de 5 a 12 milhões de toneladas desse material, correspondendo a cerca de 30% do total da cana moída (Santos, 2005).

Por ser uma planta C4, a cana-de-açúcar é tolerante a altas temperaturas, produzindo em regiões com temperatura média de verão de até 47 °C, desde que irrigada. De acordo com Santana et al. (2007) a cana desenvolve-se bem sob estação quente e longa (com temperaturas médias diárias entre 22 e 30 °C), com incidência de radiação alta durante a fase de maturação e colheita. Em regiões com altas temperaturas, como o Nordeste

brasileiro, a adoção de irrigação, condicionará um ambiente propício ao cultivo da cana-de-açúcar.

Os períodos críticos para o crescimento da cana-de-açúcar, em relação à água, ocorrem no estabelecimento da cultura (emergência e perfilhamento) e no crescimento vegetativo (entre 120 e 240 dias após o plantio - DAP), quando também ocorre o alongamento dos colmos e do sistema radicular. Nesse período a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar atinge os valores máximos (Keating et al., 1999). O ciclo de produção da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases de desenvolvimento ou fenológicas: estabelecimento (com duração de 30 a 60 dias), crescimento vegetativo (150 a 350 dias), formação da produção (70 a 200 dias) e maturação (50 a 70 dias).

Como a cana-de-açúcar passa por diversos estádios ao longo do seu desenvolvimento o aporte de nutrientes também é essencial em todas as fases e o nitrogênio desempenha papel importante desde a brotação até o estabelecimento dos perfilhos. Por ser uma planta que apresenta alta taxa fotossintética, resultando em uma elevada taxa de conversão de energia luminosa em energia química, sem o suprimento adequado de nitrogênio, a produção de fotoassimilados seria menor com prováveis perdas de produtividade (Vitti et al., 2007).

Nos Estados da Paraíba, Alagoas e Pernambuco devido às condições climáticas favoráveis, introdução de variedades mais produtivas, utilização da irrigação e de insumos agrícolas há uma perspectiva de aumento da produção.

A cana-de-açúcar cultivada em regiões situadas entre os meridianos de 35° de latitude Norte e Sul, sem que haja restrição de água e nutrientes e livre de pragas e doenças conseguirá crescer e produzir grande volume de biomassa por unidade de área (produtividade), com alta qualidade de matéria-prima e bons rendimentos industriais (Teodoro, 2011).

2.2. Irrigação

A história da irrigação confunde-se com a do desenvolvimento e prosperidade econômica dos povos. As grandes aglomerações que há mais de 4000 anos se fixaram às margens dos rios Huang Ho e Iang'tse-King no vasto império da China, do Nilo no Egito, do Tigre e Eufrates na Mesopotâmia e do Ganges na Índia, surgiram e cresceram em virtude da utilização de seus recursos hídricos (Bernardo et al., 2006).

Atualmente, dentro do foco empresarial do agronegócio, a irrigação é uma estratégia para elevar a rentabilidade da propriedade agrícola por meio do aumento da produção e da produtividade, de forma sustentável e com maior geração de emprego e renda, com enfoque nas cadeias produtivas (Bernardo et al., 2006).

O objetivo da irrigação é o fornecimento controlado de água às plantas em quantidade suficiente e no momento certo, assegurando produtividade e sobrevivência da plantação. Para Santana et al. (2007) o objetivo principal da irrigação é proporcionar às culturas no momento oportuno, a quantidade de água necessária para o seu crescimento e, assim, evitar a diminuição dos rendimentos, provocada pela falta de água durante as etapas de desenvolvimento sensíveis à escassez.

Existem vários tipos de irrigação na região Nordeste, as quais são diferenciadas pela quantidade de água utilizada, pelo sistema de irrigação utilizado e pela fase do ciclo de produção da cultura em que se trabalha (Souza, 2012).

Segundo Freitas et al. (2009) os tipos de irrigação mais comuns no cultivo da cana-de-açúcar são: irrigação de salvação, irrigação complementar e irrigação plena.

Na irrigação de salvação são aplicadas lâminas de água de 40 a 80 mm após cada corte anual, com intuito de “salvar” a soca. Este tipo de irrigação, em algumas regiões é de fundamental importância para a viabilidade econômica da cana-de-açúcar.

A irrigação complementar é caracterizada por ser uma complementação hídrica superior à salvação com lâminas entre 200 e 300 mm ano⁻¹. Nesse caso, faz-se necessário realizar estudo climático da região, para baseado no balanço-hídrico, definir estratégia de decisão de irrigação.

A irrigação plena supre toda a demanda hídrica da cultura e é utilizada devido à busca pela otimização da produtividade. Nesse caso, é fundamental que haja disponibilidade de água e realização de estudo climático da região, para baseado-se no balanço-hídrico, definir estratégia de decisão de irrigação. Para implantar essa estratégia de produção, é fundamental realizar estudo prévio da viabilidade dos projetos de irrigação, tipo de sistemas, autonomia de lâmina diária, custo da energia elétrica, elevação de produtividade e longevidade esperada.

Na irrigação sem déficit, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água, capaz de suprir totalmente o déficit hídrico e de proporcionar a máxima produção por unidade de área, evitando perda de produtividade ou de qualidade do produto por deficiência de água (Frizzone, 2007).

Porém, a irrigação sem déficit em cana-de-açúcar ainda é pouco difundida, mas seus benefícios para a cultura são vários (Dalri & Cruz, 2008). Matioli et al. (1998) definiram os benefícios da irrigação em cana-de-açúcar em diretos e indiretos. Os benefícios diretos consistem nos aumentos de produtividade agrícola e longevidade das soqueiras e os benefícios indiretos são aqueles relacionados com a redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionados, por exemplo, pela dispensa de arrendamentos de terras. Soma-se também como benefício indireto, a redução com o transporte da cana, no caso de área arrendada mais distante da unidade industrial do que a área irrigada.

De acordo com Inman-Bamber & Smith (2005) a disponibilidade hídrica plena favorece o desenvolvimento da planta, sobremaneira no estágio de grande crescimento, o que promove melhor aproveitamento da radiação solar e realização da fotossíntese.

A aplicação de água ao solo por meio da tecnologia da irrigação pode ser feita por diversos métodos. A irrigação por aspersão, por exemplo, é um deles.

Dentre o sistema de irrigação por aspersão convencional, Hanks et al. (1976) desenvolveram uma metodologia (utilizada na presente pesquisa) que permite o estudo das funções de produção à aplicação de água sob condições de diferentes lâminas de irrigação (Borges, 2005).

Essa metodologia consta do arranjo dos aspersores em uma única linha, espaçados de modo que haja uma sobreposição dos seus jatos d'água promovendo uma maior precipitação junto à linha de aspersão e um gradiente decrescente ao longo da direção perpendicular à linha lateral, sendo esse efeito denominado de “distribuição triangular da precipitação”. A localização das parcelas experimentais ao longo da direção perpendicular à linha de aspersores permite a obtenção de diferentes lâminas aplicadas, simulando, desse modo, diferentes lâminas de irrigação, realizadas por um sistema convencional de aspersão (Monteiro et al., 2010).

Segundo Ferreira (2007), as vantagens que o sistema “line source” oferece são: simplicidade de instalação, operação, economia de área, equipamento e mão de obra, permite a instalação de maior número de tratamentos em menor área e melhor visualização do efeito do déficit hídrico imposto às culturas. Como limitações apresentam a impossibilidade de casualização das lâminas de água aplicadas, o efeito do vento no padrão de distribuição da água (em regiões com valores elevados de velocidade do vento), a utilização da irrigação com a mesma frequência em todas as

parcelas e a possibilidade de escoamento superficial, caso a seleção do aspersor não seja adequada.

Os critérios para a aplicação de água por um sistema de aspersão em linha são a obtenção do efeito “triangular” e que os aspersores estejam espaçados ao longo da linha de fornecimento de água. Além disso, os aspersores individuais devem ser os mesmos e cada um produzir um perfil em forma de triângulo quando operar em baixas condições de vento. O espaçamento ideal é aquele que apresente (Hanks et al., 1976):

- 1) Uniformidade ao longo da área que é ótima com aspersores espaçados de aproximadamente 10 % do diâmetro molhado ou menos e razoável para espaçamentos de 20-25% do diâmetro molhado.
- 2) Taxa de aplicação que varie inversamente com o espaçamento entre os aspersores.
- 3) Compacto para minimizar o tamanho da bordadura

O sistema “line-source” tem sido utilizado em pesquisas para estudar o efeito de lâminas de irrigação sobre a produtividade das culturas, tais como as de Monteiro (2010), Alencar et al. (2009) e Mota et al. (2011) devido à sua simplicidade e facilidade de operação.

Em áreas produtoras de cana-de-açúcar, algumas pesquisas vêm sendo conduzidas com o objetivo de detectar os benefícios advindos do uso da irrigação.

Oliveira et al. (2011a) avaliando a produtividade de colmos e de açúcar de variedades de cana-de-açúcar submetidas ao regime de sequeiro (1141,4 mm) e à irrigação plena (1396,6 mm) verificaram que a produtividade de colmos das variedades RB92579, RB72454 e SP81-3250 apresentou ganhos superiores a 180%, com uso da irrigação e que a irrigação promoveu aumentos na produtividade de açúcar superiores a 200% nas variedades RB92579 e RB943365.

Dantas Neto et al. (2006) avaliaram a resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação na Paraíba e concluíram que a irrigação influenciou a fase inicial de crescimento e o início do máximo desenvolvimento da primeira soca. Para os parâmetros de crescimento as lâminas de irrigação influenciaram com um comportamento linear positivo e para a pol da cana-de-açúcar as lâminas apresentaram comportamento quadrático.

Dalri & Cruz (2008) estudando a produtividade da cana-de-açúcar através da irrigação por gotejamento subsuperficial verificaram que as maiores produtividades de cana-de-açúcar obtidas foram nas parcelas irrigadas. Nos dois ciclos estudados (soca e ressoça), o ganho de produtividade em relação à testemunha foi 43,5% na soca e 67,2% na ressoça, evidenciando que a irrigação plena elevou significativamente a produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

Farias et al. (2008) avaliando os índices de crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar, variedade SP79-1011, em regime irrigado e de sequeiro no Estado da Paraíba verificaram que a taxa máxima de acúmulo de biomassa foi de 0,7169 g dia⁻¹ para a cana irrigada e de 0,6974 g dia⁻¹ para a cana em regime de sequeiro.

Machado et al. (2009) avaliando as respostas biométricas e fisiológicas da cana-de-açúcar ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas, para os genótipos IACSP 94-2094 e IACSP 96-2042 observaram a suscetibilidade ao déficit hídrico pela redução de biomassa seca do colmo e do conteúdo de sólidos solúveis no caldo.

Barbosa et al. (2013) avaliando o efeito da irrigação na produção de colmos da cana-de-açúcar em Guaira – SP verificaram que o tratamento irrigado apresentou a maior produção de colmos com valor médio de 179,6 Mg ha⁻¹.

Oliveira et al. (2014) estudando o efeito de quatro níveis de irrigação sobre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar em Rio Verde – GO, verificaram um aumento de 0,4 % na produtividade de colmos a cada reposição de 1 % de água, equivalente 0,7 Mg ha⁻¹ de colmos. A máxima produtividade obtida foi de 178 Mg ha⁻¹ com uma irrigação equivalente a aplicação a 504 mm de água.

Um suprimento adequado de água é essencial para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar que tem uma demanda em torno de 1200 mm ano⁻¹ (Blackburn, 1984). No entanto, muitos produtores estão adotando a tecnologia da irrigação sem um planejamento adequado, sem considerar as necessidades hídricas, sem manejar adequadamente a água de irrigação e sem conhecer as peculiaridades fisiológicas da cana irrigada (Dantas Neto et al., 2006).

Para o crescimento sustentado do cultivo irrigado da cana-de-açúcar nas diversas regiões, tanto o poder público quanto a indústria sucroalcooleira e os produtores devem estabelecer programas com ações integradas e sequenciais, demandando dos governos – Federal, Estadual e Municipal - uma política regional de apoio financeiro à pesquisa de irrigação em cultivares de cana de alto potencial produtivo. Sendo que as principais características desejáveis nas variedades de cana quando irrigada são: elevada

produtividade de colmo e alto teor de sacarose; precocidade e longevidade das socas; baixo índice de tombamento; boa resistência a pragas e doenças e facilidade para colheita mecanizada (Bernardo, 2006).

2.3. Efeito da adubação nitrogenada sobre as plantas

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial, e em geral, o que as plantas necessitam em maior quantidade. Segundo Epstein & Bloom (2006) o nitrogênio é um nutriente essencial a vida vegetal, pois se constitui de estruturas do protoplasma da célula, da molécula de clorofila, dos aminoácidos, proteínas e de várias vitaminas, além de influenciar as reações metabólicas das plantas. Proporciona o aumento do desenvolvimento vegetativo e do rendimento da cultura, além disso, promove muitas modificações morfofisiológicas na planta e está relacionado à fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular e ao desenvolvimento e atividade das raízes.

Na Tabela 1 estão relacionados os principais compostos nitrogenados que se encontram nas plantas e os processos que participam:

Tabela 1. Compostos nitrogenados e sua participação em alguns processos

Estrutura	Processo	Constituinte ou ativador de enzimas
Aminoácidos e proteínas	Absorção iônica	Todos (constituintes)
Bases nitrogenadas e	Fotossíntese	
Ácidos nucléicos	Respiração	
Enzimas e coenzimas	Sínteses em geral	
Vitaminas	Multiplicação e diferenciação	
Glico e lipoproteínas	celular	
Pigmentos		

Fonte: Malavolta, 2006.

Com exceção da água, o nitrogênio é considerado o fator mais limitante ao crescimento das plantas (Franco & Dobereiner, 1994). Depois do carbono, hidrogênio e oxigênio, é o elemento mais abundante no universo, compondo aproximadamente 80% da atmosfera. Na atmosfera, apresenta-se em grande quantidade como elemento químico estável, não assimilável pela maioria dos seres vivos, requerendo sua transformação para uma forma combinada que possibilite sua assimilação.

Na natureza, as plantas podem ter sua necessidade de nitrogênio suprida basicamente de duas maneiras. O nitrogênio pode ser absorvido do solo nas formas de íons nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+), ou pela fixação biológica do nitrogênio (FBN). A taxa e a

quantidade de nitrogênio absorvido e assimilado durante o ciclo da planta dependem da presença de carregadores específicos na membrana plasmática, da atividade das enzimas envolvidas no seu ciclo, da disponibilidade de energia necessária para os processos de absorção e assimilação e do estágio de desenvolvimento da planta (Bredemeier & Mundsrock, 2000).

As raízes dos vegetais absorvem o nitrato (NO_3^-) da solução do solo por meio de cotransportadores de baixa e alta afinidade (Miller et al., 2007) e os vegetais assimilam a maior parte do nitrato em compostos orgânicos. A primeira etapa do processo é a redução do nitrato a nitrito no citosol, uma reação que envolve a transferência de elétrons, através de uma enzima denominada nitrato redutase (Equação 1).



O nitrito (NO_2^-) formado na primeira etapa do processo é um íon altamente reativo e potencialmente tóxico. As células vegetais transportam rapidamente o nitrito do citosol para o interior dos cloroplastos nas folhas e dos plastídeos nas raízes. Nessas organelas, a enzima nitrito redutase reduz o nitrito a amônio em uma reação que envolve a transferência de seis elétrons (Equação 2).



Quando as raízes recebem quantidades de nitrato pequenas, este se reduz nesses órgãos. À medida que o suprimento aumenta, uma proporção maior do nitrato absorvido é translocado para as partes aéreas onde será assimilado (Taiz & Zeiger, 2013).

Células vegetais convertem rapidamente o amônio absorvido pela raiz, produzido por assimilação do nitrato, ou ainda originário da fotorrespiração, em aminoácidos, evitando assim toxicidade do amônio. A via primária para essa conversão envolve as ações sequenciais das enzimas glutamina sintetase e glutamato sintase, localizadas no citosol e nos plastídeos das raízes ou nos cloroplastídeos. Os aminoácidos gerados pela ação dessas enzimas por sua vez servem de substrato para reações de transaminação e conseqüentemente para a produção de todos os outros aminoácidos necessários à síntese de proteínas (Taiz & Zeiger, 2013).

Os humanos e a maioria dos animais não sintetizam certos aminoácidos como a histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptofano, valina

e arginina, tendo que obter esses aminoácidos essenciais a partir da dieta. Por outro lado, as plantas sintetizam quase todos os vinte aminoácidos comuns nas proteínas (Taiz & Zeiger, 2013).

A assimilação do nitrogênio é considerado um processo dispendioso energeticamente às plantas, razão pelo qual ocorre predominantemente nas folhas, centro de síntese de ATP e agentes redutores. O processo de incorporação do nitrogênio compete com a fotossíntese por massa e energia, consumindo 12 ATPs para cada nitrogênio assimilado pela planta (Bloom et al., 1992).

O transporte de nitrogênio para a planta e dentro desta é fundamental à sua sobrevivência e crescimento, e no caso da cana-de-açúcar, as formas de nitrogênio absorvidas pelas raízes podem ser usadas pelas próprias células radiculares para sintetizarem compostos orgânicos, ou podem ser diretamente transportadas, por fluxo de massa das raízes à parte aérea, onde ocorre a sua assimilação (Silva & Casagrande, 1983).

Na cultura da cana-de-açúcar o nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade e essencial para o crescimento vigoroso, desenvolvimento vegetativo, rendimento e qualidade da cana.

Participa da síntese de proteínas estruturais e enzimáticas, as quais são responsáveis pela síntese de outras proteínas e componentes da estrutura celular, como carboidratos, lipídeos e pigmentos. Esses compostos constituem a estrutura da planta e são requeridos para o crescimento celular e dos órgãos (Lawlor, 1995), promovendo um rápido desenvolvimento da planta, especialmente pelo aumento do número de pares de folhas e número de nós (Nazareno et al., 2003), além de ser o maior responsável pela vegetação, que se reflete no índice de área foliar. A produção de gemas vegetativas e floríferas está relacionada com o suprimento desse elemento. Perfilhamento e vegetação da cana-de-açúcar também estão relacionados ao nitrogênio (Malavolta, 2006).

A cana está enquadrada entre as gramíneas de maior eficiência fotossintética, ou seja, é classificada entre as plantas de metabolismo C₄, assim como milho, sorgo e outras culturas. As plantas com esse metabolismo apresentam maior eficiência fotossintética, em razão da abundância de cloroplastos dispostos em duas camadas na folha. Quantitativamente, isto propicia à cana-de-açúcar, em relação às plantas de metabolismo C₃, uma taxa de crescimento e eficiência do uso da água duas a três vezes maiores (Casagrande, 1996).

O nitrogênio como nutriente responsável pelo crescimento das plantas e produção de novas células e tecidos tem importante função como ligante de íons metálicos, principalmente na forma de anéis heterocíclicos, como por exemplo, na clorofila, que é um pigmento verde encontrado nas folhas e que captura a energia solar.

A clorofila combina $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ formando açúcares, que a planta necessita para o seu crescimento. A clorofila é composta de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e magnésio (Mg). As plantas deficientes em nitrogênio apresentarão folhas amareladas, redução no perfilhamento, folhas menores devido ao menor número de células, crescimento reduzido, baixo teor de clorofila e redução na síntese de proteínas. (Malavolta, 2006). Sua ausência também bloqueará a síntese de citocinina, hormônio responsável pelo crescimento das plantas, causando redução do seu tamanho (Mengel & Kirkby, 2001).

Segundo Taiz & Zeiger (2013) a escassez de nitrogênio retarda o crescimento das plantas e diminui a capacidade fotossintética das folhas, causando menor número de entrenós. Sua deficiência inibe o crescimento da planta, redução na área foliar, assim, provoca uma diminuição da fotossíntese, reduzindo a produção e qualidade da cana. A aplicação de fertilizantes nitrogenados é fundamental na cultura, já que o cultivo da cana requer uma grande quantidade de nitrogênio como nutriente para produzir grande quantidade de biomassa (Thorburn et al., 2005).

Por outro lado, o excesso de nitrogênio também pode ser prejudicial à planta, pois causa maior crescimento da parte aérea em relação ao sistema radicular, deixando a planta mais suscetível à deficiência hídrica e de nutrientes, principalmente fósforo (P) e potássio (K). Pode, ainda, reduzir a fotossíntese por aumento no auto-sombreamento e aumentar a susceptibilidade às doenças. No caso da cana-de-açúcar, os colmos armazenam menos açúcar visto que os esqueletos carbônicos são consumidos para fazer mais vegetação (Malavolta, 2006).

Então, o fornecimento adequado de nitrogênio é essencial, visto que esse nutriente influencia não só o crescimento e desenvolvimento das plantas, mas também a qualidade dos produtos agrícolas.

Segundo Malavolta (2006), o nitrogênio em balanço com o potássio, aumenta o teor de sacarose da cana-de-açúcar, já o excesso de nitrogênio na época da colheita diminui o teor de sacarose e aumenta o de açúcares redutores. Silva et al. (2009a) relataram que a percentagem de sacarose tende a diminuir com o aumento da adubação, já que o excesso de nitrogênio traz efeito deletério ao rendimento de sacarose. Para Orlando

Filho (1983) na cana-de-açúcar o nitrogênio assume o papel principal no aumento do comprimento do colmo, fazendo com que a parede celular fique mais delgada, diminuindo a porcentagem de fibra na planta.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de estudar o efeito da adubação nitrogenada sobre o crescimento e a qualidade cultura da cana-de-açúcar. Oliveira et al. (2011b) avaliando o efeito de seis doses de nitrogênio no perfilhamento da cana-de-açúcar verificaram que o número de colmos aumentou com o incremento das doses de nitrogênio, sendo a maior média (13,33 colmos por metro) encontrada no maior nível (71 kg ha⁻¹ de nitrogênio). Segundo o autor, o aumento no número de colmos com a aplicação de nitrogênio é justificada pelo importante efeito do nitrogênio na taxa de perfilhamento das culturas (Malavolta, 2006) onde relata que a aplicação de nitrogênio melhora o perfilhamento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar (folha mais longa, larga, de coloração verde intensa e menos áspera).

Silva et al. (2009b) estudando o efeito de diferentes níveis de adubação de cobertura, sobre os parâmetros de crescimento da terceira folha de cana (variedade SP79-1011) no município de Capim, PB verificaram que as doses influenciaram o diâmetro do colmo. O menor diâmetro médio do colmo obtido no experimento foi de 2,16 cm obtido na dose de nitrogênio de 68 kg ha⁻¹ e o maior de 2,44 cm obtido na dose de nitrogênio de 156 kg ha⁻¹.

Wiedenfeld & Enciso (2008) realizaram um trabalho no Sul do Texas para avaliar a resposta da aplicação de nitrogênio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) no crescimento da cana-de-açúcar e observaram que a aplicação de fertilizante nitrogenado influenciou a altura de colmos e o índice de área foliar da cana-de-açúcar. A altura de colmos apresentou uma resposta quadrática aos níveis de nitrogênio aplicados. O índice de área foliar também aumentou de maneira quadrática com o incremento das doses de nitrogênio, sendo o maior índice (2,44) obtido na dose de nitrogênio de 104 kg ha⁻¹.

2.4. Absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar

A marcha de absorção de nutrientes fornece informação sobre a exigência nutricional das plantas em seus diferentes estádios fenológicos, sinalizando as épocas mais propícias à adição dos nutrientes (Granjeiro & Cecílio Filho, 2004).

O conhecimento do processo de absorção de nutrientes de uma espécie ou cultivar oferece subsídios para um manejo adequado da solução nutritiva, pois mostram os picos

de demanda por parte da planta, alterações nas taxas de absorção durante o ciclo da cultura e a proporção relativa entre os nutrientes no material seco.

Malavolta et al. (1997) citam que o interesse de se conhecer a marcha de absorção de nutrientes se prende aos seguintes fatos: determinar as épocas em que os elementos são mais exigidos e em que quantidade, portanto, a adubação deve fornecer a possibilidade de se corrigir deficiências eventuais e avaliação do estado nutricional por meio da variação na composição de órgãos representativos. Dessa forma, há necessidade crescente de obter parâmetros de avaliação do estado nutricional da planta a fim de corrigir possíveis deficiências ou toxidez por excesso.

Segundo Prata (1999), os estudos de fertilidade dos solos e uso das práticas de adubação devem se fundamentar nas necessidades nutricionais de cada cultura, evidenciados por meio de curvas de absorção de nutrientes e de acúmulo de biomassa, durante o crescimento da planta. Com tais estudos é possível determinar o período de maior demanda de nutrientes minerais essenciais, associados à produção de biomassa, obtendo informações seguras sobre épocas mais adequadas de aplicação e quantidades requeridas de fertilizantes.

Entretanto, a quantidade e a proporcionalidade dos nutrientes absorvidos pelas plantas são funções de características intrínsecas do vegetal, como, também, dos fatores externos que condicionam o processo. Em uma espécie, a capacidade em retirar os nutrientes do solo e as quantidades requeridas varia não só com a cultivar, mas também com o grau de competição existente. Variações nos fatores ambientais como temperatura e umidade do solo podem afetar o conteúdo de nutrientes minerais nas folhas consideravelmente. Esses fatores influenciam tanto a disponibilidade dos nutrientes como a absorção destes pelas raízes e, conseqüentemente, o crescimento da parte aérea. Por outro lado, o acúmulo e a distribuição dos nutrientes minerais na planta dependem de seu estágio de desenvolvimento (Goto et al., 2001; Marschner, 2012).

No Brasil, trabalho sobre marcha de absorção de nutrientes na cultura da cana-de-açúcar foi publicado por Moura Filho (2006), que verificou extração total média por tonelada de colmo em três variedades de cana-de-açúcar de 0,83 kg de nitrogênio, 0,20 kg de fósforo, 1,08 kg de potássio, 0,24 kg de cálcio, 0,24 kg de magnésio e 0,26 kg de enxofre.

Barbosa et al. (2002) estudando o acúmulo e alocação de N, P, K, Ca e Mg na variedade de cana-de-açúcar RB72454, durante todo o ciclo de produção, constataram que as maiores taxas de acúmulo de nutrientes ocorreu aos 332 e 370 DAP, com

quantidades de 1,42; 0,75; 1,94; 0,84 e 0,51 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Oliveira et al. (2010) estudando a exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena observaram uma exportação média de N, P, K, Ca e Mg pelo colmo das variedades irrigadas de 92, 15, 188, 187 e 66 kg ha⁻¹, correspondendo, respectivamente, a 51, 60, 58, 83 e 76 % de todo o nutriente extraído na parte aérea da cana-planta.

Franco et al. (2007) estudando acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio observaram que o acúmulo de macronutrientes na parte aérea da cultura seguiu a seguinte ordem decrescente de grandeza: K > N > Ca > S > Mg > P. Entretanto, dos nutrientes avaliados na parte aérea da cultura, apenas o nitrogênio (N) e o enxofre (S) foram acumulados, significativamente, em maiores quantidades em função do aumento das doses de nitrogênio aplicadas, tendo este acúmulo comportamento linear.

O nitrogênio e o potássio fazem parte dos nutrientes mais requeridos e devem ser aplicados de forma e quantidade adequadas e na época correta. Embora o nitrogênio seja apontado como o nutriente mais importante para aumentar as produções das plantas, o potássio apresenta maior relevância em estabilizá-la, além de exercer efeito na qualidade (POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA, 1990).

2.5. Análise de crescimento das plantas

A análise de crescimento vegetativo permite conhecer diferenças funcionais e estruturais entre plantas, como ramificações, folhas, flores, frutos e raízes; possibilita também avaliar o crescimento total. Estas medidas podem fornecer informações importantes quanto à fenologia e são, muitas vezes, usadas para detectar diferenças dos efeitos entre os tratamentos estabelecidos (Benicasa, 2003).

De acordo com Ramos (2002) o crescimento de plantas, sob diferentes condições ambientais, pode ser mensurado de diversas maneiras: lineares, superficiais, peso e número de unidades estruturais. Entre as dimensões lineares é possível citar a altura de planta, comprimento de ramificações, diâmetro de caules, entre outras.

A avaliação de algumas variáveis morfológicas das plantas, como altura, diâmetro, plantas m⁻¹, área foliar e produção, tornam possível a identificação da capacidade produtiva de diferentes variedades e a investigação dos efeitos do manejo da cultura.

Adicionalmente, a análise de crescimento pode ser realizada por meio de avaliações sequenciais do acúmulo de biomassa seca e/ou fresca ou, ainda, dos índices fisiológicos dela obtidos (Gava et al., 2001).

A construção da curva de crescimento de plantas consiste na medição destrutiva de plantas, obtendo a biomassa seca dos órgãos da planta (Hunt, 1990), além da análise química, essencial em estudos de nutrição e adubação. O conhecimento da quantidade de nutrientes acumulados na planta, em cada estágio de desenvolvimento, fornece subsídios para auxiliar a elaboração de um programa para adubação da cultura. Desse modo, uma adubação equilibrada, proporciona nutrição adequada, contribuindo para a máxima expressão do potencial da espécie, além de fornecer dados para a construção de modelos matemáticos descritores do crescimento.

A análise de crescimento da cana-de-açúcar também permite identificar as fases de desenvolvimento da cultura nos diferentes ambientes de cultivo, proporcionando sua condução, de forma que o máximo desenvolvimento coincida com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, o que leva a cultura a expressar todo o seu potencial genético, além de permitir manejar diferentes formas de adubação e tratos culturais (Stone et al., 1999). O crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas: fase inicial, em que o crescimento é lento; fase de crescimento rápido, com surgimento e alongamento de entrenós, em que se acumulam cerca de 75% da biomassa seca total, e fase final, em que novamente há crescimento lento (Oliveira et al., 2007).

Nos canaviais brasileiros, como na Zona da Mata do Nordeste, a má distribuição pluviométrica comumente observada, restringe o crescimento da cultura e proporciona impactos negativos de produtividade e qualidade dos canaviais (Wiedenfled & Enciso, 2008) sendo imprescindível manejar a cultura adequadamente, em busca de maiores produções por unidade de área.

Oliveira et al. (2010) observaram que a disponibilidade hídrica promovida pela irrigação plena durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, proporciona diferença no perfilhamento, crescimento em altura e acúmulo de matéria seca entre variedades.

Moura et al. (2005) pesquisando sobre o crescimento da cultura da cana-de-açúcar (segunda folha), variedade SP79-1011, sob níveis de irrigação, constataram que o regime irrigado proporcionou aumento de 25% no comprimento dos colmos em relação ao regime sem irrigação.

Como o nitrogênio é também fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, por ser constituinte de todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, participando direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos, é também de suma importância manejá-lo corretamente, uma vez que a sua carência refletirá diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (Malavolta et al., 1997)

Franco et al. (2007), avaliando o efeito de doses de nitrogênio no ciclo da cana-planta, afirmaram que o segundo estágio de desenvolvimento é o de maior acúmulo de biomassa pela cana-de-açúcar.

Segundo Faroni (2008) a adubação nitrogenada da cana-planta interfere no acúmulo de biomassa da cana-soca, fazendo com que diminuam as diferenças de acúmulo entre os tratamentos com doses de nitrogênio aplicadas na soqueira.

2.6. Função de produção

A relação entre as quantidades utilizadas de um conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que se pode obter de um determinado produto é um conceito básico de função de produção (Frizzone, 1993).

A partir da função de produção é possível obter a solução ótima para uma determinada combinação insumo-produto, que possa maximizar a receita líquida do produtor. O uso das funções de resposta permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes, obtendo-se o máximo do produto com determinado custo de produção (Castro et al. 2007).

O conhecimento das funções de produção ou superfícies de resposta é fundamental para auxiliar nas decisões, haja vista que estas funções possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade e escolher as soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo assim o manejo racional em bases técnicas economicamente viáveis (Bernardo, 1998).

Segundo Figueiredo et al. (2008) podem ser identificadas na literatura alternativas para se definir o manejo ótimo da água de irrigação podendo-se classificá-las em dois grupos. A primeira diz respeito ao aumento da eficiência técnica, ou seja, maximizar a produtividade por unidade de volume de água aplicada. Nesse caso, o aumento da eficiência técnica pressupõe produzir o máximo com menor uso de água, sendo este o objetivo. O fator fertilizante, também pode ser otimizado, possibilitando sem maiores riscos aumentar a utilização dos demais insumos de produção e, por consequência,

obterem-se maiores produtividades com uma melhor combinação dos insumos empregados (Dantas, 2010).

A segunda alternativa está relacionada ao aumento da eficiência econômica, que significa obter o máximo retorno econômico por unidade de área cultivada ou por unidade de volume de água utilizada, dependendo da escassez relativa desses recursos. Enquanto a disponibilidade de terra for escassa em relação à água, o objetivo deverá ser selecionar a lâmina de irrigação que maximiza a receita líquida por unidade de área. Por outro lado, sendo a água restrita em relação à terra, o objetivo deverá ser maximizar a receita líquida por unidade de volume de água. Em um planejamento agrícola com irrigação geralmente a maximização da receita líquida pode estar sujeita a limitações de água, terra e mercado.

Na agricultura irrigada, a função de produção engloba um segmento de retornos crescentes para pequenas quantidades do fator variável e um segmento onde prevalece a lei da produtividade marginal decrescente a partir da qual, os acréscimos observados serão cada vez menores (Aguiar, 2005).

Trabalho conduzido na região Norte Fluminense, RJ por Sousa et al. (1999) evidencia a importância da irrigação na produtividade da cana-de-açúcar. À medida que se aumentou a quantidade de água aplicada (irrigação + precipitação), houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada. Quando se utilizou a função de produção, os incrementos máximos de produtividade foram estimados em 68 t ha^{-1} , para a variedade RB72454.

Segundo Frizzone et al. (2007) são duas as estratégias para o planejamento da irrigação: (a) suprir totalmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou irrigação suplementar – atendimento pleno da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação sem déficit, e (b) suprir parcialmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou suplementar – atendimento parcial da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação com déficit.

Na irrigação sem déficit, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água, capaz de suprir o déficit hídrico e de proporcionar a máxima produção por unidade de área, evitando perda de produtividade ou de qualidade do produto por deficiência de água (Frizzone, 2007).

Portanto, o conhecimento das funções de produção ou superfícies de resposta é fundamental para auxiliar nas decisões, haja vista que essas funções possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade, e escolher as soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo assim o manejo racional em bases técnicas economicamente viáveis (Bernardo, 1998).

LITERATURA CITADA

- Aguiar, J. V. de. A função de produção na agricultura irrigada. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2005. 196p.
- Alencar, C. A. B. de; Oliveira, R. A. de; Cóser, A. C.; Martins, C. E.; Cunha, F. F. da; Figueiredo, J. L. A.; Leal, B. G.; Cecon, P. R. Cobertura do solo e altura de capins cultivados sob pastejo com distintas lâminas de irrigação e estações anuais. *Bioscience Journal*, v. 25, n. 1, p. 113-121, 2009.
- Barbosa, E. A.; Arruda, F. B.; Pires, R. C. M.; Silva, T. J. A.; Sakai, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.6, p.588–594, 2013.
- Barbosa, M. H. P.; Oliveira, M. W.; Silveira, L. C. I.; Damasceno, C. M.; Mendes, L. C. Acúmulo e alocação de nutrientes pela RB72454 no ciclo da cana-planta. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 8., Recife, 2002. Anais... Recife, Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2002. p.264- 267.
- Benicasa, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41p.
- Bernardo, S. Irrigação e produtividade. In: Farias, M. A.; Silva, E. L.; Vilelo, L. A. A.; Silva, A. M. (Ed). Manejo de irrigação. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, cap.1, p.117-132, 1998.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: Ufv, 2006.
- Blackburn, F. Sugarcane. Singapura: Longman Group Limited, 1984. 414p.
- Bloom, A. J.; Sukrapanna, S. S.; Warner, R. L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, v. 99, p. 1294-1301, 1992.

- Borges, E. M. Rendimento, qualidade e precocidade de gladiolo irrigado no recôncavo Baiano. Dissertação (Mestrado) Escola de Agronomia - Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2005.
- Bredemeier, C.; Mundstock, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, v.30, n.2, p. 365- 372, 2000.
- Cardoso, M. O. Relações entre a nematofauna e o grau de compactação do solo em área cultivada com cana-de-açúcar e em remanescente de floresta atlântica. Dissertação (Mestrado) -: Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2010, 68 p.
- Casagrande, A. A. Crescimento da cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos, v.14, n.5, p.7-8, 1996.
- Castro, P. R. C.; Kluger, R. A. (Ed.). *Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendazeiro e oliveira*. Cosmópolis: Stoller do Brasil. 2001. 138 p.
- Castro, R. P.; Costa, R. N. T.; Silva, L. A. C.; Gomes Filho, R. R. Modelos de decisão para otimização econômica do uso da água em áreas irrigadas da Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste – CE. *Irriga*, v. 12, n. 3, p. 377-392, 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2014/2015. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em agosto de 2014.
- Dalri, A. B.; Cruz, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. *Engenharia Agrícola*, v.28, n.3, p.516-524, 2008.
- Dantas, D. da C. Função de produção do meloeiro em resposta à fertirrigação nitrogenada e potássica na microrregião de Mossoró. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semiárido. Mossoró, 2010.
- Dantas Neto, J.; Figueredo, J. L. da C.; Farias, C. H. de A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A.V. de. 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.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2.ed. Londrina: planta, 2006.
- Farias, C. H. A. de; Fernandes, P. D.; Azevedo, H. M. de; Dantas Neto, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 356-362, 2008.

- Faroni, C. E. Eficiência agronômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008. 190p.
- Ferreira, V. M. Definição de Parâmetros para estimativa de risco climático no consórcio milho x feijão-caupi. 2007. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina-PI, 2007.
- Figueiredo, P. Breve história da cana-de-açúcar e o papel do Instituto Agronômico no seu estabelecimento no Brasil. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Andrade Landell, M. G. de. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 31-45.
- Franco, A. A.; Dobereiner, J. A. A biologia do solo e a sustentabilidade dos solos tropicais. *Summa Phytopathology*, v.20, p. 68-74, 1994.
- Franco, H. C. J.; Vitti, A. C.; Faroni, C. E.; Cantarella, H.; Trivelin, P. C. O. Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma de áreas com cana-de-açúcar. *STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 25, n. 6, p. 32-36, 2007.
- Freitas, R. G.; Baffa, D. C. F.; Brasil, R. P. C. Aumento na produtividade da cana-de-açúcar através da irrigação. *Nucleus*, Edição Especial, 2009.
- Frizzone, J. A. Funções de resposta das culturas à irrigação. Piracicaba: ESALQ-USP, 1993. 42 p. (Série didática, 6).
- Frizzone, J. A. Planejamento da Irrigação com Uso de Técnicas de Otimização. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.1, n.1, p.24-49, 2007.
- Grangeiro, L. C.; Cecílio Filho, A. B. Qualidade de frutos de melancia em função de fontes e doses de potássio. *Horticultura Brasileira*, v. 22, n. 3, p. 647-650. 2004.
- Gava, G. J. C.; Trivelin, P. C. O.; Oliveira, M. W.; Penatti, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.11, p.1347-1354, 2001.
- Goto, R.; Guimarães, V. R.; Echer, M. M. Aspectos fisiológicos e nutricionais no crescimento e desenvolvimento de plantas hortícolas. In: Follegati, M. V.; Casarini, E.; Blanco, F. F.; Brasil, R. P. C.; Resende, R. S. *Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças*. Guaíba: Agropecuária, 2001, v. 2, p. 241 – 268.
- 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.
- Hunt, R. *Basic growth analysis*. London: Unwin Hyman, 1990. 112p.

- Inman-Bamber, N.G.; Smith, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v.92, p.185-202, 2005.
- Keating, B. A. Robertson, M. J. Muchow, R.C. Huth, N. I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.48, p.27-36, 1999.
- Lawlor, D. W. Photosynthesis, productivity and environment. *Journal of Experimental Botany*, v. 46, p. 1449 – 1461, 1995.
- Machado, R. S.; Ribeiro, R. V.; Marchiori, P. E. R.; Machado, D. F. S. P.; Machado, E. C.; Landell, M. G. de A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.
- Magalhães, J. R. O açúcar nas ilhas portuguesas do atlântico século XV e XVI. *Varia Historia*, Belo Horizonte, v. 25, n. 41, p.151-175, 2009.
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São paulo: Ceres, 2006. 638p.
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações, 2.ed. piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.
- Matioli, C. S.; Frizzone, J. A.; Peres, F. C. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para a região norte do Estado de São Paulo. *STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v.17, n.2, p.42-5, 1998.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>. Acesso em jan. de 2015.
- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. New York, Academic Press, 2012, 651p.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A. Principles of plant nutrition. London: Kluwer Academic, 2001.
- Miller, A. J.; Fan, X. R.; Orsel, M.; Smith, S. J.; Wells, D. M. Nitrate transport and signaling. *Journal of Experimental Botany*, v. 58, 2007.
- Monteiro, P. F. C.; Ângulo Filho, R.; Monteiro, R. O. C. efeitos da irrigação e da adubação nitrogenada sobre as variáveis agrônômicas da cultura do feijão. *Irriga*, v. 15, n. 4, p. 386-400, 2010.
- Mota, V. J. G.; Rocha Júnior, V. R.; Reis, S. T. dos; Sales, E. C. J. de; Oliveira, F. G. de; Gomes, V. M.; Martins, C. E.; Coser, A. C. Lâminas de irrigação e doses de

- nitrogênio em pastagem de capim-elefante no período chuvoso no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*. v.12, n.4, p. 908-922, 2011.
- Moura Filho, G. Crescimento e absorção de nutrientes em quatro variedades de cana-de-açúcar. In: Seminário alagoano sobre variedades de cana-de-açúcar. Maceió: STAB Leste, 2006. CD- Rom.
- Nazareno, R. B.; Oliveira, C. A. S.; Sanzonowicz, C.; Sampaio, J. B. R.; Silva, J. C. P.; Guerra, A. F. Crescimento inicial do cafeeiro Rubi em resposta a doses de nitrogênio, fósforo e potássio e a regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, p. 903-910, 2003.
- Oliveira, E. C. A., Freire, F. J.; Oliveira, R. I.; Freire, M. B. G. S.; S Neto, D. E.; Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1343-1352, 2010.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, J. F.; Oliveira, A. C.; Simões Neto, D. E.; Rocha, A. T.; Carvalho, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.46, n.6, p.617-625, 2011a.
- Oliveira, F. M.; Aspiazú, I.; Kondo, M. K.; Borges, I. D.; Pegoraro, R. F.; Vianna, E. J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. *Revista Trópica*, v. 5, n. 1, p. 56 - 67, 2011b.
- Oliveira, R. A.; Daros, E.; Zambon, J. L. C.; Weber, H.; Ido, O. T.; Zufellato-Ribas, K. C.; Koehler, H. S.; Silva, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.37, n.2, p.71-76, 2007.
- Oliveira, R. C. de; Cunha, F. N.; Silva, N. F. da; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L.; Megger, A. A. Productivity of fertirrigated sugarcane in subsurface drip irrigation system. *African Journal of Agricultural Research*, v.9, n. 11, p. 993-1000, 2014.
- Orlando Filho, J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, 1983. 369p.
- Paranhos, S. B. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987.v.1, 431p.
- POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA. Potássio: necessidade e uso na agricultura moderna. Piracicaba, POTAFOS, 1990. 45 p.

- Prata, E. B. Acumulação de biomassa e absorção de nutrientes por híbridos de meloeiro (*Cucumis melo* L.). 1999, 60f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- Ramos, A. Análise do desenvolvimento vegetativo e produtividade da palmeira pupunha (*Bactris gasipaes* Kunt) sob níveis de irrigação e adubação nitrogenada. 2002. 113f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 2002.
- Santana, M. J.; Carvalho, J. A.; Souza, K. J.; Sousa, A. M. G.; Vasconcelos, C. L.; Andrade, L. A. B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) e em solos com diferentes níveis texturais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.1470- 1476, 2007.
- Santos, E. G., Estudo da Adsorção de Contaminantes Orgânicos Provenientes da Água de Extração do Petróleo, em Coluna de Leito Fixo, utilizando Biomassas como Adsorventes. 2005, 229p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, Paraíba.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL DO ESTADO DE PERNAMBUCO – SINDAÇÚCAR.. SINDAÇÚCAR: sistema de recuperação automática. Pernambuco: sindicato da indústria do açúcar e do álcool do Estado de Pernambuco 2003. Disponível em: <www.sindacucar.com.br>. Acesso: 04/06/2014.
- Silva, L. C. F.; Casagrande, J. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (macronutrientes). In: Orlando Filho, J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983, p. 77-99.
- Silva, A. B. da; Dantas Neto, J.; Farias, C.H. de A.; Azevedo, C.A.V. de. Rendimento e qualidade da cana- de -açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. *Revista Caatinga*, v.22, p.236 -241, 2009a.
- Silva, C. T. S.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J.; Carvalho, C. M.; Gomes Filho, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.3, n.1, p.3-12 2009b.
- Souza, E. F; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. Função de Produção da Cana- de- açúcar em Relação à Água para Três Cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. *Engenharia Agrícola*, v. 19, n.1, p.28- 42, 1999.

- Souza, J. K. C.; Silva, S.; Dantas Neto J. Silva, M. B. R.; Teodoro, I. Importância da irrigação para a produção de cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. *Revista Educação Agrícola Superior*, v.27, n.2, p.133-140, 2012.
- Stone, P. J.; Sorensen, I. B.; Jamieson, P. D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperature climate. *Field Crops Research*, v.48, p.169-178, 1999.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
- Teodoro, I. Respostas técnico-econômicas da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e adubação nitrogenada. 2011, 82p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, Paraíba.
- Thorburn, P. J.; Meier, E. A.; Probert, M. E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. *Field Crops Research*, v.92, p.337-351, 2005.
- UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - UNICA. Setor sucroenergético. Disponível em: < <http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- Vitti, A. C.; Trivelin, P. C. O.; Gava, G. J. C.; Penatti, C. P.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Franco, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.2, p.249-256, fev. 2007.
- Wiedenfeld, B.; Enciso, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. *Agronomy Journal*, v. 100, p. 665-671, 2008.

CAPÍTULO II

Crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Resumo: O manejo da irrigação e da adubação nitrogenada são práticas agrícolas estudadas no sentido de melhorar o crescimento e desenvolvimento das plantas e conseqüentemente a sua capacidade produtiva, nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio no crescimento e acúmulo de biomassa seca da cana-de-açúcar (cana-planta) ao longo do ciclo da cultura. A pesquisa foi realizada na Estação Experimental de Cana-de-açúcar, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada em Carpina, PE. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm), cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) e cinco épocas de avaliação, arrançados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. As variáveis analisadas foram biomassa seca dos órgãos da planta, diâmetro de colmo, altura e número de plantas. As doses crescentes de nitrogênio aumentaram o acúmulo de biomassa seca do ponteiro, folha e colmo da cana-de-açúcar, além da altura e número de plantas por metro linear. Os maiores acúmulos de biomassa seca do colmo foram observados no final do ciclo da cultura para as doses de nitrogênio de 80 e 120 kg ha⁻¹. As lâminas crescentes de água proporcionaram um aumento no número de plantas de cana-de-açúcar, sendo os maiores números de plantas observados no início do ciclo da cultura.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*; irrigação, adubação nitrogenada, ciclo da cultura, desenvolvimento da planta

Growth and accumulation of dry biomass from sugarcane cultivated under water depths and nitrogen doses

Abstract: The management of irrigation and nitrogen fertilization are agricultural practices studied in order to improve growth and development of plants and consequently its production capacity, in this sense, the objective was to evaluate the effect of water depths and nitrogen doses on growth and accumulation of dry biomass from sugarcane (cane plant) along the crop cycle. The research was conducted in the experimental station of sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, PE. The treatments consisted of four water depths (1498; 1614, 1739 and 1854

mm), five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹) and five seasons of evaluation, arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. The analyzed variables were the dry biomass of the plant organs, height and diameter of the stem and number of plants. The nitrogen doses increased the accumulation of dry biomass of tip, leaf and sugarcane stem, beyond height and number of plants per meter. The increasing water depths provided an increase in the number of sugarcane plants, with the highest number of plants observed at the beginning of the cycle.

Keywords: *Saccharum officinarum*; irrigation, nitrogen fertilization, crop cycle, plant development

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar se destaca no cenário nacional e internacional devido ao seu intenso uso alimentar e energético. Atualmente, ocupa uma área de cerca de 26 milhões de hectares em todo o mundo, com produção de 1,83 bilhões de toneladas. O Brasil se destaca nesse contexto, por ocupar 37% da área mundial plantada de cana-de-açúcar, com 9,1 milhões de hectares e produção de 739 milhões de toneladas de colmos (FAOSTAT, 2015).

A capacidade produtiva da cana-de-açúcar depende de fatores como o manejo da irrigação, adubação, variedade, idade do corte, tipo de solo e clima (Dantas Neto et al., 2006). Comprovadamente, durante o desenvolvimento da planta o alongamento celular e o crescimento da cultura estão intimamente ligados aos níveis de umidade do solo, de forma que, ambos se elevam, diretamente, conforme o aumento da disponibilidade hídrica (Silva et al., 2010). A capacidade produtiva e a interferência do manejo podem ser quantificadas por meio da análise de variáveis morfológicas, como comprimento de colmo, diâmetro de colmo, dentre outras (Oliveira et al., 2010).

O manejo da adubação nitrogenada tem sido uma das práticas agrícolas mais estudadas no sentido de melhorar o rendimento da cana-de-açúcar. O nitrogênio é fator determinante para a produção das culturas, por participar da composição dos aminoácidos, proteínas, clorofila e muitas enzimas essenciais que estimulam o crescimento e desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular da planta (Malavolta, 2006; Marschner, 2012), sendo um dos nutrientes mais absorvidos pela cultura da cana-de-açúcar.

Assim como o nitrogênio, a água exerce papel fundamental no desenvolvimento vegetal. A água é constituinte de 70% da massa dos vegetais, doadora de elétrons para o processo de fotossíntese e reguladora da abertura estomática nas plantas (Taiz & Zeiger, 2013). A cana-de-açúcar, por ser uma poácea de mecanismo fotossintético C4, responde à adubação nitrogenada e ao fornecimento de água. Segundo Teodoro et al. (2013) a resposta da cana-de-açúcar a adubação nitrogenada aumenta em proporção direta com a disponibilidade hídrica do solo.

Shekinah et al. (2012) conduziram um experimento em campo para avaliar o efeito da adubação nitrogenada na produtividade de colmos da cana-planta. Segundo os autores a maior produtividade da cana-de-açúcar (140,7 Mg ha⁻¹) obtida na dose de nitrogênio de 280 kg ha⁻¹ foi devido ao maior número de plantas.

Dantas Neto et al. (2006) estudando o efeito da irrigação sobre os parâmetros de crescimento da cana-de-açúcar (primeira-soca) verificaram que as lâminas de água influenciaram linearmente os parâmetros de crescimento da cana-de-açúcar.

No entanto, quase toda a cana produzida no Estado de Pernambuco é cultivada em condições de sequeiro. A deficiência hídrica não se limita apenas às regiões áridas e semiáridas do mundo, uma vez que mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento, restringir o desenvolvimento e prejudicar a produtividade das culturas (Silva et al., 2014a).

Nesse sentido, objetivou-se pelo presente estudo avaliar o crescimento da cana-de-açúcar (cana-planta) submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio na Zona da Mata do Estado de Pernambuco.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo, na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W, a 180 m de altitude), no período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A caracterização química e física do solo foi realizada antes da instalação do experimento nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, de acordo com EMBRAPA (1997) (Tabela 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Camada	Análises químicas										
	pH	P	H+AL	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾	
m	H ₂ O	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----							-----%-----	
0-0,20	5,18	17,5	3,45	0,25	1,67	1,63	0,15	6,99	50,64	6,57	
0,20-0,40	5,06	17,0	4,00	0,30	1,67	1,13	0,15	7,05	43,26	8,85	

Camada	Análises físicas						Classe textural
	Ds ⁽⁴⁾	Areia	Silte	Argila	Θ _{CC} ⁽⁵⁾	Θ _{PMP} ⁽⁶⁾	
M	Mg m ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----			---m ⁻³ m ⁻³ ---		
0-0,20	1,72	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenosa
0,20-0,40	1,86	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenosa

⁽¹⁾Capacidade de troca de cátions potencial; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ saturação por alumínio; ⁽⁴⁾ densidade do solo; ⁽⁵⁾ capacidade de campo; ⁽⁶⁾ ponto de murcha permanente

O preparo do solo foi realizado 15 dias antes da instalação do experimento e consistiu de uma gradagem (grade aradora e grade niveladora) para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação do calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos de plantio. Para correção do solo aplicou-se calcário na dose de 465 kg ha⁻¹. No cálculo da quantidade de calcário utilizou-se o método da neutralização do alumínio trocável.

Já a adubação foi realizada no dia do plantio e toda em fundação, com aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e o nitrogênio (de acordo com cada tratamento), utilizando-se como fontes o cloreto de potássio, superfosfato simples e ureia, respectivamente. Tanto para a recomendação da calagem quanto para a adubação foram utilizadas as recomendações de IPA (2008).

O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se mudas da variedade de cana-de-açúcar RB92579. As mudas foram repartidas, deixando três gemas por rebolo (tolete). Os toletes foram distribuídos dentro dos sulcos de plantio totalizando 18 gemas por metro linear.

As parcelas experimentais foram constituídas por 10 fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 66,0 m². A área útil correspondeu às seis fileiras centrais, com 6,0 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 39,6 m².

Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (Li) e cinco doses de nitrogênio (Ni). As lâminas de água foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura, a saber: L₀=1498, L₁ = 1614, L₂ = 1739 e L₃ = 1854 mm, estando incluso nesses valores a precipitação pluvial acumulada e a lâmina inicial (1360

+ 138 mm). As doses de nitrogênio foram determinadas com base nas recomendações de IPA (2008) para cana-planta, sendo: $N_0 = 0$, $N_1 = 20$, $N_2 = 40$, $N_3 = 80$ e $N_4 = 120$ kg ha^{-1} , arranjados em faixas e delineados em blocos casualizados, com quatro repetições (Figura 1).

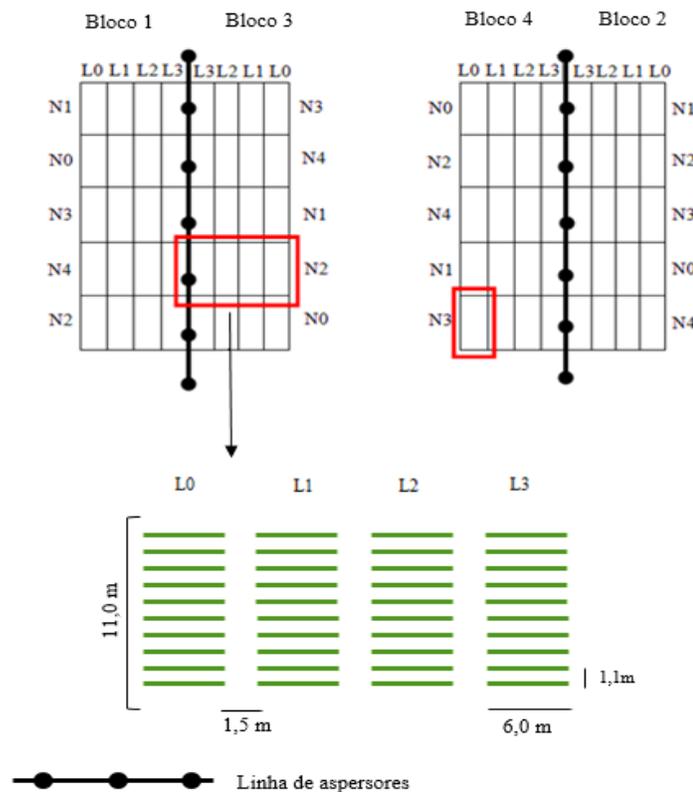


Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental

O sistema de irrigação utilizado foi o “line source sprinkler system” (aspersão em linha) de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). 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 foram do tipo minicanhão KS 1500 - PLONA, com bocais de diâmetro de $16,0 \times 5,0$ mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de $13,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e diâmetro molhado de 60 m.

A relação entre a lâmina referência L_2 (100%) e as demais, assim como as lâminas aplicadas em cada tratamento, foi obtida por avaliações do sistema de irrigação. Os ensaios para medição das lâminas de irrigação consistiram na distribuição de linhas de coletores perpendiculares à linha de aspersores, cinco coletores em cada parcela, espaçados de 1 m entre si, distribuídos em cada bloco experimental entre as linhas de

plântio, sendo as lâminas definidas pela média do volume de água coletado nos cinco coletores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado

Lâminas	Ia (mm h ⁻¹)	Li (%)	La (mm)	L (mm)	P (mm)	Lt (mm)
L ₃	27,8	150	356	138	1360	1854
L ₂	18,5	100	241	138	1360	1739
L ₁	9,6	48	116	138	1360	1614
L ₀	0,0	0	0	138	1360	1498

Ia, intensidade de aplicação do sistema de irrigação; Li, lâmina de irrigação baseada na evapotranspiração da cultura; La, lâmina aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura (mm); P, precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento; L, lâmina inicial aplicada; Lt, lâmina total (mm)

A irrigação era realizada quando a diferença entre o somatório da evapotranspiração diária da cultura (ETc) e a precipitação ocorrida no período atingia 40% da água total disponível no solo. Para determinação da água total disponível no solo foram considerados os resultados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo, além da profundidade do sistema radicular. Os dados do balanço hídrico durante o cultivo da cana planta estão na Figura 2.

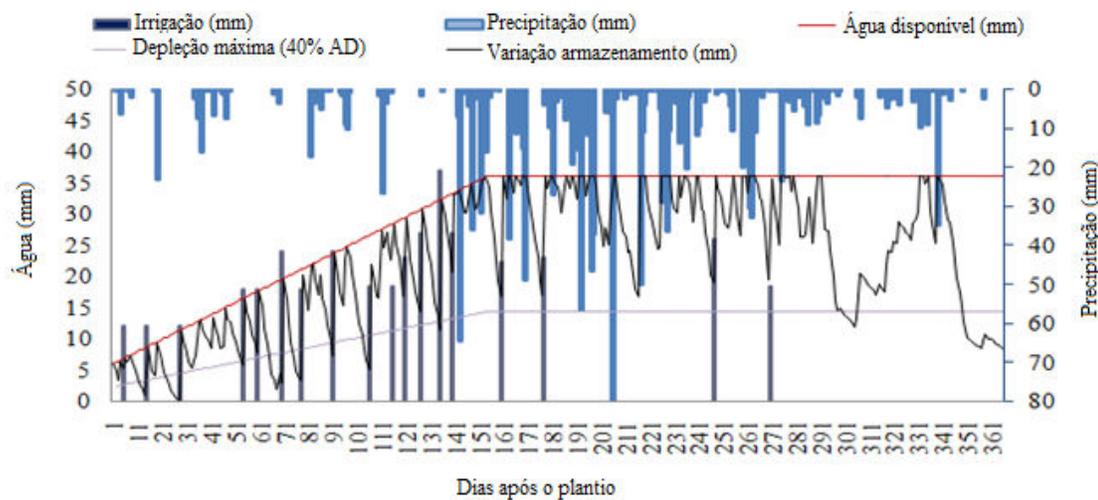


Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta

A evapotranspiração diária da cultura ETc (mm) foi calculada pela seguinte equação:

$$ETc = ECA \times Kp \times Kc \quad (1)$$

Em que,

ECA = evaporação do tanque Classe A, mm;

Kp = coeficiente do tanque Classe A;

Kc = coeficiente de cultura.

Os valores de Kp foram obtidos a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e evaporação do tanque classe A, instalado próximo à área experimental, com vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m (Doorenbos & Pruitt, 1976). Para o Kc foram utilizados valores recomendados por Doorenbos & Kassam (1994) para os estádios de desenvolvimento da planta, visando-se determinar a evapotranspiração da cultura em cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-planta em diferentes estádios de desenvolvimento

Cana planta	
Dias	Kc
1-61	0,40
62-153	0,75
154-244	1,10
245-334	1,25
335- 360	0,70

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Nos três primeiros meses do ciclo da cultura foram realizadas irrigações uniformes em todos os tratamentos, totalizando uma lâmina de 138 mm, devido ao plantio ter sido realizado no verão, época mais seca do ano, de modo a assegurar uniformidade de brotação e estabelecimento das plantas, utilizando-se o sistema de aspersão do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água. Em seguida, iniciou-se a aplicação das lâminas diferenciadas, utilizando-se o sistema de aspersão em linha “line source sprinkler system”.

Aos 270 DAP foi interrompida a irrigação promovendo assim um estresse hídrico na cultura. O estresse hídrico teve como objetivo induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos & Kassam (1994) durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo.

Em relação ao fator doses de nitrogênio, as quantidades de nitrogênio foram definidas tomando-se como ponto de partida a dose considerada padrão para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta) no Estado de Pernambuco, que é de 40 kg ha^{-1} (IPA,

2008), as demais doses aplicadas foram determinadas em termos percentuais a partir da dose padrão, utilizando-se como fonte de nitrogênio a ureia.

Para analisar o crescimento das plantas de cana-de-açúcar foram identificadas 10 plantas nas seis linhas centrais de cultivo, para realização de medições de altura e diâmetro de colmo. Determinou-se também o número de plantas nas seis linhas centrais de plantas. As medições foram realizadas aos 116, 179, 238, 301 e 363 dias após o plantio (DAP).

A altura das plantas foi mensurada com o auxílio de uma fita métrica, partindo-se do solo até o colarinho da folha (+1). O diâmetro de colmo foi determinado nas plantas identificadas, utilizando-se um paquímetro digital na altura correspondente a 20 cm, a partir de sua base. O número de plantas foi quantificado através da contagem do número de plantas por metro linear.

Para obtenção dos dados de biomassa seca foram realizadas coletas da parte aérea da planta, sendo a 1ª aos 165, a 2ª aos 225, a 3ª aos 263, a 4ª aos 306 e a 5ª aos 349 DAP. Essas coletas foram realizadas sempre nas fileiras externas (1ª, 2ª, 9ª e 10ª linhas de plantas) de cada parcela experimental de forma que foram coletadas nas diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio, sendo 10 plantas retiradas aleatoriamente por coleta para serem analisadas. A parte aérea da planta foi separada em folha, ponteiro e colmo.

As folhas, os ponteiros e colmos após serem separados, foram pesados para determinação da biomassa verde total. Em seguida, foram triturados em máquina forrageira e retiradas subamostras para determinação da biomassa úmida. Esses materiais foram colocados em estufa à temperatura de circulação forçada mantida em cerca de 65°C, até atingirem massa constante, para obtenção da biomassa seca. Levando em consideração a biomassa verde da planta e a umidade existente nos diferentes órgãos da planta, quantificou-se a produção de biomassa seca total.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e posterior análise de variância e regressão pelo teste F a 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR, versão 5.0 (Ferreira, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se através da ANOVA efeito significativo das doses de nitrogênio (N) e dos dias após o plantio (DAP) no acúmulo de biomassa seca do ponteiro e folha da cana-de-açúcar, ao nível de significância de 1% de probabilidade. Porém, não houve

efeito significativo da interação entre esses fatores sobre essas variáveis. Verificou-se também influência da interação doses de nitrogênio e lâminas de água e da interação doses de nitrogênio e dias após o plantio no acúmulo de biomassa seca do colmo de cana-de-açúcar ao nível de significância de 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente (Tabela 4).

No tocante a altura de plantas foi observada resposta significativa das interações lâminas de água e doses de nitrogênio, lâminas de água e dias após o plantio e doses de nitrogênio e dias após o plantio, ao nível de significância de 1% de probabilidade. A variável diâmetro de colmo também foi influenciada pela interação lâminas de água e doses de nitrogênio e pela interação doses de nitrogênio e dias após o plantio, ao nível de significância de 1% de probabilidade. E houve efeito significativo da interação lâminas de água e dias após o plantio e do fator isolado doses de nitrogênio no número de plantas por metro linear a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da ANOVA para as características acúmulo de biomassa seca (ponteiro, folha e colmo), altura de plantas, diâmetro de colmo e número de plantas de cana-de-açúcar submetida a lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N), avaliadas ao longo do ciclo da cultura (DAP)

F.V.	GL	MS ^a	MS ^a	MS ^a	Altura plantas	Diâmetro colmo	Número plantas
		Ponteiro	Folha	Colmo			
		-----Mg ha ⁻¹ -----			-----cm-----		Plantas m ⁻¹
BL	3	0,80 ^{ns}	3,63 ^{na}	0,80 ^{ns}	3,94*	6,72*	7,62**
L	3	1,98 ^{ns}	1,87 ^{ns}	2,29 ^{ns}	3,08*	3,02 ^{ns}	6,65*
Erro(L)	9	---	---	---	---	---	---
N	4	10,24**	28,48**	39,02**	15,88**	19,16**	4,68*
Erro(N)	12	---	---	---	---	---	---
DAP	4	13,55**	15,98**	270,37**	2509,20**	4,31*	192,03**
Erro(DAP)	12	---	---	---	---	---	---
LxN	12	1,30 ^{ns}	1,21 ^{ns}	2,57*	2,53**	2,40**	1,851 ^{ns}
LxDAP	12	1,70 ^{ns}	0,71 ^{ns}	1,19 ^{ns}	3,35**	1,29 ^{ns}	3,76**
NxDAP	16	1,28 ^{ns}	1,66 ^{ns}	3,63**	2,86**	6,24**	1,05 ^{ns}
LxNxDAP	48	0,75 ^{ns}	1,07 ^{ns}	1,27 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,462 ^{ns}	0,46 ^{ns}
Erro(LxNxDAP)	264	---	---	---	---	---	---
Média		3,25	7,68	65,46	228,71	2,55	14,62
CV _L (%)		15,25	15,58	27,45	13,64	9,90	19,55
CV _N (%)		17,55	15,40	16,45	12,14	7,48	25,62
CV _{DAP} (%)		13,89	16,84	10,13	9,10	10,87	18,15
CV _{LxNxDAP} (%)		30,98	13,55	11,97	4,64	5,06	13,58

^{ns} não significativo, * significativo a 5%, ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; Valores de F calculado; ^aValores de F calculado transformados: (y+0,5)^{0,5}

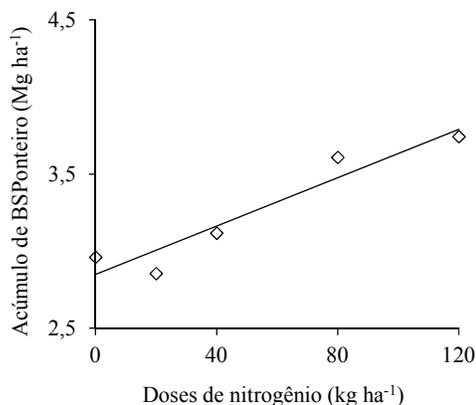
Estudando-se o efeito das doses de nitrogênio no acúmulo de biomassa seca do ponteiro da cana-de-açúcar observou-se que o maior acúmulo (3,78 Mg ha⁻¹) foi obtido na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ e o menor (2,85 Mg ha⁻¹) na ausência de adubação

nitrogenada, havendo um incremento de $0,0078 \text{ Mg ha}^{-1}$ no acúmulo de biomassa seca do ponteiro a cada quilograma de nitrogênio adicionado. Para as doses de nitrogênio de 20, 40 e 80 kg ha^{-1} , o acúmulo de biomassa seca foi de 3,00, 3,20 e $3,47 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 3A).

O aumento na produção de biomassa seca obtido com a adubação nitrogenada pode ser atribuído ao aumento no índice de área foliar ao estímulo da taxa de expansão das folhas (Dougherty & Rhykerd, 1985). Segundo Fagundes et al. (2006), o efeito da adubação nitrogenada sobre a taxa de alongamento foliar pode ser atribuído à grande influência do nitrogênio nos processos fisiológicos da planta. Devido o nitrogênio aumentar a produção de citocinina, hormônio responsável pelo crescimento das plantas, participando ativamente dos processos de divisão e diferenciação celular (Marschner, 2012). Trivelin et al. (2002) também constataram aumento linear na biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de nitrogênio.

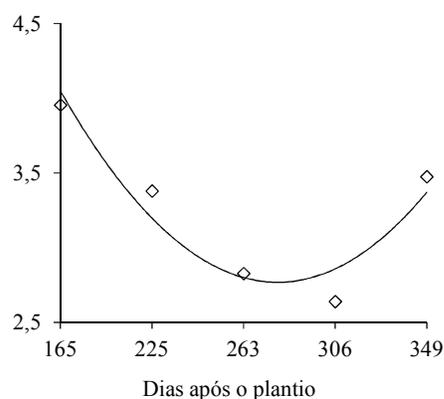
Em relação aos dias após o plantio, observou-se efeito quadrático da regressão sobre o acúmulo de biomassa seca do ponteiro, sendo o maior acúmulo ($4,17 \text{ Mg ha}^{-1}$) obtido aos 165 DAP, com posterior redução ($3,15 \text{ Mg ha}^{-1}$) até os 265 DAP (Figura 3B). A diminuição da biomassa seca do ponteiro pode estar relacionada ao desenvolvimento vegetativo dos outros órgãos da planta. De acordo com Machado et al. (1982) após 100 dias de cultivo a matéria seca das folhas e ponteiro representam 70% de toda a biomassa da planta; depois deste período ocorre diminuição progressiva no acúmulo de biomassa seca nesses órgãos até próximo aos 400 DAP, representando apenas 9% da matéria seca acumulada pela planta.

A.



$$y = 0,0078^{**}x + 2,85 \quad R^2 = 0,91$$

B.



$$y = 10^{-4**}x^2 - 0,053^{**}x + 10,19 \quad R^2 = 0,83$$

Figura 3. Acúmulo de biomassa seca do ponteiro da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)

Em relação ao efeito das doses de nitrogênio sobre o acúmulo de biomassa seca da folha, verificou-se que o menor acúmulo, $6,11 \text{ Mg ha}^{-1}$, foi obtido na ausência de nitrogênio, aumentando para $9,71 \text{ Mg ha}^{-1}$ na dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} , proporcionando um incremento de $0,030 \text{ Mg ha}^{-1}$ para cada kg de nitrogênio aplicado (Figura 4A). Segundo Crusciol et al. (2007) o aumento da biomassa seca da parte aérea provavelmente está relacionado a maior concentração de nitrogênio nas folhas, proporcionado pelas maiores doses de nitrogênio, pois esse nutriente aumenta o teor de clorofila e o índice de área foliar e, conseqüentemente, os níveis de fotossíntese líquida que resulta em maior acúmulo de biomassa seca.

Bologna-Campbell et al. (2013) estudando o efeito de diferentes doses de nitrogênio ($0, 40, 80$ e 120 kg ha^{-1}) em cana-planta observaram que a dose mais elevada de nitrogênio (120 kg ha^{-1}) aumentou o acúmulo de biomassa seca da parte aérea da planta em 37% quando comparado ao tratamento sem adição de nitrogênio.

Para o acúmulo de biomassa seca da folha em função dos dias após o plantio (Figura 4B) observou-se efeito quadrático da regressão, havendo uma redução no início do ciclo da cultura dos 165 aos 220 DAP, com posterior aumento até os 349 DAP. Os valores médios de acúmulo de biomassa seca da folha aos 165, 220 e 349 DAP foram $7,48, 6,96$ e $9,76 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente.

No início a planta depende das reservas do tolete para a produção dos órgãos componentes. Após o desenvolvimento do sistema radicular e a expansão das folhas, a planta retira água e nutrientes do solo e inicia os processos dependentes da fotossíntese, passando a uma fase de crescimento, com o maior incremento na taxa de biomassa seca.

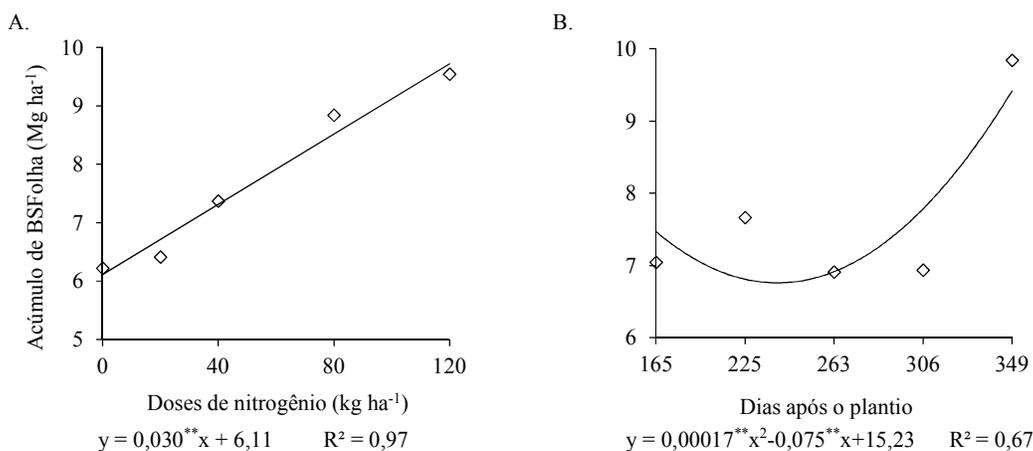


Figura 4. Acúmulo de biomassa seca da folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)

Avaliando-se o acúmulo de biomassa seca do colmo da cana-de-açúcar em função dos dias após o plantio e para cada dose de nitrogênio verificou-se uma variação ao longo do ciclo da cultura e em cada dose de nitrogênio aplicada, ajustando-se equações lineares para as doses 0, 20 e 40 kg ha⁻¹ e equações quadráticas para as doses de nitrogênio de 80 e 120 kg ha⁻¹ (Figura 5). Os maiores acúmulos de biomassa seca (74,9, 71,8 e 87,6 Mg ha⁻¹) foram observados no final do ciclo da cultura (349 DAP) e os menores (21,5, 29,5 e 30,6 Mg ha⁻¹) aos 165 DAP, havendo um incremento de 57,7% da dose N₀ para a dose N₂ aos 349 DAP.

Nas doses de nitrogênio de 80 e 120 kg ha⁻¹, os maiores acúmulos de biomassa seca foram verificados aos 349 e 318 DAP, sendo acumulados 103,7 e 105,3 Mg ha⁻¹, respectivamente. Oliveira et al. (2010) estudando o acúmulo de biomassa seca de colmos, em variedades de cana-de-açúcar (cana-planta), observaram que o maior acúmulo (85,0 Mg ha⁻¹), pela variedade RB92579, também foi obtido no final do ciclo da cultura (360 DAP), porém esse acúmulo foi menor ao encontrado na presente pesquisa.

Franco et al. (2010) avaliando o efeito da adubação nitrogenada sobre o acúmulo de biomassa seca do colmo da cana-de-açúcar observaram resposta quadrática da cana-planta à adubação nitrogenada de plantio, sendo o maior acúmulo (40,0 Mg ha⁻¹) obtido na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹. Valor abaixo da média encontrada para essa dose (103,0 Mg ha⁻¹) aos 349 DAP na presente pesquisa.

Esses resultados indicam a possibilidade da cana-de-açúcar, nas condições experimentais do trabalho, apresentar maior produtividade de colmos para as doses de nitrogênio de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹. Segundo Oliveira et al. (2013) o aumento na produção de biomassa seca da parte aérea da planta em função da fertilização nitrogenada pode estar ligada a uma absorção mais elevada de nitrogênio do fertilizante.

A biomassa seca do colmo é uma variável importante da planta, pois influencia diretamente a produtividade da cana-de-açúcar. O maior acúmulo de biomassa seca do colmo comprova que este órgão comporta-se como dreno principal da planta.

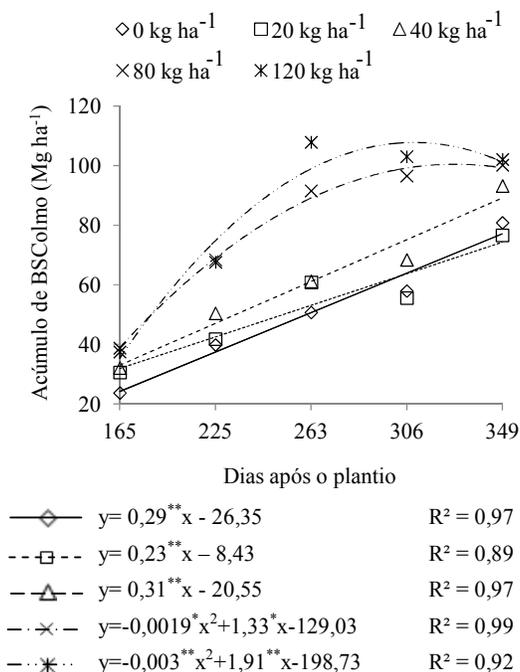


Figura 5. Acúmulo de biomassa seca do colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio

Avaliando-se a altura de plantas em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de água, verificou-se um aumento linear na altura de plantas nas quatro lâminas de água (Figura 6). As maiores alturas foram obtidas na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹, sendo observados valores médios de 239,1, 241,2, 249,6 e 251,4 cm para as lâminas 1498, 1614, 1739 e 1854 mm e os menores valores de altura de plantas (209,6, 214,2, 218,4 e 221,3 cm) foram obtidos na ausência de nitrogênio, havendo um incremento de 14,1, 12,6, 14,3 e 13,6% da ausência de adubação nitrogenada para a dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹, para as respectivas lâminas de água.

Silva et al. (2009) estudando o crescimento da cana-de-açúcar, variedade SP79-1011 terceira folha, com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada, observaram que o menor comprimento médio da planta foi de 231,0 cm obtido na lâmina de água de 1065 mm e 156 kg ha⁻¹ de nitrogênio via cobertura.

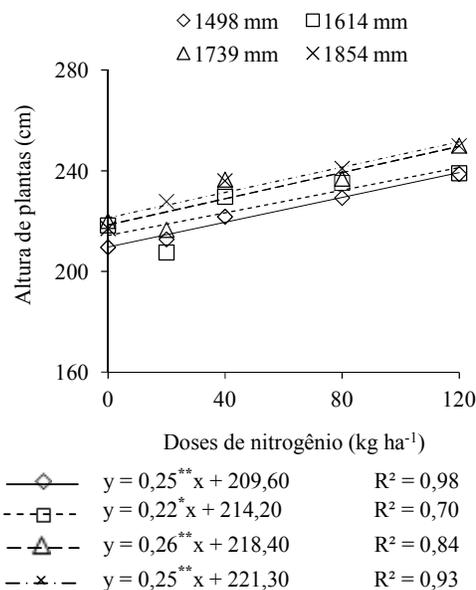


Figura 6. Altura de plantas da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de água

Com relação à interação lâminas de água e dias após o plantio, observou-se resposta significativa dos dias após o plantio em cada lâmina de água, ajustando-se modelo polinomial de segundo grau. Os maiores valores de altura foram observados no final do ciclo da cultura, apresentando valores médios de 350,3, 351,3, 350,2 e 358,42 cm e os menores aos 165 DAP, sendo 58,3, 62,12, 60,9, 63,69 para as lâminas 1498, 1614, 1739 e 1854 mm, havendo aumento de 2,3 % da lâmina 1498 para a lâmina 1854 mm aos 363 DAP (Figura 7A).

A água tem papel fundamental na maior alongação dos entrenós resultando em plantas mais altas em condições favoráveis ao crescimento vegetal (Shigaki et al., 2004). Oliveira et al. (2010) avaliando o crescimento de variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena, constataram que a variedade RB92579 apresentou altura média de 311,0 cm.

Farias et al. (2008) avaliando índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba, verificaram que a cana - de - açúcar cultivada em sistema irrigado, atingiu altura máxima (152,8 cm) aos 194 DAP.

Carvalho et al. (2009) determinando a influência de níveis de irrigação (775, 927, 1065 e 1168 mm) sobre os parâmetros organográficos da terceira folha de cana-de-açúcar, constataram influência significativa da irrigação sobre o comprimento das plantas, verificando valor máximo de 239,0 cm no tratamento 1065 mm.

Para o efeito da interação doses de nitrogênio e épocas de avaliação, observou-se ajuste quadrático para as cinco doses de nitrogênio, em função do ciclo da cultura (Figura 7B). As maiores alturas de plantas foram obtidas aos 363 DAP e as menores no início do ciclo da cultura (116 DAP). Os valores observados aos 363 DAP foram 330,9, 333,1, 361,8, 371,8 e 375,7 cm e aos 165 DAP foram 51,3, 54,9, 61,7, 69,5 e 70,0 cm para as doses de nitrogênio de 0, 20, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹, havendo um aumento de 13,54% no tamanho da planta da ausência de adubação nitrogenada para a dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹, revelando a importância desse nutriente para elevação da taxa de crescimento da planta.

Silva et al. (2014b), avaliando o crescimento da cana-de-açúcar sob aplicação de nitrogênio via gotejamento subsuperficial, verificaram crescimento exponencial na altura de plantas em função dos períodos avaliados, sendo que o maior incremento aconteceu entre os 240 e 300 DAP, com redução do crescimento após esses períodos.

Segundo Basi et al. (2011) o nitrogênio é determinante para o crescimento, desenvolvimento e rendimento das plantas já que pode influenciar nos processos fisiológicos essenciais para manutenção da vida vegetal. Desse modo, o nitrogênio atua no crescimento vegetativo influenciando diretamente a divisão e a expansão celular e o processo fotossintético, promovendo acréscimo em altura de planta.

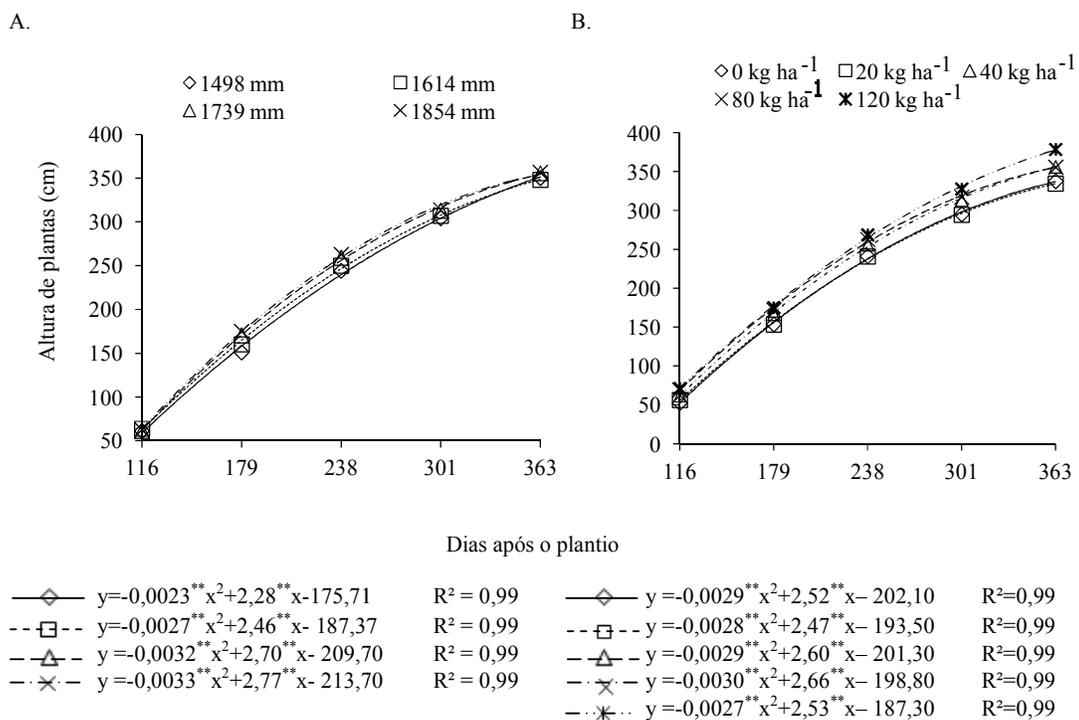


Figura 7. Altura de plantas da cana-de-açúcar (cana planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B) ao longo do ciclo da cultura

Avaliando-se o diâmetro médio de colmo em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de água (Figura 8) observou-se resposta significativa nas lâminas 1614, 1739 e 1854 mm, ajustando equação linear crescente para as respectivas lâminas. Os maiores diâmetros foram obtidos na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹, apresentando valores médios de 2,54, 2,72 e 2,71 cm e os menores 2,42, 2,48 e 2,47 cm quando não se aplicou adubação nitrogenada, havendo ganhos de 5,0, 9,7 e 9,7 % na espessura de colmo da dose N₀ para a dose N₃, nas lâminas 1614, 1739 e 1854 mm, respectivamente. Segundo Moura et al. (2005) os valores adequados de diâmetro de colmo para cana-de-açúcar irrigada são acima de 2,2 cm.

Vale et al. (2013) aplicando doses de fertilizante nitrogenado (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) no cultivo da cana-de-açúcar obtiveram o maior diâmetro (2,79 cm) na dose de nitrogênio de 126 kg ha⁻¹.

O nitrogênio atua no crescimento vegetativo, influenciando diretamente a divisão e a expansão celular e o processo fotossintético, promovendo acréscimo em altura da planta e diâmetro de colmo (Silva et al., 2005; Fornasier Filho, 2007).

Na lâmina 1498 mm não foi observado efeito das doses de nitrogênio sobre o diâmetro de colmo, apresentado valor médio de 2,51 cm. Dantas Neto et al. (2006) e Uribe (2010) também não observaram aumento no diâmetro de colmos da cana-de-açúcar com a elevação da dose de nitrogênio sob irrigação.

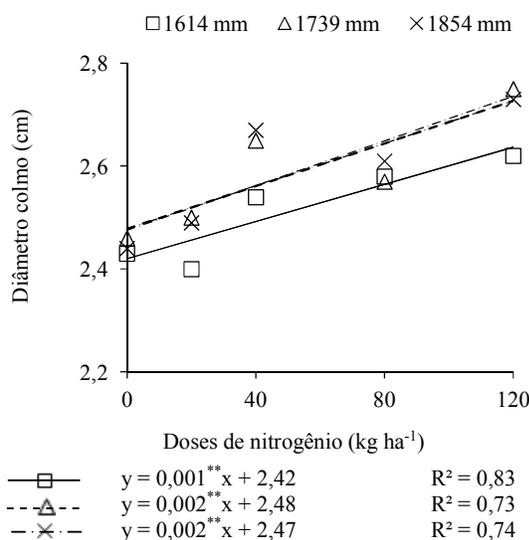


Figura 8. Diâmetro de colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio e em cada lâmina de água

Em relação ao efeito da interação doses de nitrogênio e dos dias após o plantio sobre o diâmetro de colmo observou-se efeito significativo dos dias após o plantio sobre o diâmetro de colmo apenas quando não se aplicou nitrogênio, havendo um aumento linear no diâmetro de colmo em função dos dias após o plantio (Figura 9). A planta apresentou aos 363 DAP diâmetro médio de 2,52 cm e aos 116 DAP de 2,27 cm. Para as doses de nitrogênio de 20, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ as médias do diâmetro de colmo foram 2,47, 2,59, 2,57 e 2,67 cm. Os resultados obtidos corroboram com os de Silva et al. (2014b) que não observaram aumento no diâmetro de colmos da cana-de-açúcar com a elevação da dose de nitrogênio, porém esses autores constataram a máxima resposta de diâmetro de colmo aos 330 DAP, com uma média de 3,80 cm, valor acima ao encontrado na presente pesquisa.

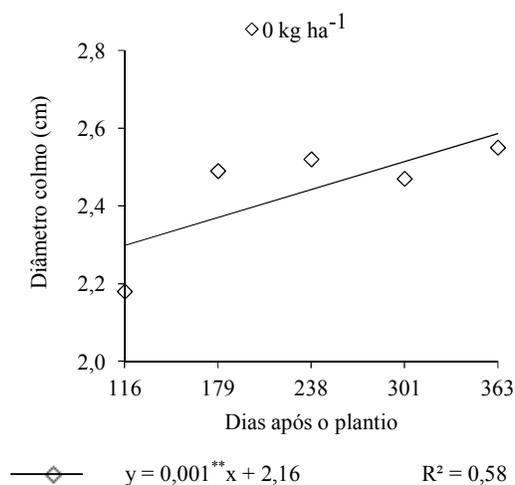
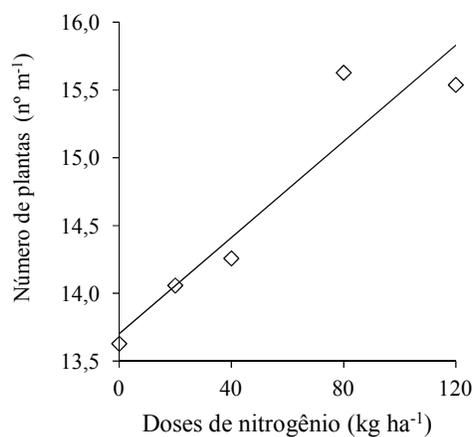


Figura 9. Diâmetro de colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio

Analisando-se o número de plantas por metro linear, em função das doses de nitrogênio, verificou-se um aumento linear no número de plantas com o incremento da adubação nitrogenada (Figura 10). O maior número de plantas (15,74) foi obtido na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ e o menor (13,70) quando não se aplicou nitrogênio, havendo um incremento de 14,9% no número de plantas da ausência de adubação nitrogenada para a dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹.

Vale et al. (2013) aplicando doses de nitrogênio (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) no cultivo de cana-de-açúcar obtiveram número médio de 16 plantas m⁻¹ na dose de nitrogênio de 190 kg ha⁻¹.

Madhuri et al. (2011) conduziram um experimento para determinar o efeito de doses de nitrogênio sobre o crescimento de variedades de cana-de-açúcar e constataram que o número de plantas aumentou com o incremento das doses de nitrogênio, sendo o maior número (11,2 plantas m⁻¹) encontrado na maior dose de nitrogênio (336 kg ha⁻¹). Segundo os autores, através dos resultados percebe-se claramente que o número de plantas responde a doses maiores que a recomendada para a cultura.



$$y = 0,017^{**} x + 13,70 \quad R^2 = 0,89$$

Figura 10. Número de plantas de cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio

Em relação à interação lâminas de água e dias após o plantio (Figura 11) observou-se diferença no número de plantas por metro linear nas quatro lâminas de água estudadas. Os maiores números de plantas foram obtidos aos 116 DAP, sendo estes 19,0, 21,2, 21,2 e 23,8 plantas m⁻¹ para as lâminas 1498, 1614, 1739 e 1854 mm, respectivamente. Após obtenção do número máximo de plantas houve uma diminuição no número de plantas por metro linear ao longo do tempo. Independentemente da diferença observada entre as lâminas de água verificou-se, em média, uma redução de 40% no número de plantas até o momento da colheita.

A cana-de-açúcar em contato com o solo e em condições favoráveis de umidade brotará através de suas gemas, formando novos colmos. Freitas et al. (2013) avaliando o efeito de cinco lâminas de irrigação (312,5; 468,6; 6124,70; 780,80 e 936,90) na cultura da cana-de-açúcar em Aquiraz, CE, em um Argiloso de textura arenosa observaram

que o aumento das lâminas de irrigação proporcionou incrementos na densidade de plantas. O maior número de plantas ($11,6 \text{ plantas m}^{-1}$) foi obtido na lâmina 936,90 mm.

A diminuição do número de plantas ao longo do tempo pode ser atribuída à competição por água, luz, nutrientes e área, refletindo na diminuição e interrupção do processo de emissão de plantas, além da morte destas, devido principalmente ao sombreamento. Assim, as plantas que se desenvolveram mais rapidamente sombrearam as menos desenvolvidas, provocando a senescência destas.

Esse comportamento, corrobora com os resultados de Oliveira et al. (2004), que avaliando o crescimento e o desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar no Estado do Paraná, constataram que depois do sexto mês após o plantio, se iniciou uma acentuada redução no número de plantas. Do mesmo modo, Oliveira et al. (2010) constataram uma redução de aproximadamente 50% no número de plantas. É típico da cultura um intenso perfilhamento no início do desenvolvimento, registrando em seguida o abortamento de parte das plantas (Simões et al., 2005).

Silva et al. (2014b) avaliando a influência da adubação nitrogenada aplicada via sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial sobre o crescimento da cana-planta constataram que houve uma queda no número de plantas a partir dos 180 DAP. Para os autores a redução pode ser atribuída à morte de plantas e encerramento do perfilhamento neste período, observando-se queda de 45% no período compreendido entre 180 e 240 DAP.

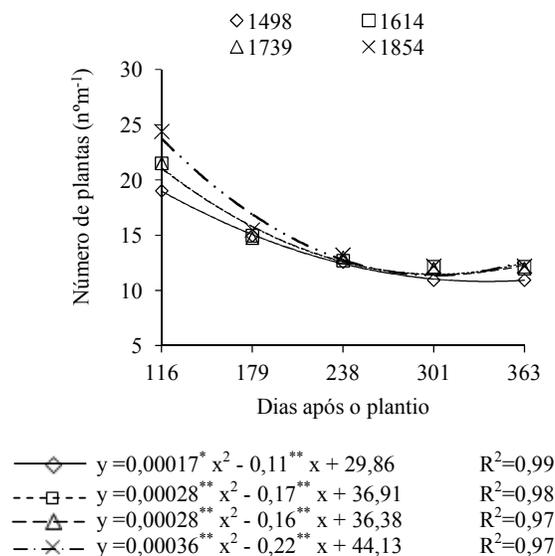


Figura 11. Número de plantas de cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada lâmina de água

CONCLUSÕES

1. A disponibilidade hídrica e de nitrogênio proporcionaram diferença na altura e diâmetro de colmo da cana-de-açúcar.
2. As doses crescentes de nitrogênio aumentaram o acúmulo de biomassa seca do ponteiro, folha e colmo da cana-de-açúcar, além da altura de plantas e número de plantas por metro linear.
3. As doses crescentes de nitrogênio incrementaram o acúmulo de biomassa seca de colmo, sendo os maiores acúmulos (103,7 e 105,3 Mg ha⁻¹) observados no final do ciclo da cultura (349 e 317 DAP) para as doses de nitrogênio de 80 e 120 kg ha⁻¹.
4. As lâminas crescentes de água proporcionaram um aumento no número de plantas de cana-de-açúcar, sendo os maiores números de plantas observados no início do ciclo da cultura.

LITERATURA CITADA

- Basi, S.; Neumann, M. Marafon, F.; Ueno, R. K.; Sandini, I. E. Influência da adubação nitrogenada sobre a qualidade da silagem de milho. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v.4, p.219-234, 2011.
- Bologna-Campbell, I.; Franco, H. C. J.; Vitti, A. C.; Faroni, C. E.; Costa, M. C. G.; Trivelin, P. C. O. Impact of Nitrogen and Sulphur Fertilizers on Yield and Quality of Sugarcane Plant Crop. *Sugar Tech*, v. 15, n.4, p. 424-428, 2013.
- Carvalho, C. M. de; Azevedo, H. M. de; Dantas Neto, J.; Farias, C. H. de A.; Silva, C. T. S. da; Gomes Filho, R. R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.4, p.72-77, 2009.
- Crusciol, C. A. C; Soratto, R .P.; Silva, L. M. da; Lemos, L. B. Fontes e doses de nitrogênio para o feijoeiro em sucessão a gramíneas no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p. 1545-1552, 2007.
- 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.
- Doorenbos, J.; Kassan, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).

- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193p.
- Dougherty, C. T.; Rhykerd, C. L. The role of nitrogen in forage-animal production. In: HEATH, M. E. et al. (Ed.). Forages: the science of grassland agriculture. Iowa: State University, 1985. 5.ed. p.318-325.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Fagundes, J. L.; Fonseca, D. M.; Mistura, C. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* sadubados com nitrogênio. Revista Brasileira de Zootecnia, v.35, n.1, p.21-29, 2006.
- FAOSTAT. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>. FAOSTAT> Acesso em 08 de janeiro. 2015.
- Farias, C. H. A. de.; Fernandes, P. D.; Azevedo, H. M. de.; Dantas Neto, J. Índice de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.4, p.356-362. 2008.
- Ferreira, D. F. Sisvar, versão 5.0 (Build 67), DEX/FLA. 2003.
- Fornasier Filho, D. Manual da cultura do milho. Jaboticabal: Funep, 2007. 576 p.
- Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O.; Faroni, C. E.; Otto, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. Scientia Agrícola, v.67, n.5, p.579-590, 2010.
- Freitas, C. A. S. de; Silva, A. R. A. da; Bezerra, F. M. L.; Mota, F. S. B.; Gonçalves, L. R. B.; Barros, E. M. Efluente de esgoto doméstico tratado e reutilizado como fonte hídrica alternativa para a produção de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.7, p.727-734, 2013.
- 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.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IPA. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação. 2 ed. rev. Recife: 2008.

- Machado, E. C.; Pereira, A. R.; Fahl, J. I.; Arruda, J. V.; Cione, J. Índices biométricos de duas cultivares de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.17, n.9, p.1323-1329, 1982.
- Madhuri, K. V. N.; Kumar, M. H.; Sarala, N. V. Influence of Higher Doses of Nitrogen on Yield and Quality of Early Maturing Sugarcane Varieties. *Sugar Tech*, v.13, n.1, p. 96-98, 2011.
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São paulo: Ceres, 2006. 638p.
- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. New York, Academic Press, 2012, 651p.
- Moura, M. V. P. S.; Farias, C. H. A.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J.; Azevedo, H. M.; Pordeus, R. M. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 29, n. 4, p. 753-760, 2005.
- Oliveira, E. C. A.; Gava, G. J. C.; Trivelin, P. C. O.; Otto, R.; Franco, H. C. J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. v.176, p. 712-723, 2013.
- Oliveira, E. C. A.; Oliveira, R. I.; Andrade, B. M. T., Freire, F. J.; Lira Júnior, M. A.; Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.9, p.951-960, 2010.
- Oliveira, R. A.; Daros, E.; Zambon, J. L. C.; Weber, H.; Ido, O. T.; Zufellato, R. K. C.; Koehler, H. S.; Silva, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná. *Scientia Agrária*. v. 5, n. 1-2, p. 87-94, mai. 2004.
- Shigaki, F.; Freitas, N.; Berto, A.; Ceddia, M. B.; Zonta, E.; Lima, E. Influência do estresse hídrico nos parâmetros decrescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema – RJ. *Revista Universitária Rural – Série Ciências da Vida*, v. 24, n. 1, p. 63-71, 2004.
- Shekinah, D. E.; Sundara, B.; Rakkiyappan, P. Relative Significance of N Nutrition on Yield, Quality and Ethanol in Sugarcane (*Saccharum species hybrid*) Plant: Ratoon System. *Sugar Tech*, v.14, n.2, p. 134-137, 2012.
- Silva, E. C.; Buzetti, S.; Guimarães, G. L.; Lazarini, E.; Sá, M. E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 353-362, 2005.

- Silva, C. T. S.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J.; Carvalho, C. M.; Gomes Filho, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.3, n.1, p.3–12, 2009.
- Silva, M. A.; Santos, C. M.; Arantes, M. T.; Pincelli, R. P. Fenologia da cana-de-açúcar. In: Crusciol, C. A. C.; Silva, M. A.; Rossetto, R.; Sorato, R. P (Ed.). *Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar*. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos Agrícolas e Florestais, 2010. p. 8-21
- Silva, M. A.; Arantes, M. T.; Rhein, A. F. L.; Gava, G. J. C.; Kolln, O. L. T. R. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, v.18, n.3, p.241–249, 2014a.
- Silva, N. F.; Cunha, F. N.; Oliveira, R. C.; Moura, L. M. F.; Teixeira, L. C. M. M. B. Crescimento da cana-de-açúcar sob aplicação de nitrogênio via gotejamento subsuperficial *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.8, nº.1, p. 1 - 11 , 2014b.
- Simões, M. S.; Rocha, J. V.; Lamparelli, R. A. C. Indicadores de crescimento e produtividade da cana-de-açúcar. *Scientia Agrícola*, v.62, n.1, p.23-30, jan. 2005.
- Uribe, R. A. M. Produtividade e estimativa do acúmulo de biomassa em soqueira de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com diferentes doses de N-fertilizante. 2010. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2010.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
- Teodoro, I.; Dantas Neto, J.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Brito, K. S.; Sá, L. de A.; Santos, M. A. L.; Sarmiento, P. L. V. de S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. *Irriga*, v. 18, n. 3, p. 387-401, 2013.
- Trivelin, P. C. O.; Vitti, A. C.; Oliveira, M. W.; Gava, G. J. C.; Sarriés, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.637-646, 2002.
- Vale, D. W. do; Prado, R. de 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

Concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Resumo: A quantidade de nutrientes absorvidos pelas plantas pode variar em função das características do vegetal, de fatores externos que influenciam o processo e ao longo do ciclo da cultura, assim, objetivou-se por meio desse estudo avaliar o efeito da irrigação e da adubação nitrogenada na concentração de nitrogênio, fósforo e potássio nos órgãos da planta (folha, ponteiro e colmo) da cana-de-açúcar (cana-planta) ao longo do ciclo da cultura. O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina, PE. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm), cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) e cinco épocas de avaliação (165, 225, 263, 306 e 349 dias após o plantio), arranjados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. As concentrações de nitrogênio e potássio na folha e colmo da cana-de-açúcar e de potássio no ponteiro reduziram em função da idade da planta. As concentrações de nitrogênio na folha e colmo da cana-de-açúcar aumentaram com o incremento das doses de nitrogênio. As lâminas de água não influenciaram a absorção de nitrogênio e potássio pela planta, apenas a concentração de fósforo na folha respondeu ao efeito das lâminas de água.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, irrigação, adubação nitrogenada, ciclo da cultura, nutrientes

Concentration of nitrogen, phosphor and potassium in sugarcane subject to water depths and nitrogen doses

Abstract: The amount of nutrients absorbed by plants can vary with the characteristics of the plants, the external factors influencing the process and crop cycle, therefore, it was performed an experiment in order to evaluate the effect of irrigation and nitrogen fertilization on concentration of nitrogen, phosphorus and potassium in the organs of the plant (leaf, stem and tip) of sugarcane (cane plant) along the cycle crop. The research was conducted in the experimental station of sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, PE. The treatments consisted of four water depths (1498; 1614; 1739 and 1854 mm), five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹) and five

seasons of evaluation, arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. The concentrations of nitrogen and potassium in leaf and sugarcane stem and potassium in tip reduced with plant age. The nitrogen concentrations in leaf and sugarcane stem increased with increasing nitrogen doses. It was not observed significant effect of water depths on the nitrogen and potassium concentrations in the sugarcane, only phosphorus concentration in leaf were affected by the water depths.

Keywords: *Saccharum spp.*, irrigation, nitrogen fertilization, cycle crop, nutrients

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo (MAPA, 2015). Calcula-se que a produção brasileira de cana-de-açúcar para safra de 14/15 atinja cerca de 642,1 milhões de toneladas. O Estado de Pernambuco é responsável por 2,3% da produção nacional, com produtividade média de 56,63 Mg ha⁻¹ de cana-de-açúcar (CONAB, 2015).

Um fator expressivo que deve ser destacado visto a sua influência na produtividade da cana-de-açúcar é a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas. Em relação à água, nem sempre as chuvas atendem a real necessidade hídrica das plantas; destacando a importância da irrigação, a qual quando bem planejada, tem retorno econômico inquestionável (Dantas Neto et al., 2006).

Por outro lado, o solo é quem dá suporte para o fornecimento de nutrientes à planta e, não é raro este não os apresentar em quantidades adequadas para o seu desenvolvimento, o que ressalta a importância da adubação, destacando que nessa prática deve-se observar o comportamento de cada nutriente em relação à cultura (Azevedo, 2002). O manejo balanceado de nutrientes é essencial para se alcançar altos rendimentos e melhorar a eficiência do seu uso (Cabrera, 2010).

Assim torna-se imprescindível e urgente estudar práticas de manejo mais eficientes do uso da água e fertilizantes. Igualmente importante é identificar os principais problemas de ordem nutricional das plantas (Oliveira, 2012).

Nesse aspecto, pesquisas que possam atuar na identificação do potencial de absorção e alocação dos nutrientes pela cana-de-açúcar, durante o ciclo da planta, poderão direcionar novos métodos e formas de adubação mais eficazes. Apesar da importância do tema, poucos foram os trabalhos desenvolvidos para avaliar a concentração, extração e exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar (Coletti et al., 2006). Como são escassos

esses resultados na literatura, obter conhecimentos com relação aos aspectos nutricionais dessa cultura torna-se indispensável.

Franco et al. (2011) avaliando o aproveitamento do nitrogênio da ureia pela cana-de-açúcar (cana-planta) observaram que o nitrogênio derivado de fertilizantes contribui até 40% do nitrogênio total na cana-de-açúcar em estágios iniciais de desenvolvimento, diminuindo durante os estágios de maturidade para aproximadamente 10% do total de nitrogênio na colheita. Segundo os autores, os estudos que avaliam a recuperação do nitrogênio fertilizante apenas na colheita pode levar a subestimar o papel de fertilizantes nitrogenados para a nutrição da cana-de-açúcar. Para Oliveira et al. (2011) o máximo de nitrogênio, fósforo e potássio obtido no colmo ocorre nas fases fenológicas iniciais, indicando que a adubação de cobertura em condições de cultivo irrigado deve ser realizada antes do período convencionalmente recomendado.

Assim, a absorção de nutrientes difere de acordo com o desenvolvimento da planta e, o conhecimento das exigências nutricionais torna-se importante para se estabelecer as quantidades de nutrientes e a época mais adequada a serem aplicados, através dos fertilizantes, obtendo assim os melhores rendimentos.

Visto que a disponibilidade de nutrientes e a sua absorção pelas plantas é influenciada por diversos fatores de produção, estudou-se o efeito de diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio na concentração de nitrogênio, fósforo e potássio em diferentes órgãos da cana-de-açúcar (folha, ponteiro e colmo) e em função do ciclo da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo, na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W, a 180 m de altitude), no período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A caracterização química e física do solo foi realizada antes da instalação do experimento nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, de acordo com EMBRAPA (1997) (Tabela 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Camada m	Análises químicas									
	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	H+AL	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾
0-0,20	5,18	17,5	3,45	0,25	1,67	1,63	0,15	6,99	50,64	6,57
0,20-0,40	5,06	17,0	4,00	0,30	1,67	1,13	0,15	7,05	43,26	8,85

Camada M	Análises físicas						
	Ds ⁽⁴⁾ Mg m ⁻³	Areia	Silte	Argila	Θ _{cc} ⁽⁵⁾	Θ _{PMP} ⁽⁶⁾	Classe textural
0-0,20	1,72	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenosa
0,20-0,40	1,86	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenosa

⁽¹⁾Capacidade de troca de cátions potencial; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ saturação por alumínio; ⁽⁴⁾ densidade do solo; ⁽⁵⁾ capacidade de campo; ⁽⁶⁾ ponto de murcha permanente

O preparo do solo foi realizado 15 dias antes da instalação do experimento e consistiu de uma gradagem (grade aradora e grade niveladora) para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação do calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos de plantio. Para correção do solo aplicou-se calcário na dose de 465 kg ha⁻¹. No cálculo da quantidade de calcário utilizou-se o método da neutralização do alumínio trocável.

Já a adubação foi realizada no dia do plantio e toda em fundação, com aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e o nitrogênio (de acordo com cada tratamento), utilizando-se como fontes o cloreto de potássio, superfosfato simples e ureia, respectivamente. Tanto para a recomendação da calagem quanto para a adubação foram utilizadas as recomendações de IPA (2008).

O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se mudas da variedade de cana-de-açúcar RB92579. As mudas foram repartidas, deixando três gemas por rebolo (tolete). Os toletes foram distribuídos dentro dos sulcos de plantio totalizando 18 gemas por metro linear.

As parcelas experimentais foram constituídas por 10 fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 66,0 m². A área útil correspondeu às seis fileiras centrais, com 6,0 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 39,6 m².

Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (Li) e cinco doses de nitrogênio (Ni). As lâminas de água foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura, a saber: L₀=1498, L₁ = 1614, L₂ = 1739 e L₃ = 1854 mm, estando incluso nesses valores a precipitação pluvial acumulada e a lâmina inicial (1360

+ 138 mm). As doses de nitrogênio foram determinadas com base nas recomendações de IPA (2008) para cana-planta, sendo: $N_0 = 0$, $N_1 = 20$, $N_2 = 40$, $N_3 = 80$ e $N_4 = 120$ kg ha^{-1} , arranjados em faixas e delineados em blocos casualizados, com quatro repetições (Figura 1).

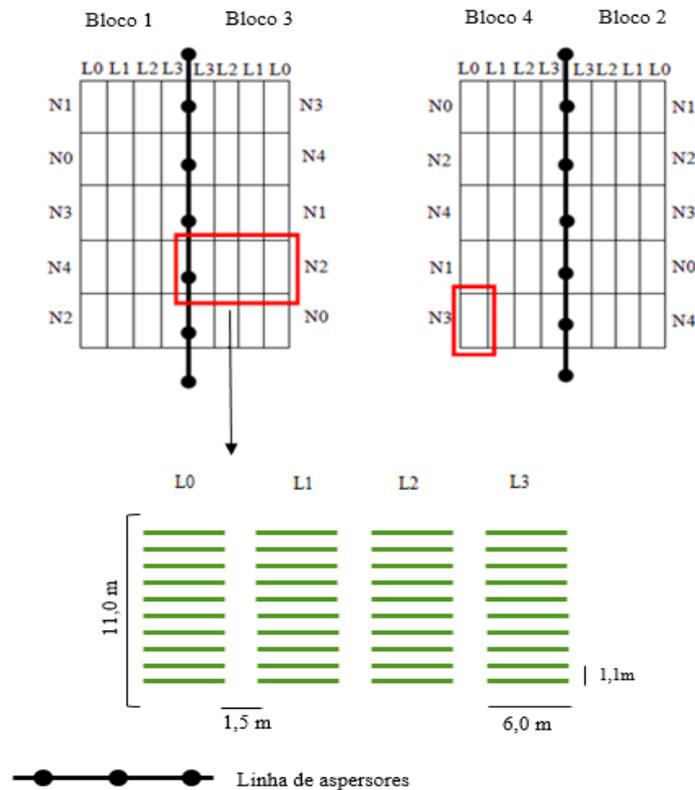


Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental

O sistema de irrigação utilizado foi o “line source sprinkler system” (aspersão em linha) de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). 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 foram do tipo minicanhão KS 1500 - PLONA, com bocais de diâmetro de $16,0 \times 5,0$ mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de $13,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e diâmetro molhado de 60 m.

A relação entre a lâmina referência L_2 (100%) e as demais, assim como as lâminas aplicadas em cada tratamento, foi obtida por avaliações do sistema de irrigação. Os ensaios para medição das lâminas de irrigação consistiram na distribuição de linhas de coletores perpendiculares à linha de aspersores, cinco coletores em cada parcela, espaçados de 1 m entre si, distribuídos em cada bloco experimental entre as linhas de

plântio, sendo as lâminas definidas pela média do volume de água coletado nos cinco coletores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado

Lâminas	Ia (mm h ⁻¹)	Li (%)	La (mm)	L (mm)	P (mm)	Lt (mm)
L ₃	27,8	150	356	138	1360	1854
L ₂	18,5	100	241	138	1360	1739
L ₁	9,6	48	116	138	1360	1614
L ₀	0,0	0	0	138	1360	1498

Ia, intensidade de aplicação do sistema de irrigação; Li, lâmina de irrigação baseada na evapotranspiração da cultura; La, lâmina aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura (mm); P, precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento; L, lâmina inicial aplicada; Lt, lâmina total (mm)

A irrigação era realizada quando a diferença entre o somatório da evapotranspiração diária da cultura (ETc) e a precipitação ocorrida no período atingia 40% da água total disponível no solo. Para determinação da água total disponível no solo foram considerados os resultados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo, além da profundidade do sistema radicular. Os dados do balanço hídrico durante o cultivo da cana planta estão apresentados na Figura 2.

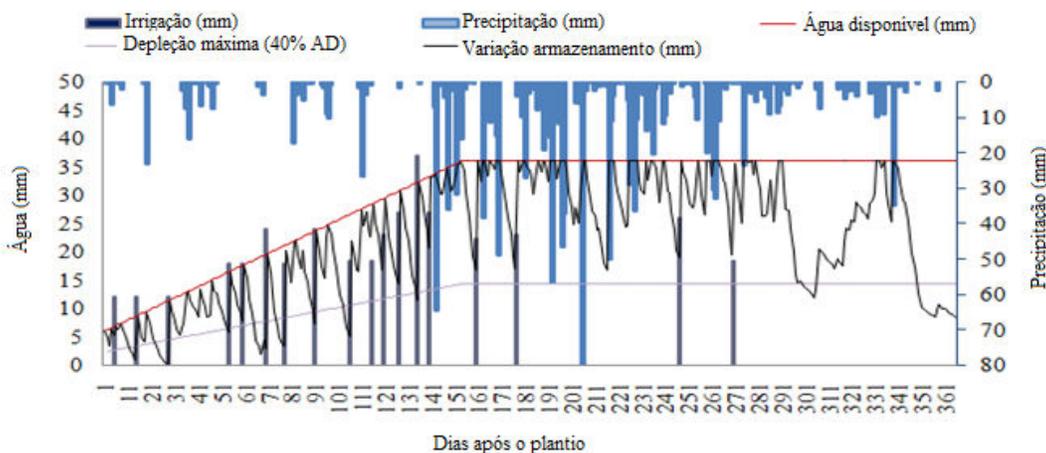


Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta

A evapotranspiração diária da cultura ETc (mm) foi calculada pela seguinte equação:

$$ETc = ECA \times Kp \times Kc \quad (1)$$

Em que,

ECA = evaporação do tanque Classe A, mm;

K_p = coeficiente do tanque Classe A;

K_c = coeficiente de cultura.

Os valores de K_p foram obtidos a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e evaporação do tanque classe A, instalado próximo à área experimental, com vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m (Doorenbos & Pruitt, 1976). Para o K_c foram utilizados valores recomendados por Doorenbos & Kassam (1994) para os estádios de desenvolvimento da planta, visando-se determinar a evapotranspiração da cultura em cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de cultura (K_c) para cana planta em diferentes períodos de desenvolvimento.

Cana planta	
Dias	K_c
1-61	0,40
62-153	0,75
154-244	1,10
245-334	1,25
335- 360	0,70

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Nos três primeiros meses do ciclo da cultura foram realizadas irrigações uniformes em todos os tratamentos, totalizando uma lâmina de 138 mm, devido ao plantio ter sido realizado no verão, época mais seca do ano, de modo a assegurar uniformidade de brotação e estabelecimento das plantas, utilizando-se o sistema de aspersão do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água. Em seguida, iniciou-se a aplicação das lâminas diferenciadas, utilizando-se o sistema de aspersão em linha “line source sprinkler system”.

Aos 270 DAP foi interrompida a irrigação promovendo assim um estresse hídrico na cultura. O estresse hídrico teve como objetivo induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos & Kassam (1994) durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo.

Em relação ao fator doses de nitrogênio, as quantidades de nitrogênio foram definidas tomando-se como ponto de partida a dose considerada padrão para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta) no Estado de Pernambuco, que é de 40 kg ha^{-1} (IPA, 2008), as demais doses aplicadas foram determinadas em termos percentuais a partir da dose padrão, utilizando-se como fonte de nitrogênio a ureia.

Para obtenção das concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio foram realizadas cinco coletas da parte aérea da planta, sendo a 1ª aos 165, a 2ª aos 225, a 3ª aos 263, a 4ª aos 306 e a 5ª aos 349 DAP. Essas coletas foram realizadas sempre nas fileiras externas (1ª, 2ª, 9ª e 10ª linhas de plantas) de cada parcela experimental, de modo que foram coletadas nas diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio, sendo 10 plantas retiradas aleatoriamente por coleta para serem analisadas. A parte aérea da planta foi separada em folha, ponteiro e colmo.

Após ser separado, esse material foi triturado em máquina forrageira e em seguida retirou-se amostras, que foram colocadas em sacos de papel previamente identificados e levados à estufa com circulação forçada de ar a 65°C até peso constante. As amostras secas foram processadas em moinho do tipo Willey e posteriormente, foram determinadas as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio. Para obtenção das concentrações dos nutrientes, foram realizadas digestão nítrica (fósforo e potássio) e sulfúrica (nitrogênio) de acordo com metodologia de EMBRAPA (2009) e Bezerra Neto & Barreto (2011), respectivamente.

O nitrogênio foi determinado pelo método do destilador de Kjeldahl, a concentração de potássio pela técnica de fotometria de chama e o fósforo pelo método Colorimétrico do Molibdato-vanadato, no espectrofotômetro (Bezerra Neto & Barreto, 2011).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e posterior análise de variância e regressão pelo teste F a 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR, versão 5.0 (Ferreira, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nitrogênio na cana-de-açúcar

Observou-se através da ANOVA efeito significativo da interação doses de nitrogênio (N) e dias após o plantio (DAP) na concentração de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar. Verificou-se também efeito significativo do fator isolado, doses de nitrogênio, nas concentrações de nitrogênio na folha e colmo da planta e em relação aos dias após plantio observou-se efeito significativo desse fator sobre as concentrações de nitrogênio na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar. Porém não houve efeito significativo das lâminas de água sobre a concentração de nitrogênio nos diferentes órgãos da planta (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios da concentração de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) nos órgãos da planta (folha, ponteiro e colmo) em função das lâminas de água (L), doses de nitrogênio (N) e dias após o plantio (DAP)

F.V	GL	Variáveis								
		N			P			K		
		Folha	Ponteiro ^a	Colmo	Folha ^a	Ponteiro ^a	Colmo ^a	Folha	Ponteiro ^a	Colmo ^a
-----g kg ⁻¹ -----										
Estatística F										
BL	3	1,47 ^{ns}	1,74 ^{ns}	1,95 ^{ns}	22,24 ^{**}	37,20 ^{**}	16,57 ^{**}	4,47*	13,58 ^{**}	4,43*
L	3	3,33 ^{ns}	5,13 ^{ns}	1,42 ^{ns}	2,32 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,43 ^{ns}	0,40 ^{ns}	1,76 ^{ns}
Erro(L)	9	---	---	---	---	---	---	---	---	---
N	4	14,61 ^{**}	2,34 ^{ns}	5,80 ^{**}	1,86 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,17 ^{ns}
Erro(N)	12	---	---	---	---	---	---	---	---	---
DAP	4	19,92 ^{**}	10,80 ^{**}	52,23 ^{**}	1,91 ^{ns}	0,55 ^{ns}	2,50 ^{ns}	6,53 ^{**}	7,47 ^{**}	151,20 ^{**}
Erro(DAP)	12	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LxN	12	1,23 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,52 ^{ns}	1,08 ^{ns}	1,44 ^{ns}
LxDAP	12	0,33 ^{ns}	1,00 ^{ns}	1,57 ^{ns}	2,55 ^{**}	0,60 ^{ns}	0,51 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,03 ^{ns}
NxDAP	16	1,28 ^{ns}	3,42 ^{**}	1,18 ^{ns}	2,87 ^{**}	1,23 ^{ns}	1,60 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,76 ^{ns}	1,49 ^{ns}
LxNxDAP	48	1,23 ^{ns}	1,72 ^{ns}	1,16 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,90 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,99 ^{ns}	1,17 ^{ns}
Erro(L,N,DAP)	264	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Média Geral		9,40	13,16	4,75	1,41	2,00	1,34	6,72	12,19	4,86
CV1(L)		10,09	6,07	14,4	6,76	6,43	9,47	19,30	6,06	10,52
CV2(N)		20,09	9,21	23,91	10,93	10,90	14,97	25,68	11,18	18,05
CV3(DAP)		27,55	18,51	35,45	33,78	25,07	39,15	37,42	21,14	27,63
CV4(L,N,DAP)		15,59	6,37	17,56	10,14	7,09	10,87	19,96	6,59	13,34

^{ns} não significativo, * significativo a 5%, ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F;

^aValores de F calculado transformados: $(y+0,5)^{0,5}$

Avaliando-se a concentração de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada, verificou-se um aumento na concentração de nitrogênio com o incremento das doses de nitrogênio aplicadas, ajustando-se equação linear crescente (Figura 3A). A concentração de nitrogênio no tratamento sem adubação nitrogenada foi de 8,44 g kg⁻¹, enquanto na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ foi de 10,61 g kg⁻¹, proporcionando um aumento de 25,7%.

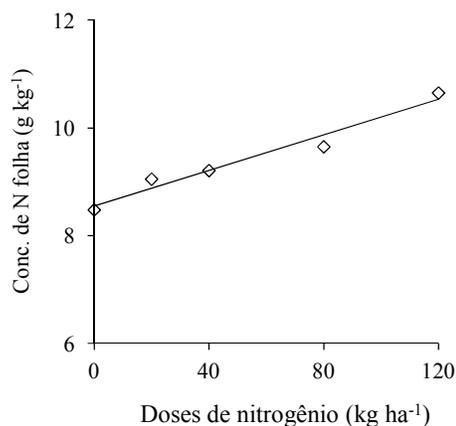
Franco et al. (2010) desenvolveram um experimento em Jaboticabal-SP, em um solo do tipo Latossolo Vermelho distrófico, com objetivo de avaliar o desenvolvimento da cana-planta à adubação nitrogenada de plantio (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹) e também verificaram um aumento linear na concentração de nitrogênio nos tratamentos com aplicação de fertilizante nitrogenado.

Embora possa haver perdas por lixiviação, volatilização, dentre outras, a adubação por meio de fertilizantes incrementa o nutriente disponível às plantas e é fundamental para a cultura, pois o cultivo da cana-de-açúcar requer uma quantidade considerável de nitrogênio como nutriente para produzir maior quantidade de biomassa (Thorburn et al., 2005).

Com relação ao efeito dos dias após o plantio sobre a concentração de nitrogênio na folha (Figura 3B) observou-se efeito linear decrescente da regressão, havendo uma redução de $0,017 \text{ g kg}^{-1}$ na concentração de nitrogênio na folha por dia, sendo a maior concentração ($11,10 \text{ g kg}^{-1}$) observada aos 165 DAP e a menor ($7,88 \text{ g kg}^{-1}$) aos 349 DAP estimando-se uma redução de 29,0% aos 349 DAP.

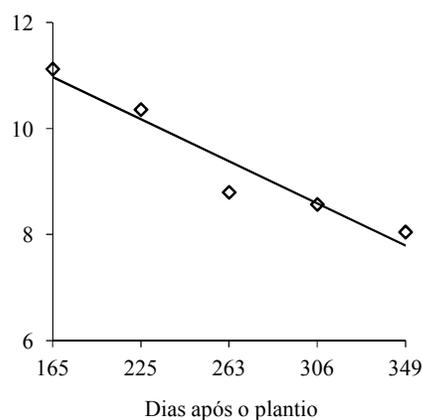
Oliveira et al. (2013) determinando a concentração de nitrogênio na parte aérea da cana-de-açúcar em diferentes fases do ciclo da cultura, também constataram que a concentração de nitrogênio na parte aérea da planta diminui ao longo do tempo, a maior concentração de nitrogênio ocorreu nos estádios iniciais de crescimento da cana-planta com valor de $13,2 \text{ g kg}^{-1}$. Segundo esse autores, a diminuição da concentração de nitrogênio na biomassa seca da parte aérea da planta é devido ao seu crescimento.

A.



$$y = 0,016**x + 8,55 \quad R^2 = 0,96$$

B.



$$y = -0,017**x + 13,99 \quad R^2 = 0,95$$

Figura 3. Concentração de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)

Quanto à concentração de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar, verificou-se variação da concentração desse nutriente em função do ciclo da cultura, no entanto, a resposta variou de acordo com a dose de nitrogênio (Figura 4). Para as doses de nitrogênio de 0, 20, 40 e 120 kg ha^{-1} as equações lineares decrescentes apresentaram melhor ajuste, já para a dose de nitrogênio de 80 kg ha^{-1} ajustou-se equação quadrática. As maiores concentrações de nitrogênio foram obtidas aos 165 DAP ($15,28$; $15,78$, $15,31$ e $15,45 \text{ g kg}^{-1}$) e as menores aos 349 DAP ($10,32$, $10,08$, $10,89$ e $11,77 \text{ g kg}^{-1}$), para as doses de nitrogênio 0, 20, 40 e 120 kg ha^{-1} , respectivamente, com uma menor redução (23,8%) nas plantas adubadas com a dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} . A

diminuição da concentração de nitrogênio com o tempo deve-se ao efeito diluição, caracterizado quando a taxa de crescimento de biomassa seca é superior à taxa de absorção do nutriente, já que a tendência é que o acúmulo de biomassa seca na planta aumente ao longo do ciclo da cultura (Jarrell & Beverly, 1981).

Na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹ observou-se que a maior concentração ocorreu aos 165 DAP (16,43 g kg⁻¹), com posterior redução até os 287 DAP (12,65 g kg⁻¹), a partir do qual se verificou novamente aumento, atingindo o total de 14,30 g kg⁻¹ aos 349 DAP. Para o desdobramento do efeito das doses de nitrogênio em cada época de avaliação não foi constatado efeito significativo nas épocas avaliadas.

É importante ressaltar que as folhas e os ponteiros são as partes mais fotossinteticamente ativas, assim a concentração mais elevada de nitrogênio no ponteiro em relação às outras partes da planta, possivelmente, deve-se a maior atividade metabólica e transpiratória desse órgão, fazendo com que haja um maior fluxo de nutrientes para as folhas mais novas e conseqüentemente um aumento na concentração de nitrogênio nos tecidos nesse fragmento da planta.

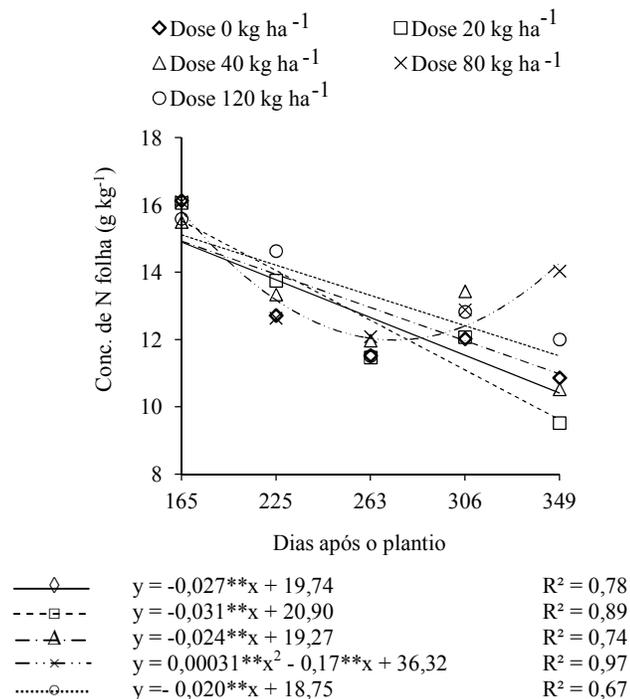


Figura 4. Concentração de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio

Avaliando-se a concentração de nitrogênio no colmo em função das doses de nitrogênio (Figura 5A) verificou-se que a equação linear crescente apresentou melhor ajuste, assim, a maior concentração de nitrogênio no colmo ($5,07 \text{ g kg}^{-1}$) foi obtido na dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} e a menor ($4,47 \text{ g kg}^{-1}$) na ausência de adubação nitrogenada, com um aumento de 13,42% na concentração de nitrogênio no colmo. Ishikawa et al. (2009) avaliando o efeito da aplicação de altas doses de nitrogênio (300 e $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) na concentração de nitrogênio em variedades de cana-de-açúcar puderam constatar que a concentração de nitrogênio no colmo foi significativamente maior quando se aplicou uma maior quantidade de abudo nitrogenado.

Segundo Vale et al. (2011) a deficiência de nutrientes pode limitar a nutrição, o crescimento e a produção da cana-de-açúcar. Porém, no presente estudo não foram verificados sintomas de deficiência de nitrogênio nas plantas testemunha, nem nas plantas que receberam as menores doses de nitrogênio. A ausência de sintomas de deficiência nutricional pode ter ocorrido devido à entrada de nitrogênio no solo por meio de outras fontes, tais como matéria orgânica, relâmpagos, reações fotoquímicas e fixação biológica do nitrogênio (Taiz & Zeiger, 2013).

Para a concentração de nitrogênio no colmo em função dos dias após o plantio observou-se redução de acordo com o ciclo da cultura (Figura 5B), ajustando-se equação de regressão linear decrescente, com uma redução de $0,016 \text{ g kg}^{-1}$ de nitrogênio por dia e perda percentual de 46% dos 165 aos 349 DAP. Oliveira et al. (2008) também observaram reduções na concentração de nitrogênio no colmo de onze variedades de cana-de-açúcar (cana-planta) no período entre 120 e 360 DAP.

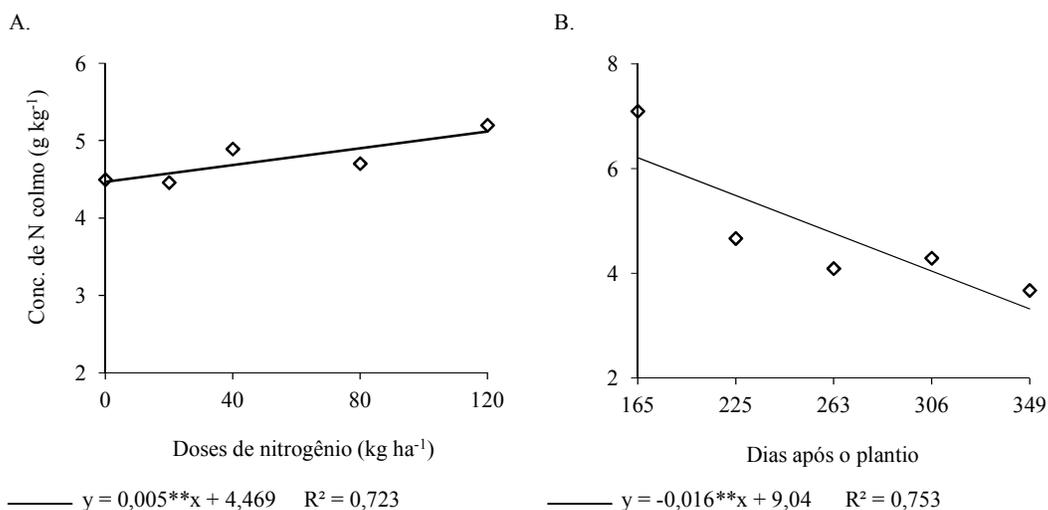


Figura 5. Concentração de nitrogênio no colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio (A) e dias após o plantio (B)

Fósforo na cana-de-açúcar

A concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar foi influenciada pela interação entre as lâminas de água e dias após o plantio e pela interação doses de nitrogênio e dias após o plantio, ao nível de significância de 1% de probabilidade. Porém não houve efeito significativo dos fatores estudados sobre a concentração de fósforo no ponteiro e colmo da cana-de-açúcar (Tabela 4).

Avaliando-se a concentração de fósforo durante o ciclo da cultura e em cada lâmina de água (Figura 6), observou-se resposta significativa para as lâminas 1498 e 1614 mm, ajustando-se o modelo de regressão polinomial de terceiro grau, através do qual pôde-se verificar uma diminuição de 28,3 e 8,46% na concentração de fósforo na folha para as lâminas 1498 e 1614 mm até os 225 DAP (0,99 e 1,20 g kg⁻¹), seguido de um aumento de 84,8 e 35,8% (1,83 e 1,63 g kg⁻¹) até os 309 e 343 DAP, respectivamente, ocorrendo novamente um decréscimo na última época de avaliação (349 DAP).

A absorção de fósforo pode diferir dependendo do estágio de desenvolvimento da planta. Como o fósforo é um elemento de baixa mobilidade no solo, o pequeno volume de raízes no estágio inicial de desenvolvimento das plantas não favorece a sua absorção. À medida que o sistema radicular cresce no solo ocorre a absorção dos nutrientes que inicialmente se encontram no trajeto de seu crescimento. Com o tempo há um decréscimo da concentração dos nutrientes junto à superfície das raízes à medida que eles são absorvidos, criando-se um gradiente de concentração entre a região mais próxima e aquela mais distante da raiz (Novais et al., 1990).

Oliveira (2008) também observou uma variação na concentração de fósforo ao longo do ciclo da cultura, porém no colmo da cana-açúcar, observando uma diminuição até os 240 DAP, seguido de um aumento até os 300 DAP, ocorrendo, novamente, um decréscimo na época da colheita.

Para as lâminas 1739 e 1853 mm não foi observado efeito significativo na concentração de fósforo nas folhas, não sendo possível ajustar equação de regressão, sendo obtidos valores médios de 1,43 e 1,35 g kg⁻¹, respectivamente. A retenção de fósforo no solo, genericamente chamada de adsorção é um fenômeno favorável a utilização do fósforo pelas plantas quando se trata de se evitar perdas provocadas por lixiviação (Simões Neto, 2008). Para o desdobramento lâminas de irrigação em cada época de avaliação também não foi observado efeito significativo da regressão.

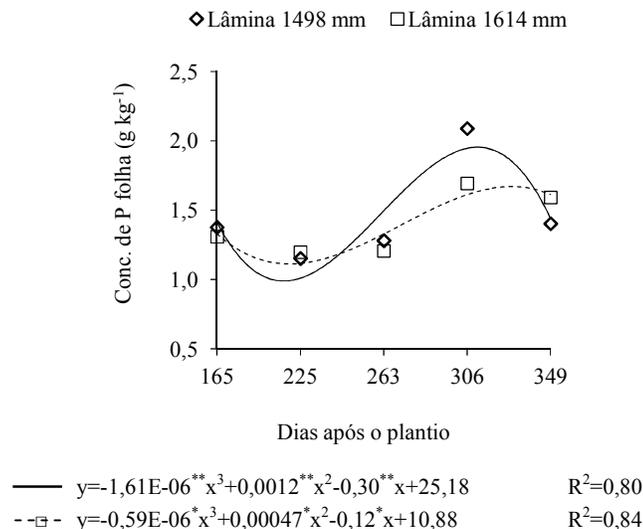


Figura 6. Concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB 92579, em função dos dias após o plantio e em cada lâmina de água

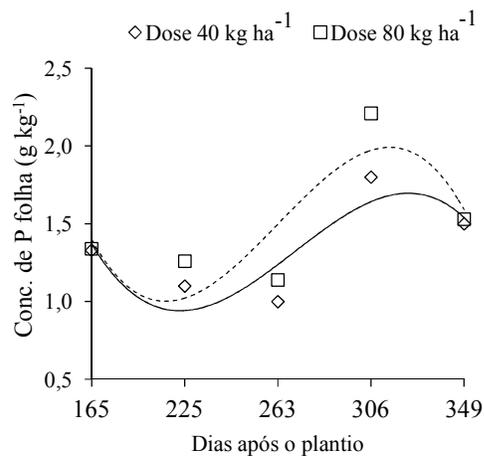
A concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar também foi avaliada em reposta aos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio (Figura 7). Observou-se resposta significativa para as doses de nitrogênio de 40 e 80 kg ha⁻¹, ajustando-se o modelo polinomial de terceiro grau. O nitrogênio contribui para a absorção de outros íons, porém deve-se salientar que o seu excesso pode ser prejudicial à planta, causando maior crescimento da parte aérea em relação ao sistema radicular, deixando a planta mais suscetível à deficiência hídrica e de nutrientes, principalmente fósforo e potássio (Engels & Marschner, 1995).

Inicialmente houve um decréscimo na concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar até os 230 e 220 DAP (0,99 e 1,08 g kg⁻¹), seguido de um aumento até 330 e 324 DAP (1,70 e 1,99 g kg⁻¹) e posterior queda aos 349 DAP (1,58 e 1,65 g kg⁻¹), respectivamente, para as doses de nitrogênio de 40 e 80 kg ha⁻¹, sendo observada uma maior concentração de fósforo (1,5 g kg⁻¹) na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹. A capacidade de absorção de fósforo pela folha da cana-de-açúcar foi aumentando com o tempo, isso pode ter sido decorrente do desenvolvimento do sistema radicular bem como também pela chance de existir teores residuais pelo uso intenso de fertilizantes fosfatados nessa cultura.

Para as demais doses de nitrogênio (0, 20 e 120 kg ha⁻¹) não foi verificado efeito dos dias após o plantio sobre a concentração de fósforo, sendo os valores médios de fósforo de 1,35, 1,42 e 1,45 g kg⁻¹ na folha, respectivamente, assim como também não houve

efeito significativo da regressão no desdobramento das doses de nitrogênio em cada época de avaliação.

O fósforo foi o nutriente absorvido em menor quantidade pela cana-de-açúcar. Os valores desse nutriente extraídos do solo pelas plantas são geralmente baixos quando comparados ao nitrogênio e o potássio. Porém, a concentração desse nutriente na solução do solo, bem como a velocidade do seu restabelecimento nesta, não são suficientes para atender as necessidades das culturas, sendo necessária sua aplicação no plantio (Coutinho et al., 2007).



$$\begin{aligned} \text{---}\blacktriangle\text{---} & y = -1,012\text{E-}06x^3 + 0,00081x^2 - 0,206x + 17,84 & R^2 = 0,70 \\ \text{---}\times\text{---} & y = -1,46\text{E-}06x^3 + 0,00113x^2 - 0,278x + 23,1 & R^2 = 0,62 \end{aligned}$$

Figura 7. Concentração de fósforo na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio e em cada dose de nitrogênio

Potássio na cana-de-açúcar

A concentração de potássio nos órgãos da cana-de-açúcar (folha, ponteiro e colmo) foi influenciada pelos dias após o plantio ao nível de significância de 1% de probabilidade (Tabela 4). Porém não houve efeito significativo das lâminas de água e das doses de nitrogênio sobre a concentração de potássio nos diferentes órgãos da planta de cana-de-açúcar. Prado & Pancelli (2008) estudando o efeito da adubação nitrogenada sobre as concentrações de macronutrientes no tecido vegetativo (folha) da cana-de-açúcar também não verificaram alteração na concentração de potássio em função da adubação.

Avaliando-se a concentração de potássio na folha durante o ciclo da cultura, verificou-se que a equação de regressão linear apresentou melhor ajuste (Figura 8A),

assim, a maior concentração de potássio ($7,63 \text{ g kg}^{-1}$) foi obtida aos 165 DAP, havendo uma redução linear de $0,008 \text{ g kg}^{-1}$ por dia e uma redução percentual de 19,4% aos 349 DAP ($6,15 \text{ g kg}^{-1}$). A queda na concentração de potássio nas folhas pode ter sido decorrente da morte de folhas senescentes e da redistribuição do nutriente entre os outros órgãos da planta.

Para o efeito dos dias após o plantio sobre a concentração de potássio no ponteiro (Figura 8B) e colmo (Figura 8C) da cana-de-açúcar foram ajustadas equações quadráticas. A maior concentração de potássio no ponteiro ($13,35 \text{ g kg}^{-1}$) foi obtida aos 212 DAP decrescendo em seguida, com menor concentração ($9,40 \text{ g kg}^{-1}$) verificada aos 349 DAP. Já para a concentração de potássio no colmo, a maior ($11,65 \text{ g kg}^{-1}$) foi verificada aos 165 DAP, com posterior redução até os 326 DAP ($1,60 \text{ g kg}^{-1}$).

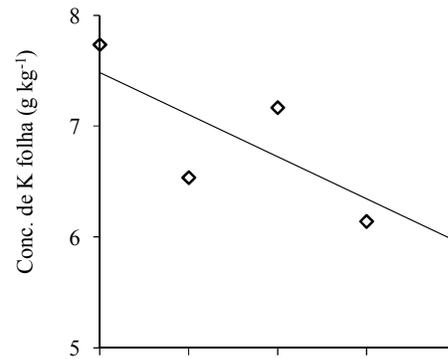
A diminuição nas concentrações tanto de nitrogênio quanto de potássio com o tempo deve-se ao efeito diluição desses nutrientes na planta. Assim, todos os fatores que proporcionem mudanças diferenciadas nos valores das taxas de crescimento e absorção dos nutrientes acarretarão em diferentes concentrações do nutriente no tecido vegetal, caso a taxa de crescimento seja nula, isto é, haja paralisação do crescimento da planta e o nutriente continue a ser absorvido, ocorrerá à concentração do nutriente; porém se ocorrer o oposto, ou seja, rápido crescimento da planta, e o nutriente estiver sendo absorvido em menor taxa, ocorrerá a diluição (Maia et al., 2005).

Outro efeito que contribui para a diminuição da concentração de alguns nutrientes na planta é a translocação do nutriente, fato que é observado para elementos móveis, como o nitrogênio e o potássio. De forma geral, as folhas jovens são mais ricas em nitrogênio, fósforo e potássio, porém pobres em cálcio, quando comparadas às folhas maduras.

Segundo Oliveira et al. (2008) esse decréscimo nas concentrações no colmo pode ser justificado, uma vez que o potássio é responsável pelo metabolismo de hexoses e transporte de sacarose, estabelecendo-se uma relação entre a alocação de potássio e a síntese protéica que é maior nas folhas do que nos colmos.

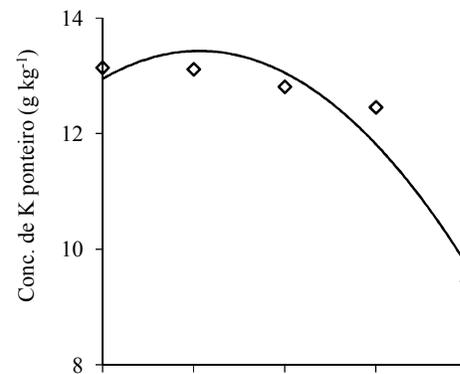
Depois do nitrogênio o potássio foi o nutriente mais absorvido pela parte vegetativa (folha e ponteiro) da cana-de-açúcar, exceto no colmo que apresentou maior concentração de potássio a nitrogênio. Mesmo não fazendo parte da estrutura de nenhum composto orgânico, o potássio desempenha importantes funções nas plantas como na fotossíntese, ativação enzimática, síntese de proteínas e transporte de carboidratos entre outros e, portanto, estimula o crescimento e a produção dos vegetais (Taiz & Zeiger, 2013).

A.



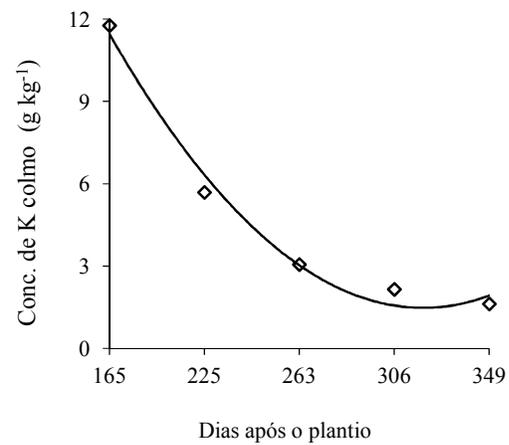
$$y = -0,008^{**}x + 8,95 \quad R^2 = 0,72$$

B.



$$y = -0,00021^{*}x^2 + 0,089^{*}x + 3,92 \quad R^2 = 0,92$$

C.



$$y = 0,000386^{**}x^2 - 0,25^{**}x + 42,72 \quad R^2 = 0,99$$

Figura 8. Concentração de potássio na folha (A), no ponteiro (B) e no colmo (C) da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função dos dias após o plantio

CONCLUSÕES

1. As concentrações de nitrogênio e potássio na folha e colmo da cana-de-açúcar e de potássio no ponteiro reduziram em função da idade da planta.
2. As concentrações de nitrogênio na folha e colmo da cana-de-açúcar aumentaram com o incremento das doses de nitrogênio.
3. A concentração de nitrogênio no ponteiro reduziu em função dos dias após o plantio nas doses de nitrogênio de 0, 20, 40 e 120 kg ha⁻¹.
4. A ordem de absorção de nutrientes nos órgãos da planta foi: nitrogênio> potássio> fósforo e a maior concentração observada no ponteiro, na folha e no colmo, respectivamente, exceto a concentração de potássio no colmo que foi maior em relação à folha.
5. As lâminas de água não influenciaram a absorção de nitrogênio e potássio pela planta, apenas a concentração de fósforo na folha respondeu ao efeito das lâminas de água.

LITERATURA CITADA

- Azevedo, H. M. de. Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba. 2002. 112f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2002.
- Bezerra Neto, E.; Barreto, L. P. Métodos de Análises Químicas em plantas. Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, 2011.
- Cabrera, J. A.; Zuaznábar, R. Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de larga duración con 24 cosechas acumuladas. Cultivos Tropicales, v.31, n.1, p. 93-100, 2010.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO – IPA. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação. 2 ed. rev. Recife: IPA, 2008.
- Coletti, J. T.; Casagrande, J. C.; Stupiello, J. J.; Ribeiro, L. D.; Oliveira, G. R. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em Argissolos, variedades RB 83486 e SP81-3250. STAB, v.24, p.32-36, 2006.
- Coutinho, E. L. M.; Natale, W.; Souza, E. C. A. Adubos e corretivos: aspectos particulares na olericultura. In: Grangeiro, L. C.; Negreiros, L. C.; Souza, B. S.; Azevedo, P. E.; Oliveira, S. L.; Medeiros, M, A. Acúmulo e exportação de nutrientes em beterraba. Ciência e Agrotecnologia, v. 31, n. 2, p. 267-273, 2007.

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2014/2015. Brasília, 2014. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br>>. Acesso em janeiro de 2015.
- 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, n.2, p.283-288, 2006.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília, 2009. 627p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Engels, C.; Marschner, H. Plant uptake and utilization of nitrogen. In: Bacon, E. P. Nitrogen fertilization in the environment. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 41-71.
- Ferreira, D. F. Sisvar, versão 5.0 (Build 67), DEX/FLA. 2003.
- Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O.; Faroni, C. E.; Otto, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. *Scientia Agrícola*. v.67, n.5, p.579-590, 2010.
- Franco, H. C. J.; Otto, R.; Faroni, C. E.; Vitti, A. C.; Oliveira, E. C. A.; Trivelin, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *Field Crops Research*, v.121, p. 29-41, 2011.
- 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.
- Ishikawa, S.; Shotaro, A.; Takeo, S.; Yoshifumi, T.; Makoto, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.55, p. 485-495, 2009.

- Jarrell, W. M.; Beverly, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*, v. 34, p.197-224, 1981.
- Maia, C. E.; Morais, E. R. C.; Porto Filho, F. Q.; Gheyi, R. H.; Medeiros, J. F. Teores foliares de nutrientes em meloeiro irrigado com águas de diferentes salinidades. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.292- 295, 2005.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>> Acesso em janeiro 2015.
- Novais, R. F.; Smyth, T. J. (Eds.). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade de Viçosa, 1999, 399 p.
- Oliveira, E. C. A. Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2008.
- Oliveira, E. C.; Freire, F. J.; Oliveira, A. C.; Oliveira, R. I.; Oliveira, A. C.; Freire, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n.3, p.579-588, 2011.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, F. J.; Oliveira, R. I.; Freire, M. B. G. S.; Simões Neto, D. E.; Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p. 1343-1352, 2010.
- Oliveira, E. C. A.; Gava, G. J. C.; Trivelin, P. C. O.; Otto, R.; Franco, H. C. J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. v.176, p. 712-723, 2013.
- Oliveira, F. M.; Aspiázú, I.; Kondo, M. K.; Borges, I. D.; Pegoraro, R. F.; Vianna, E. J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. *Revista Ceres*, v.59, n.6, p. 832-840, 2012.
- Prado, R. M.; Pancelli, M. A. Respostas de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. *Bragantia*, v.67, p. 951- 959, 2008.
- Silva, C. T. S.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J.; Carvalho, C. M.; Gomes Filho, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.3, n.1, p.3–12, 2009.
- Simões Neto, D. E. Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do Estado de Pernambuco. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2008.

- Taiz, L.; Zeiger, E. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
- Thorburn, P. J.; Meier, E. A.; Probert, M. E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. *Field Crops Research*, v.92, p.337-351, 2005.
- Vale, D. W.; Prado, R. M.; Avalhães, C. C.; Hojo, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n.2, p. 189-196, 2011.

CAPÍTULO IV

Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de água e doses de nitrogênio

Resumo: A disponibilidade de água no solo associada ao fornecimento adequado de nitrogênio são fatores que podem influenciar o acúmulo de nutrientes pelas plantas, tornando-se imprescindíveis para o crescimento e desenvolvimento das culturas, assim, objetivou-se avaliar o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio sobre o acúmulo de biomassa seca, nitrogênio, fósforo e potássio nos órgãos (folha, ponteiro e colmo) da cana-de-açúcar (cana-planta). A pesquisa foi realizada em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada em Carpina, PE. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm) e cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) arranjados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. A disponibilidade hídrica proporcionou um incremento no acúmulo de biomassa seca da folha e a adubação com nitrogênio elevou o acúmulo de biomassa seca da folha e colmo da cana-de-açúcar. A adubação nitrogenada de plantio aumentou o acúmulo de nitrogênio e fósforo nos órgãos da planta e de potássio na folha da cana-de-açúcar. As lâminas de água aumentaram o acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., disponibilidade hídrica, adubação nitrogenada, nutrientes, biomassa seca

Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under water depth and nitrogen doses

Abstract: The water availability in soil associated with adequate nitrogen supply are factors that can influence the accumulation of nutrients by plants becoming essential to the growth and development of crops, thus, the objective was to access effect of water depths and nitrogen doses on the accumulation of dry biomass, nitrogen, phosphorus and potassium in organs (leaf, stem and tip) of sugarcane (cane-plant). The research was conducted in field, at the Experimental Station of Sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, PE. The treatments were four water depths (1498;

1614; 1739 and 1854 mm) and five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹), arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. The water availability provided an increase in the dry biomass accumulation of leaf and the nitrogen fertilization increased the dry biomass accumulation of leaf and stem of sugarcane. The nitrogen fertilization increased the nitrogen and phosphorus accumulation in organs of the plant and potassium in leaf sugarcane. The water depths increased potassium accumulation in sugarcane leaf.

Keywords: *Saccharum* spp, water availability, nitrogen fertilization, nutrients, dry biomass

INTRODUÇÃO

Para o estabelecimento de uma nutrição adequada às plantas é necessário o conhecimento dos padrões normais de acúmulo de nutrientes na biomassa seca. Entretanto, a quantidade e a proporcionalidade dos nutrientes acumulados são funções de características do vegetal, como também, dos fatores externos que condicionam o processo. Os nutrientes extraídos do solo e acumulados pelas plantas variam com a cultivar, manejo do solo, ciclo da cultura e disponibilidade destes para o desenvolvimento das plantas (Benett et al., 2013).

Na cultura da cana-de-açúcar, o nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade e imprescindível para o crescimento vigoroso, desenvolvimento vegetativo, rendimento e qualidade da cultura. A grande importância do nitrogênio para essa cultura é devido a planta está enquadrada entre as gramíneas de maior eficiência fotossintética, ou seja, é classificada entre as plantas de metabolismo C4, caracterizada por apresentar elevada taxa fotossintética e por usar eficientemente o nitrogênio e a energia solar, sendo altamente eficaz na produção de biomassa seca (Franco et al., 2010). Segundo Otto et al. (2009) a adubação nitrogenada promove aumento significativo da biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar. Almeida Junior et al. (2011) também verificaram influência da adubação nitrogenada na produção de biomassa seca da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar por ser uma cultura que produz uma grande quantidade de biomassa, requer entradas substanciais de água e nitrogênio para alcançar elevadas produtividades (Freitas et al., 2012) logo, o uso da tecnologia da irrigação e da adubação nitrogenada torna-se imprescindível para o melhoramento do

desenvolvimento das plantas por meio do seu potencial genético (Dantas Neto et al., 2006; Farias et al., 2008).

A disponibilidade de água no solo, além de ser fundamental para o crescimento e desenvolvimento das culturas (Lawlor & Cornic, 2002), tem efeito na eficiência da adubação, sendo necessária para promover a solubilização e posterior disponibilização dos nutrientes para a planta. Segundo Oliveira et al. (2010a) a exportação média de nitrogênio, fósforo e potássio pelo colmo das variedades de cana-de-açúcar irrigadas é de 92, 15 e 188 kg ha⁻¹, respectivamente.

Assim, boas condições hídricas aliada ao fornecimento adequado de nitrogênio podem favorecer o crescimento radicular (Robinson et al., 2010) contribuindo para a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, desse modo, além de aumentar a produtividade de colmos da cana-de-açúcar a adubação nitrogenada e a disponibilidade hídrica podem gerar efeito sinérgico na absorção de outros nutrientes (Franco et al., 2007), o que levaria aos componentes das plantas a acumular em níveis adequados os nutrientes, tornando-as melhor nutridas, conferindo produtividade de colmos e qualidade do açúcar não somente em um ciclo de produção mas com efeito aditivo nos ciclos posteriores, proporcionando maior longevidade do canavial (Oliveira, 2011a).

De acordo com Vale et al. (2011) o nitrogênio e o fósforo são os nutrientes que mais limitam o crescimento da cana-de-açúcar. A omissão de nitrogênio promove a maior limitação de crescimento dessa cultura em relação aos outros macronutrientes, em virtude do nitrogênio exercer função estrutural, participando de diversos compostos orgânicos e processos fisiológicos vitais na planta (Prado et al., 2010).

Nesse contexto, o conhecimento da quantidade de nutrientes acumulada na planta irá fornecer informações que possam auxiliar no manejo da adubação, assim como também poderá contribuir para melhorar a produtividade das culturas por meio do incremento na produção de biomassa total, melhorando a transferência de assimilados para as partes colhidas da planta e favorecendo a eficiência do uso de fertilizantes (Carmo et al., 2011).

Desse modo, pesquisas que visem à quantificação e a alocação de nutrientes nos órgãos da parte aérea da cana-de-açúcar, se fazem necessárias. Assim, objetivou-se avaliar o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio no acúmulo biomassa seca, nitrogênio, fósforo e potássio na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo, na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W, a 180 m de altitude), no período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A caracterização química e física do solo foi realizada antes da instalação do experimento nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, de acordo com EMBRAPA (1997) (Tabela 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Camada m	Análises químicas									
	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	H+AL	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾
0-0,20	5,18	17,5	3,45	0,25	1,67	1,63	0,15	6,99	50,64	6,57
0,20-0,40	5,06	17,0	4,00	0,30	1,67	1,13	0,15	7,05	43,26	8,85
Camada M	Análises físicas						Classe textural			
	Ds ⁽⁴⁾ Mg m ⁻³	Areia	Silte	Argila	Θ _{cc} ⁽⁵⁾	Θ _{PMP} ⁽⁶⁾				
0-0,20	1,72	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenosa			
0,20-0,40	1,86	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenosa			

⁽¹⁾Capacidade de troca de cátions potencial; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ saturação por alumínio; ⁽⁴⁾ densidade do solo; ⁽⁵⁾ capacidade de campo; ⁽⁶⁾ ponto de murcha permanente

O preparo do solo foi realizado 15 dias antes da instalação do experimento e consistiu de uma gradagem (grade aradora e grade niveladora) para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação do calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos de plantio. Para correção do solo aplicou-se calcário na dose de 465 kg ha⁻¹. No cálculo da quantidade de calcário utilizou-se o método da neutralização do alumínio trocável.

Já a adubação foi realizada no dia do plantio e toda em fundação, com aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e o nitrogênio (de acordo com cada tratamento), utilizando-se como fontes o cloreto de potássio, superfosfato simples e ureia, respectivamente. Tanto para a recomendação da calagem quanto para a adubação foram utilizadas as recomendações de IPA (2008).

O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se mudas da variedade de cana-de-açúcar RB92579. As mudas foram repartidas, deixando três gemas por rebolo (tolete).

Os toletes foram distribuídos dentro dos sulcos de plantio totalizando 18 gemas por metro linear.

As parcelas experimentais foram constituídas por 10 fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 66,0 m². A área útil correspondeu às seis fileiras centrais, com 6,0 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 39,6 m².

Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (Li) e cinco doses de nitrogênio (Ni). As lâminas de água foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura, a saber: L₀=1498, L₁ = 1614, L₂ = 1739 e L₃ = 1854 mm, estando incluso nesses valores a precipitação pluvial acumulada e a lâmina inicial (1360 + 138 mm). As doses de nitrogênio foram determinadas com base nas recomendações de IPA (2008) para cana-planta, sendo: N₀ = 0, N₁= 20 N₂ = 40, N₃ = 80 e N₄ =120 kg ha⁻¹, arranjados em faixas e delineados em blocos casualizados, com quatro repetições (Figura 1).

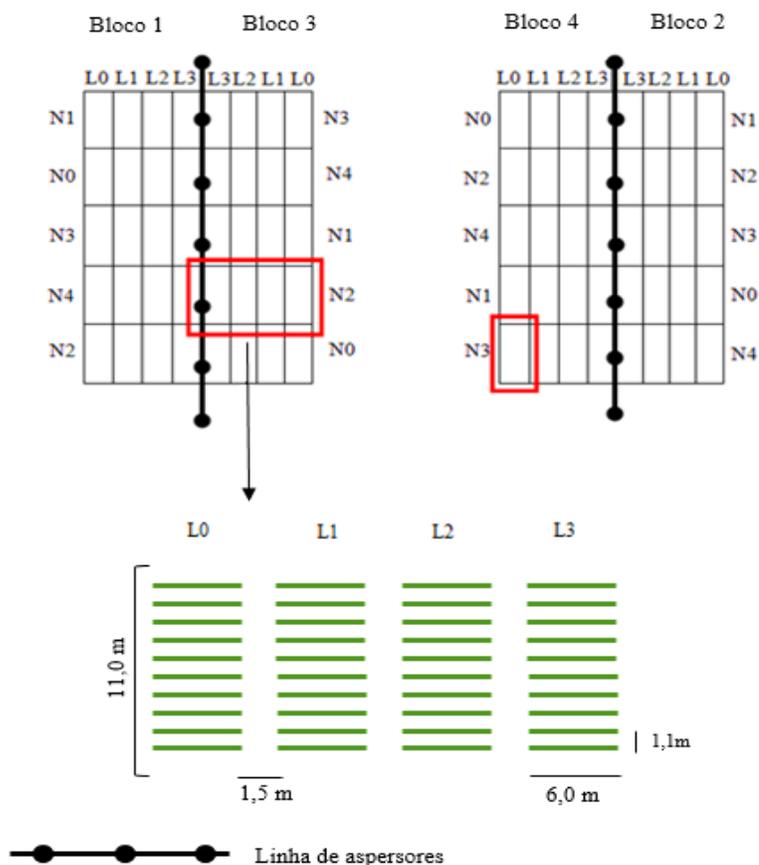


Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental

O sistema de irrigação utilizado foi o “line source sprinkler system” (aspersão em linha) de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). 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 foram do tipo minicanhão KS 1500 - PLONA, com bocais de diâmetro de $16,0 \times 5,0$ mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de $13,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e diâmetro molhado de 60 m.

A relação entre a lâmina referência L_2 (100%) e as demais, assim como as lâminas aplicadas em cada tratamento, foi obtida por avaliações do sistema de irrigação. Os ensaios para medição das lâminas de irrigação consistiram na distribuição de linhas de coletores perpendiculares à linha de aspersores, cinco coletores em cada parcela, espaçados de 1 m entre si, distribuídos em cada bloco experimental entre as linhas de plantio, sendo as lâminas definidas pela média do volume de água coletado nos cinco coletores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado

Lâminas	Ia (mm h^{-1})	Li (%)	La (mm)	L (mm)	P (mm)	Lt (mm)
L_3	27,8	150	356	138	1360	1854
L_2	18,5	100	241	138	1360	1739
L_1	9,6	48	116	138	1360	1614
L_0	0,0	0	0	138	1360	1498

Ia, intensidade de aplicação do sistema de irrigação; Li, lâmina de irrigação baseada na evapotranspiração da cultura; La, lâmina aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura (mm); P, precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento; L, lâmina inicial aplicada; Lt, lâmina total (mm)

A irrigação era realizada quando a diferença entre o somatório da evapotranspiração diária da cultura (ETc) e a precipitação ocorrida no período atingia 40% da água total disponível no solo. Para determinação da água total disponível no solo foram considerados os resultados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo, além da profundidade do sistema radicular. Os dados do balanço hídrico durante o cultivo da cana planta estão apresentados na Figura 2.

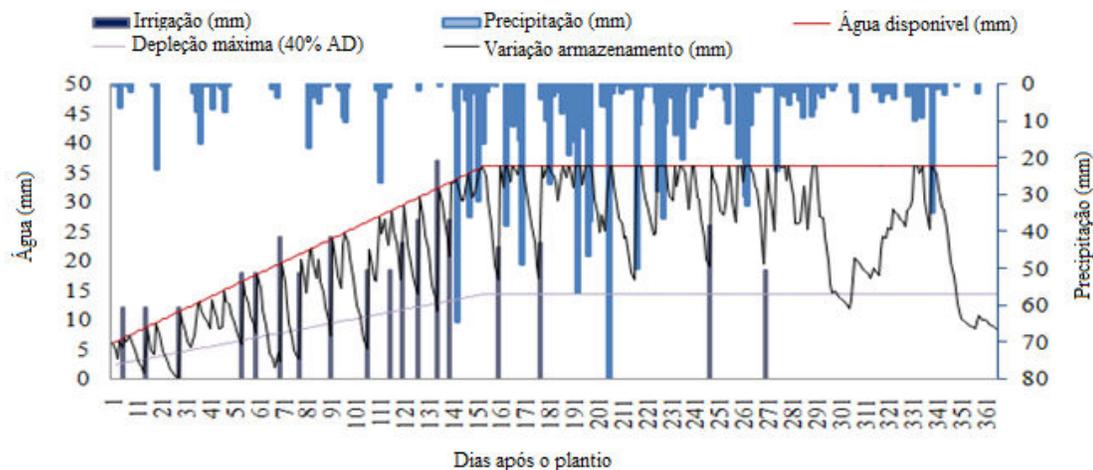


Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta

A evapotranspiração diária da cultura ET_c (mm) foi calculada pela seguinte equação:

$$ET_c = ECA \times K_p \times K_c \quad (1)$$

Em que,

ECA = evaporação do tanque Classe A, mm;

K_p = coeficiente do tanque Classe A;

K_c = coeficiente de cultura.

Os valores de K_p foram obtidos a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e evaporação do tanque classe A, instalado próximo à área experimental, com vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m (Doorenbos & Pruitt, 1976). Para o K_c foram utilizados valores recomendados por Doorenbos & Kassam (1994) para os estádios de desenvolvimento da planta, visando-se determinar a evapotranspiração da cultura em cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de cultura (K_c) para cana planta em diferentes períodos de desenvolvimento.

Cana planta	
Dias	K_c
1-61	0,40
62-153	0,75
154-244	1,10
245-334	1,25
335- 360	0,70

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Nos três primeiros meses do ciclo da cultura foram realizadas irrigações uniformes em todos os tratamentos, totalizando uma lâmina de 138 mm, devido ao plantio ter sido realizado no verão, época mais seca do ano, de modo a assegurar uniformidade de brotação e estabelecimento das plantas, utilizando-se o sistema de aspersão do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água. Em seguida, iniciou-se a aplicação das lâminas diferenciadas, utilizando-se o sistema de aspersão em linha “line source sprinkler system”.

Aos 270 DAP foi interrompida a irrigação promovendo assim um estresse hídrico na cultura. O estresse hídrico teve como objetivo induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos & Kassam (1994) durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo.

Em relação ao fator doses de nitrogênio, as quantidades de nitrogênio foram definidas tomando-se como ponto de partida a dose considerada padrão para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta) no Estado de Pernambuco, que é de 40 kg ha^{-1} (IPA, 2008), as demais doses aplicadas foram determinadas em termos percentuais a partir da dose padrão, utilizando-se como fonte de nitrogênio a ureia.

Para obtenção das concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio foi realizada coleta da parte aérea da planta, no final do ciclo da cultura (349 DAP). A coleta foi realizada nas fileiras externas (1^a, 2^a, 9^a e 10^a linhas de plantas) de cada parcela experimental, de modo que foram coletadas nas diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio, sendo 10 plantas retiradas aleatoriamente para serem analisadas. A parte aérea da planta foi separada em folha, ponteiro e colmo.

A determinação de nitrogênio foi pelo método do destilador de Kjeldahl; a concentração de potássio pela técnica de fotometria de chama e o de fósforo pelo método colorimétrico do molibidato-vanadato, no espectrofotômetro.

Após ser separado, esse material foi triturado em máquina forrageira e em seguida retirou-se amostras que foram colocadas em sacos de papel previamente identificados e levadas à estufa com circulação forçada de ar a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante. As amostras secas foram processadas em moinho do tipo Willey e, por conseguinte, determinaram-se as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio. Para obtenção das concentrações dos nutrientes foram realizadas as digestões nítrica (fósforo e potássio) e sulfúrica (nitrogênio), de acordo com a metodologia da EMBRAPA (2009) e de Bezerra Neto & Barreto (2011), respectivamente.

O nitrogênio foi determinado pelo método do destilador de Kjeldahl, a concentração de potássio pela técnica de fotometria de chama e o fósforo pelo método Colorimétrico do Molibdato-vanadato, no espectrofotômetro (Bezerra Neto & Barreto, 2011).

As quantidades de nutrientes acumulados foram calculadas pelo produto da biomassa seca versus a concentração do nutriente em cada órgão da planta, convertendo-se para kg ha^{-1} , por meio da multiplicação pelo número de plantas em cada tratamento.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e posterior análise de variância e regressão pelo teste F a 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR, versão 5.0 (Ferreira, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 4 encontra-se um resumo da ANOVA para as características acúmulo de biomassa seca (BS), nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar em função das lâminas de água e doses de nitrogênio. Observou-se efeito significativo da interação lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N) sobre o acúmulo de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar. Verificou-se ainda que as lâminas de água influenciaram de maneira isolada o acúmulo de biomassa seca, potássio e fósforo da folha de cana-de-açúcar e as doses de nitrogênio o acúmulo de biomassa seca da folha e colmo, o acúmulo de nitrogênio, potássio e fósforo da folha e o acúmulo de nitrogênio e fósforo no ponteiro e colmo da planta.

Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios do acúmulo de biomassa seca (BS), nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar, em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N)

F.V	GL	Variáveis											
		Folha			Ponteiro			Colmo					
		ton ha^{-1}	-----kg ha^{-1} -----		ton ha^{-1}	-----kg ha^{-1} -----		ton ha^{-1}	-----kg ha^{-1} -----				
	MS	N ^a	K ^a	P	MS ^a	N ^a	K ^a	P ^a	MS	N	K ^a	P	
BL	3	6,13*	3,60 ^{ns}	0,30 ^{ns}	2,56 ^{ns}	1,15 ^{ns}	4,45*	1,96 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,85 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,37 ^{ns}
L	3	4,81*	2,29 ^{ns}	4,45*	5,61*	1,27 ^{ns}	3,10 ^{ns}	3,53 ^{ns}	1,05 ^{ns}	2,13 ^{ns}	2,46 ^{ns}	0,50 ^{ns}	1,21 ^{ns}
Erro(L)	9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
N	4	14,78**	9,19**	5,83**	7,41**	2,44 ^{ns}	8,41**	2,15 ^{ns}	4,17*	10,68**	9,89**	1,44 ^{ns}	12,8**
Erro(N)	12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LxN	12	0,52 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,18 ^{ns}	1,98*	1,60 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,12 ^{ns}	1,24 ^{ns}
Erro(LxN)	36	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Média		13,25	88,50	67,70	16,80	3,56	42,10	33,73	3,19	55,28	203,20	88,78	49,8
CV _L (%)		12,07	10,71	14,04	13,52	13,41	8,32	10,7	14,40	25,78	23,5	13,30	28,4
CV _N (%)		15,22	18,08	22,06	16,77	14,16	18,52	18,2	11,88	18,44	25,8	23,21	18,7
CV _{LxN} (%)		16,99	16,06	18,28	19,79	14,85	14,18	19,5	15,17	26,22	26,9	18,24	28,5

^{ns} não significativo, * significativo a 5%, ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; Valores de F calculado;

^aValores de F calculado com dados transformados $(y+0,5)^{0,5}$

Avaliando-se o acúmulo de biomassa seca da folha em função das lâminas de água, verificou-se ajuste ao modelo linear de regressão, com aumento em resposta às lâminas de água totais disponíveis. O maior acúmulo de biomassa seca ($14,35 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi obtido na lâmina 1854 mm, enquanto o menor ($10,80 \text{ Mg ha}^{-1}$) na lâmina 1498 mm, com um aumento de 32,87% no acúmulo de biomassa seca da folha da cana-de-açúcar (Figura 3A). Segundo Calheiros et al. (2011) a disponibilidade hídrica prolonga a atividade fotossintética da planta resultando em um maior acúmulo de biomassa seca.

As fases de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar requerem elevada disponibilidade hídrica, assim como características morfológicas na planta que favoreçam a interceptação da radiação solar (Bonnett et al., 2006). Dessa forma, a irrigação na fase de perfilhamento e crescimento da planta favorece o desenvolvimento do potencial genético da planta, confirmando sua capacidade em captar radiação solar e convertê-la em biomassa seca (Oliveira et al., 2010b). Para o acúmulo de biomassa seca no colmo e ponteiro não foi possível ajustar equações de regressão, obtendo-se valores médios de $48,08$ e $3,56 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente.

Em relação ao efeito das doses de nitrogênio sobre o acúmulo de biomassa seca nos órgãos da planta (Figura 3B), observou-se também resposta linear no acúmulo de biomassa seca de colmo e folha com o aumento das doses de nitrogênio aplicadas. Os maiores acúmulos de biomassa seca observados ($65,43$ e $18,38 \text{ Mg ha}^{-1}$) foram obtidos na dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} e os menores ($47,43$ e $9,26 \text{ Mg ha}^{-1}$) quando não se aplicou adubação nitrogenada, havendo um incremento de 37,95 e 98,49% de biomassa seca para colmo e folha, respectivamente.

Bologna-Campbell et al. (2013) estudando o efeito de doses de nitrogênio (0, 40, 80 e 120 kg ha^{-1}) em cana-planta, observaram que a dose de de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} aumentou o teor de biomassa seca da parte aérea da planta em 37% quando comparada ao tratamento sem adição de nitrogênio. Em avaliação realizada no final do ciclo da cultura, Trivelin et al. (2002) constataram aumento linear na biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar em resposta à aplicação de nitrogênio.

O nitrogênio é um nutriente fundamental no metabolismo das plantas, pois é utilizado na síntese de proteínas e outros compostos orgânicos. Segundo Marschner (2012) mais de 90% da biomassa seca da planta consiste em compostos orgânicos tais como celulose, amido, lipídeos e proteínas e a produção de biomassa seca está diretamente relacionada à fotossíntese, que é o processo primário de síntese destes compostos orgânicos em plantas verdes.

O acúmulo de biomassa seca do ponteiro da cana-de-açúcar não foi influenciado pelas doses de nitrogênio, apresentando valor médio de 3,56 Mg ha⁻¹.

De maneira geral, no presente estudo, observou-se que o acúmulo de biomassa seca da parte aérea da planta foi maior no colmo em relação aos outros órgãos da planta. Com a finalidade de avaliar o crescimento da cana-de-açúcar em uma área plantada com a variedade RB855035, em Chivacoa, na Venezuela, Rengel et al. (2011) também constataram que o acúmulo de biomassa seca no final do ciclo é maior no colmo. Segundo os autores no final do ciclo a planta acumulou 43,7 Mg ha⁻¹ de biomassa aérea seca, com 75,1 % correspondente ao colmo e 24,9 % ao tecido foliar. Para estes, a partir dos 185 dias se inicia uma maior produção de colmos em relação à emissão de folhas, traduzindo-se em um rápido aumento de produção de biomassa seca.

Oliveira et al. (2010) observaram que a partir dos 120 dias após o plantio a quantidade de biomassa seca acumulada no colmo da cana passa a ser superior à acumulada na folha + ponteiro, mantendo-se superior até o final do ciclo da cultura.

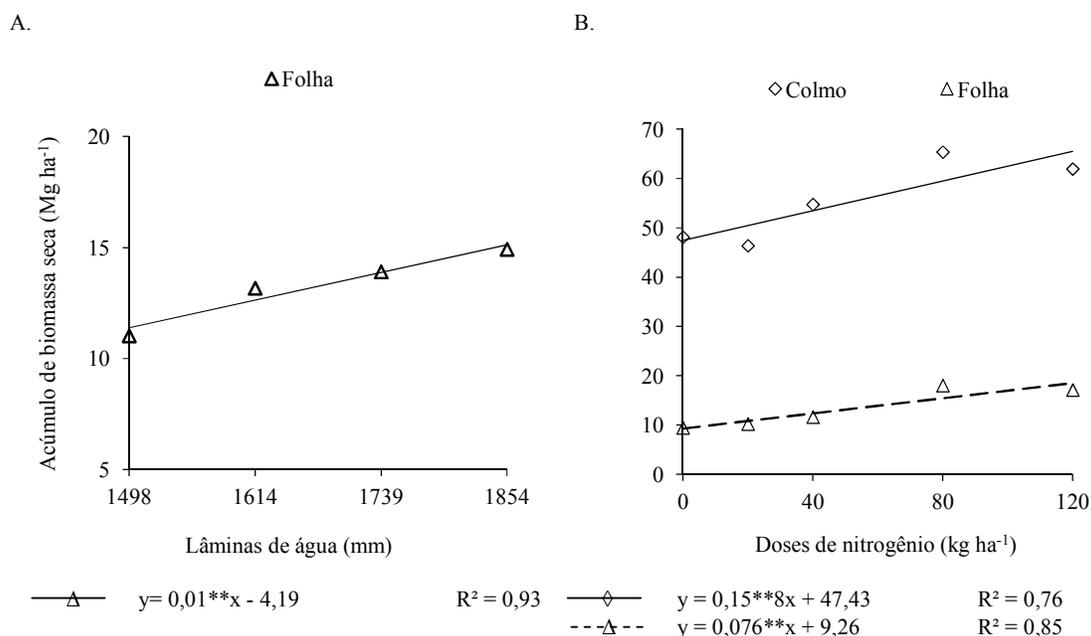


Figura 3. Acúmulo de biomassa seca do colmo, ponteiro e folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

O acúmulo de nitrogênio na folha, ponteiro e colmo da cana-de-açúcar está representado pelas Figuras 4A, 4B e 4C, respectivamente. Observou-se um aumento significativo de acordo com o acréscimo das doses de nitrogênio sobre o acúmulo de

nitrogênio na folha e colmo da planta (Figuras 4A e 4C). O maior acúmulo (121,01 e 258,74 kg ha⁻¹) foi obtido nas plantas adubadas com a dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ e o menor (63,53 e 160,7 kg ha⁻¹) nas plantas que não receberam adubação nitrogenada, para folha e colmo, respectivamente.

O maior acúmulo na dose máxima pode ser explicado pela maior disponibilidade de nitrogênio, assim como também pela maior produção de biomassa seca nessa dose. Vale et al. (2013) aplicando doses de nitrogênio (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) no cultivo da cana-de-açúcar e avaliando o seu efeito na concentração de nitrogênio nas folhas também observaram que o acúmulo de nitrogênio nas folhas verdes e nos colmos incrementam com o aumento das doses e com as doses de 122 e 167 kg ha⁻¹ obteve-se máximo acúmulo de nitrogênio (96,3 e 98,8 kg ha⁻¹).

Franco et al. (2007) avaliando o acúmulo de macronutrientes na parte aérea da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada também constataram que o nitrogênio foi acumulado significativamente em maiores quantidades em função das doses de nitrogênio aplicadas, tendo este acúmulo resposta linear.

O maior acúmulo de nitrogênio observado na pesquisa foi semelhante ao encontrado por Oliveira et al. (2011b), que avaliando a extração de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar, observaram que a variedade RB92579 extraiu, em média, 260 kg ha⁻¹ de nitrogênio, porém essa extração foi para a dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹.

De grande importância para a planta, o nitrogênio é constituinte essencial dos aminoácidos, principais integrantes de proteínas, que além de atuar na divisão celular e na produção de clorofila (Malavolta, 2006) contribui para o crescimento e desenvolvimento da planta.

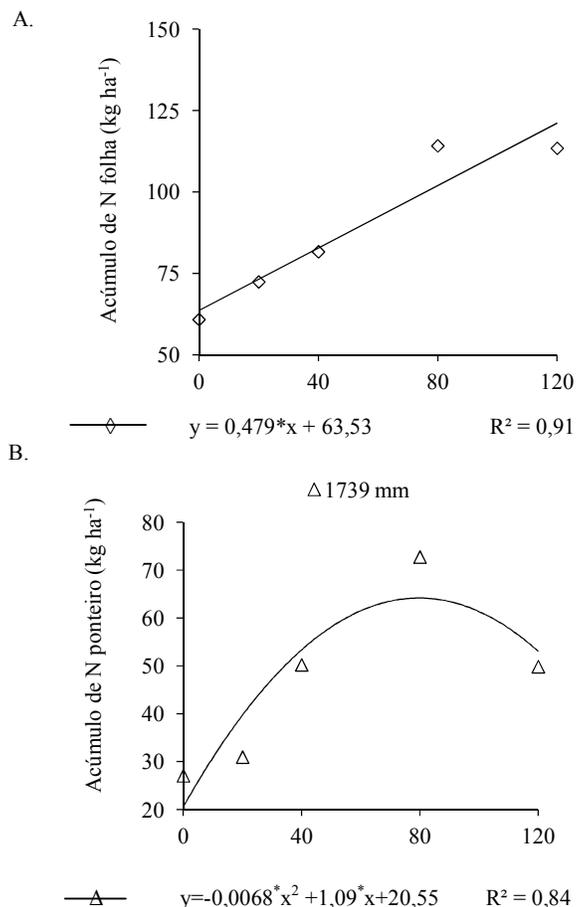
Para o efeito da interação lâminas de água e doses de nitrogênio sobre o acúmulo de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar verificou-se efeito significativo em resposta às doses de nitrogênio na lâmina 1739 mm, ajustando-se equação de regressão quadrática (Figura 4B). O máximo acúmulo de nitrogênio (64,55 kg ha⁻¹) foi obtido na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹, decrescendo em seguida, com acúmulo de 55,91 kg ha⁻¹ na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹. Desse modo, houve um aumento de 214, 1% no acúmulo de nitrogênio no ponteiro da cana-de-açúcar da ausência de adubação nitrogenada para a dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹.

O nitrogênio absorvido pelas raízes pode ser diretamente transportado, por fluxo de massa à parte aérea da planta, onde ocorre a sua assimilação (Silva & Casagrande, 1983). Porém o acúmulo de nutrientes nos diferentes órgãos da planta apresenta

variação, em função das atividades metabólicas e fisiológicas destes órgãos (Minami & Haag, 2003). A principal função da folha e do ponteiro, por exemplo, é servir como local em que é realizada a fotossíntese, processo que depende de boas condições hídricas e de um fornecimento adequado de nitrogênio, favorecendo o acúmulo do nutriente nesse órgão em decorrência da demanda para realização deste processo que, por conseguinte, irá favorecer o crescimento e desenvolvimento da planta.

Nas lâminas 1498, 1614 e 1854 mm não houve efeito da adubação nitrogenada sobre o acúmulo de nitrogênio no ponteiro da planta, apresentando valores médios de 38,34, 42,94 e 41,03 kg ha⁻¹, respectivamente. Quando o estresse hídrico aumenta, seja por excesso ou falta de água, a resposta à fertilização diminui (Carvalho et al., 2009).

Por meio dos resultados pôde-se observar que o acúmulo de nitrogênio no colmo da planta foi superior ao nitrogênio incorporado ao solo via fertilização, isso pode ter ocorrido em decorrência da entrada de nitrogênio no solo por meio de outras fontes, como mineralização da matéria orgânica e de resíduos culturais presentes no solo, precipitação atmosférica e fixação biológica do N₂ atmosférico por microorganismos (Taiz & Zeiger, 2013).



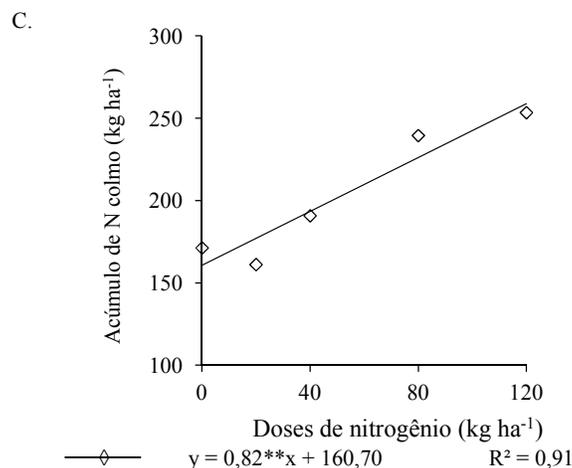


Figura 4. Acúmulo de nitrogênio na folha (A), ponteiro (B) e colmo (C) da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio

No que diz respeito ao acúmulo de fósforo nos órgãos da planta, verificou-se efeito quadrático da regressão para o acúmulo de fósforo na folha da cana-de-açúcar em função das lâminas de água. O acúmulo máximo de fósforo na folha (19,13 kg ha⁻¹) foi observado na lâmina 1756 mm, representando um aumento de 37,43% em relação a lamina 1498 mm (13,92 kg ha⁻¹), com posterior redução, atingindo na lâmina 1854 mm um acúmulo de 18,4 kg ha⁻¹ de fósforo na folha (Figura 5A). A alta solubilidade de sais orgânicos na água favorece a absorção de nutrientes pelas plantas, porém o excesso de água pode ser prejudicial, promovendo a lixiviação de nutrientes.

Observou-se também efeito das doses de nitrogênio sobre o acúmulo de fósforo na folha, ajustando-se equação de regressão linear, sendo o maior acúmulo (22,5 kg ha⁻¹) observado na maior lâmina 1854 mm e o menor acúmulo de fósforo (12,42 kg ha⁻¹) verificado na menor lâmina 1498 mm (Figura 5B).

Segundo Campbel (2000) as funções básicas do nitrogênio são favorecer o crescimento e a cor verde escura das plantas, ser constituinte de proteínas e enzimas e promover o desenvolvimento do sistema radicular melhorando a absorção de outros nutrientes presentes na solução do solo, que foi o que provavelmente ocorreu na presente pesquisa, o uso de doses de nitrogênio favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular da planta e conseqüentemente a absorção de nutrientes como o fósforo e o potássio.

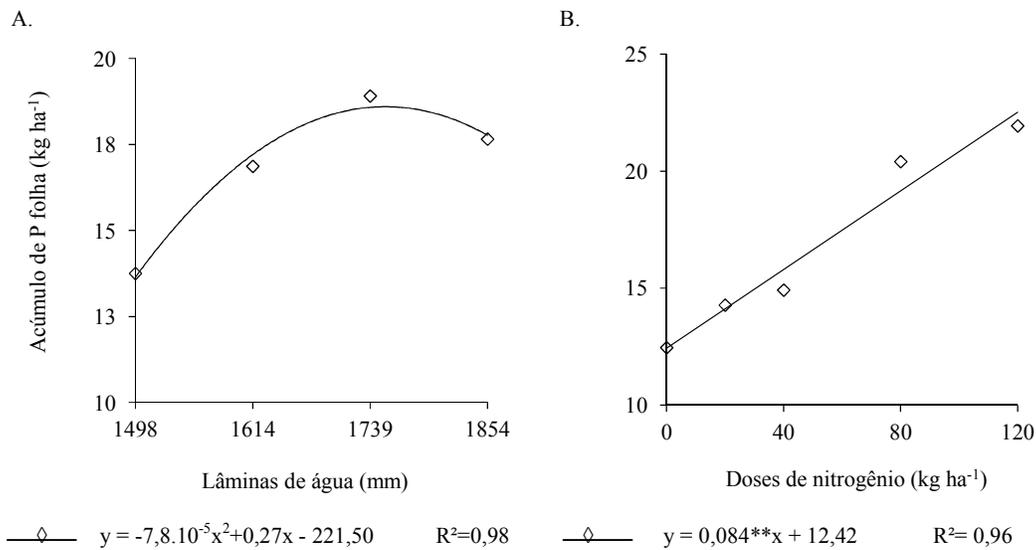


Figura 5. Acúmulo de fósforo na folha da cana-de-açúcar em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

Para o acúmulo de fósforo no ponteiro e colmo (Figuras 6A e 6B) também foi verificado resposta linear de acordo com o incremento da adubação nitrogenada, sendo os maiores acúmulos de fósforo no ponteiro e colmo (3,55 e 60,94 kg ha⁻¹) observados na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ e os menores (2,83 e 41,26 kg ha⁻¹) quando não se adubou com nitrogênio, respectivamente.

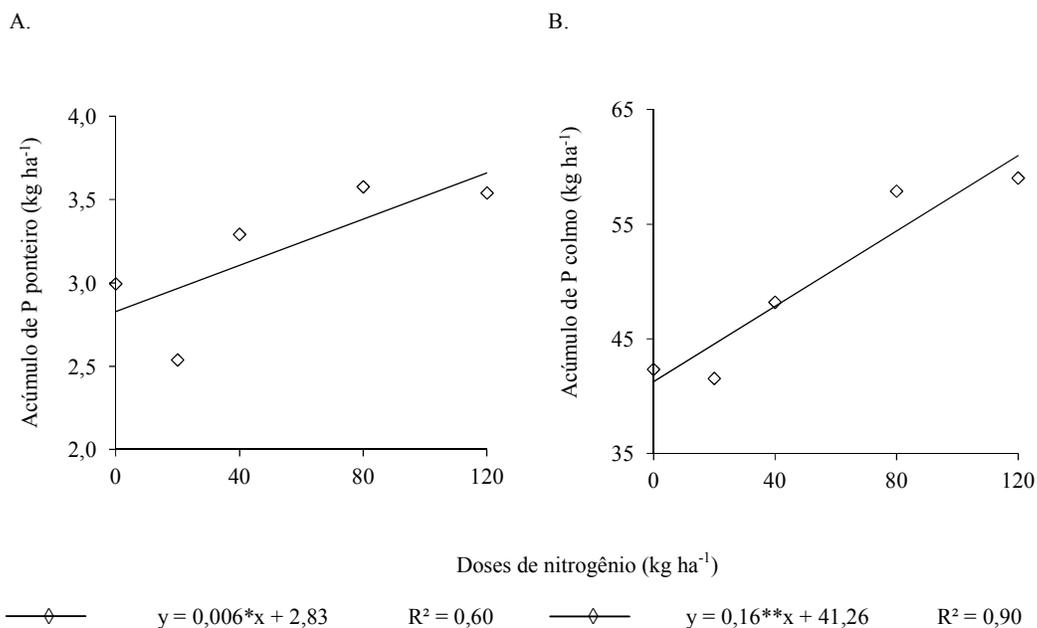


Figura 6. Acúmulo de fósforo no ponteiro (A) e colmo (B) da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das doses de nitrogênio

Em relação ao acúmulo de potássio, observou-se resposta significativa apenas para o potássio acumulado na folha em função das lâminas de água e das doses de nitrogênio (Figura 7A e 7B). O maior acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar em função das lâminas de água foi observado na lâmina 1854 mm ($76,04 \text{ kg ha}^{-1}$) e o menor acúmulo de potássio ($56,46 \text{ kg ha}^{-1}$) na lâmina 1498 mm, havendo um aumento de 34,68% da menor para a maior lâmina de água disponível (Figura 7A).

Segundo Dalri et al. (2008) à medida que se aumenta a disponibilidade de água no solo há um aumento na eficiência de absorção dos nutrientes, principalmente aqueles com elevada solubilidade, como o nitrogênio e o potássio, já que estes estarão disponíveis na solução do solo para as plantas, facilitando o processo de absorção.

Para o acúmulo de potássio na folha em função da adubação nitrogenada, também foi verificado aumento linear, havendo incremento de 86,55% da ausência de nitrogênio ($49,22 \text{ kg ha}^{-1}$) para a dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} ($91,82 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figura 7B).

Franco et al. (2010) também constataram aumento linear no acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar com o uso de doses de nitrogênio. O potássio é essencial ao desenvolvimento das plantas e bastante requerido durante as fases de crescimento, reprodutiva e vegetativa, visto que atua na regulação osmótica, mecanismo estomático, fotossíntese, ativação enzimática e crescimento meristemático (Figueiredo, 2006).

De modo geral, observou-se que o colmo foi o órgão que acumulou maior quantidade de nutrientes. A partir do momento em que a planta começa a crescer, há um incremento na absorção de nutrientes. A maior taxa de acúmulo de biomassa seca e nutrientes registrados no colmo sugerem que estes foram os drenos preferenciais da planta.

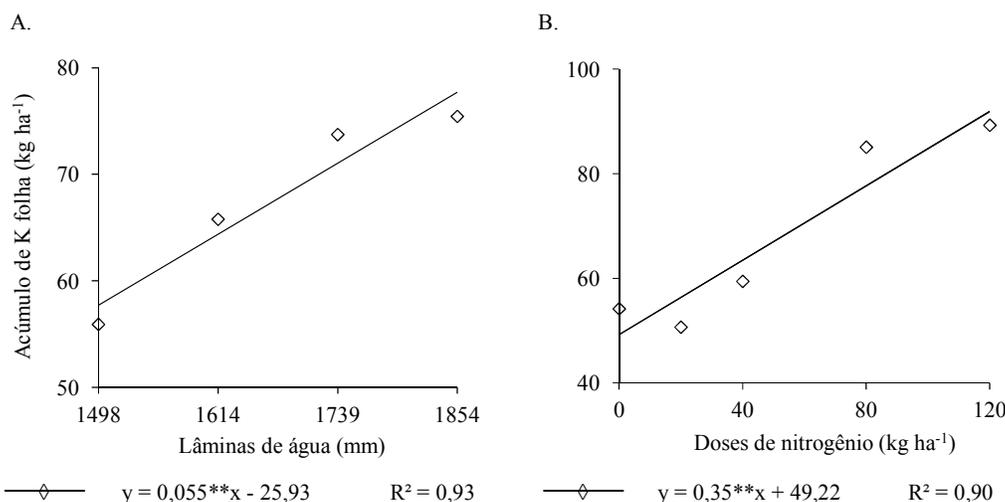


Figura 7. Acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

CONCLUSÕES

1. A disponibilidade hídrica proporcionou um incremento no acúmulo de biomassa seca da folha e a adubação nitrogenada elevou o acúmulo de biomassa seca da folha e colmo da cana-de-açúcar.
2. A adubação nitrogenada de plantio aumentou o acúmulo de nitrogênio e fósforo nos diferentes órgãos da planta e de potássio na folha da cana-de-açúcar.
3. Os nutrientes mais acumulados pelas plantas foram na ordem de grandeza: nitrogênio>potássio>fósforo; em maiores quantidades no colmo.
4. As lâminas de água aumentaram o acúmulo de potássio na folha da cana-de-açúcar.

LITERATURA CITADA

- Almeida Júnior, A. B.; Nascimento, M. F. S.; Silva, F. B. V.; Gomes, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.10, 2011.
- Benett, C. G. S.; Buzetti, S.; Benett, K. S. S.; Texeira Filho, M. C. M.; Costa, N. R.; Maeda, A. S.; Andreotti, M. Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. *Ciências Agrárias*, v. 34, p. 1077-1088, 2013.
- Bezerra Neto, E.; Barreto, L. P. *Métodos de Análises Químicas em plantas*. Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, 2011.
- Bologna-Campbell, I.; Franco, H. C. J.; Vitti, A. C.; Faroni, C. E.; Costa, M. C. G.; Trivelin, P. C. O. Impact of Nitrogen and Sulphur Fertilizers on Yield and Quality of Sugarcane Plant Crop. *Sugar Tech*, v. 15, n.4, p. 424-428, 2013.
- Bonnett, G. D.; Hewitt, M. L.; Glassop, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.57, p.1087-1095, 2006.
- Calheiros, A. S.; S. de A.; Aristidis, E. V. dos S. Acúmulo de nutrientes e produção de sacarose de duas variedades de cana-de-açúcar na primeira rebrota, em função de doses de fósforo. *STAB*, v.29, n.3, 2011.
- Campbell, M. K. *Bioquímica*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2000.
- Carmo, G. A.; Oliveira, F. R. A.; Medeiros, J. F.; Oliveira, F. A.; Campos, M. S.; Freitas, D. C. Teores foliares, acúmulo e partição de macronutrientes na cultura da abobora irrigada com água salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 5, p. 512-518, 2011.

- Carvalho, C. M.; Azevedo, H. M.; Dantas Neto, J.; Farias, C. H. A.; Silva, C. T. S.; Gomes Filho, R. R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.4, p.72-77, 2009.
- Dantas Neto, J.; Figueredo J. L. da C.; Farias, C. H. de A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. de. 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.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília, 2009. 627p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina: Planta, 2006.
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Azevedo, H. M. de; Dantas Neto, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 356-362, 2008.
- Ferreira, D. F. SISVAR, versão 5.0 (Build 67), DEX/FLA. 2003.
- Figueiredo, P. A. M. Particularidades a respeito do potássio. *STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 24, n. 6, p. 25, 2006.
- Franco, H. C. J.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Trivelin, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. *Brangantia*, v. 66, p.521-526, 2007.

- Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O.; Faroni, C. E.; Otto, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. *Scientia Agricola*, v.67, n.5, p.579-590, 2010.
- Freitas, A. S.; Silva, A. R. A.; Bezerra, F. M. L.; Ferreira, C. S.; Andrade, R. R. Crescimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) irrigada com água de esgoto doméstico tratado. *Conexão Ciência e Tecnologia*. v. 6, p. 27-43, 2012.
- 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.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IPA. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação. 2 ed. rev. Recife: 2008
- Lawlor, D. W.; Cornic, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, v. 25, p. 275-294, 2002.
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São paulo: Ceres, 2006. 638p.
- Marschner, P. Marschner 's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. New York, Academic Press, 2012, 651p.
- Minami, K; Haag, H. P. O tomateiro. 2 ed. Campinas: Fundação Cargill, p.27-34, 2003.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, F. J.; Oliveira, R. I.; Freire, M. B. G. S.; Simões Neto, D. E.; Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p. 1343-1352, 2010a.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, F. J.; oliveira, R. I.; Oliveira, A. C.; Freire, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 579-588, 2011b.
- Oliveira, E. C. A. de; Oliveira, R. I. de; Andrade, B. M. T. de; Freire, F. J.; Lira Júnior, M. A.; Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.9, p.951-960, 2010b.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, J. F.; Oliveira, A. C.; Simões Neto, D. E.; Rocha, A. T.; Carvalho, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, n.6, p.617-625, 2011a.

- Otto, R.; Franco, H. C. J.; Faroni, C. E.; Vitti, A. C.; Trivelin, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, n.4, p.398-405, 2009.
- Prado, R. M.; Franco, C. F.; Puga, A. P. Deficiências de macronutrientes em plantas de soja cv. BRSMG 68 (Vencedora) cultivada em solução nutritiva. *Comunicata Scientiae*, v.1, n. 2, p.114-119. 2010.
- Rengel, M.; Gil, F.; Montaña, J. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña-de-azúcar. *Bioagro*, v. 21, n.3, p. 43-50, 2011.
- Robinson, N.; Gamage, H.; Whan, A.; Fletcher, A.; Brackin, R.; Holst, J.; Lakshamanan, P.; Schmidt, S. Evidence of differences in nitrogen use efficiency in sugarcane genotypes. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 31., 2009. Balina. Proceedings...Balina, 2010. p. 256-264.
- Silva, L. C. F.; Casagrande, J. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (macronutrientes). In: ORLANDO FILHO, J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983, p. 77-99.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
- Trivelin, P. C. O.; Vitti, A. C.; Oliveira, M. W.; Gava, G. J. C.; Sarriés, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.637-646, 2002.
- Vale, D. W.; Pardo, R. M.; Avalhães, C.; Hojo, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.6, n.2, p.189-196, 2011.
- Vale, D. W.; Prado, R. de 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 V

Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Resumo: A irrigação e a adubação nitrogenada são fatores de produção fundamentais para o aumento de produtividade e qualidade da cana-de-açúcar, assim, objetivou-se por meio da presente pesquisa avaliar o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio sobre a produtividade de colmos e de açúcar e sobre os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (cana-planta). A pesquisa foi realizada em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada em Carpina, PE. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm) e cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) arranjados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. As lâminas de água aumentaram o rendimento de colmos e açúcar em todas as doses de nitrogênio aplicadas. O teor de sólidos solúveis e a fibra da cana-de-açúcar diminuíram com o aumento das lâminas de água independentemente das doses de nitrogênio. Não houve efeito das lâminas de água e das doses de nitrogênio sobre o teor de sacarose do caldo da cana-de-açúcar (Pol Caldo).

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, rendimento, atributos tecnológicos, irrigação, adubação nitrogenada

Productivity and technological quality sugarcane subject to water depths and nitrogen doses

Abstract: The irrigation and nitrogen fertilization are key production factors to increase sugarcane productivity and quality, thus, it was performed this research in order to evaluate the effect of water depths and nitrogen doses on the productivity of stems and sugar productivity and, also, the technological attributes of sugarcane (plant-cane). The research was conducted in field, at the Experimental Station of Sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, PE. The treatments consisted of four water depths (1498; 1614; 1739 and 1854 mm) and five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹), arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. The water depths increased stems and sugar the yield in all levels of

nitrogen applied. The soluble solids content and sugarcane fiber decreased with increasing water depths, regardless of nitrogen doses. There was no effect of water depths and nitrogen about sucrose content of sugarcane broth (Broth Pol).

Keywords: *Saccharum spp.*, yield, technological attributes, irrigation, nitrogen fertilization.

INTRODUÇÃO

Com a forte expansão da indústria sucroalcooleira nos últimos anos, as áreas de canaviais brasileiros atualmente são mais de 9,0 milhões de hectares, dando ao Brasil o título de maior produtor mundial de cana-de-açúcar. O Estado de Pernambuco tem sua importância no cultivo da cana-de-açúcar, atualmente com uma produção de 14 milhões de toneladas, representando 2,2% da produção nacional (CONAB, 2015).

Para satisfazer a expansão do mercado de cana-de-açúcar o setor sucroalcooleiro deverá investir em novas tecnologias que proporcionem o aumento do rendimento da cultura (Farias, 2008). A irrigação é hoje uma das alternativas tecnológicas em busca da verticalização da produção da cana-de-açúcar. No Estado de Pernambuco, o uso dessa tecnologia é imprescindível, visto que a produção é basicamente fundamentada na agricultura de sequeiro ou apenas irrigação de “salvação” e isso pode acarretar em reduções na produtividade.

A tradição do cultivo de cana-de-açúcar de sequeiro é alicerçada no paradigma de que a irrigação é economicamente inviável nas condições edafoclimáticas do estado (Frizonne, 2001).

Mas nas regiões canavieiras do Brasil, como a Zona da Mata do Nordeste, a disponibilidade de área para expansão da cana-de-açúcar vem se tornando cada vez mais escassa, sendo imprescindível manejar a cultura adequadamente em busca de maiores produtividades por unidade de área (Oliveira et al., 2010). Contudo, a má distribuição pluviométrica comumente observada nessas regiões produtoras restringe o crescimento da cultura e proporcionam impactos negativos da produtividade e qualidade dos canaviais (Wiedenfeld & Enciso, 2008).

Grande parte das precipitações na referida região concentra-se em três ou quatro meses, sendo em geral, os demais meses do ano, isentos de chuvas (Chaves et al., 2013), isso resulta em um menor armazenamento de água no solo durante o período seco,

causando uma redução na evapotranspiração, no crescimento e na produtividade da cultura. Esse panorama exige análise de decisão quanto à viabilidade da tecnologia da irrigação da cultura no Estado de Pernambuco.

Em pesquisas envolvendo culturas de sequeiro e irrigada (Andrade Júnior et al.; 2012; Oliveira et al., 2011b, Umesh, 2013) as conclusões são unânimes em afirmar o incremento de produção da cultura irrigada em relação à cultura sem irrigação.

Associada à irrigação, a adubação nitrogenada é também uma alternativa para aumentar a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. A cultura produz uma grande quantidade de biomassa, requerendo entradas substanciais de água e nitrogênio para alcançar elevadas produtividades (Wiedefeld, 2000). Na cultura da cana-de-açúcar o nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade e essencial para o crescimento vigoroso, desenvolvimento vegetativo, rendimento e qualidade da cana.

Segundo Epstein & Bloom (2006) o nitrogênio é um nutriente essencial a vida vegetal, pois se constitui de estruturas do protoplasma da célula, da molécula de clorofila, dos aminoácidos, proteínas e de várias vitaminas, além de influenciar as reações metabólicas das plantas. Proporciona o aumento do desenvolvimento vegetativo e do rendimento da cultura, além disso, promove muitas modificações morfofisiológicas na planta e está relacionado à fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular e ao desenvolvimento e atividade das raízes.

Considerando a importância da irrigação e da adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar é fundamental um planejamento adequado que considere as necessidades hídricas, o manejo apropriado da água e do nitrogênio e o conhecimento das peculiaridades fisiológicas da planta.

Nesse contexto, objetivou-se através da presente pesquisa avaliar a produtividade e a qualidade da cana-de-açúcar submetida à lâminas de água e doses de nitrogênio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo, na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W, a 180 m de altitude), no período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A caracterização química e física do solo foi realizada antes da instalação do experimento nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, de acordo com EMBRAPA (1997)

(Tabela 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Camada m	Análises químicas									
	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	H+AL	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾
	-----cmol _c dm ⁻³ -----			-----m ³ -----						
0-0,20	5,18	17,5	3,45	0,25	1,67	1,63	0,15	6,99	50,64	6,57
0,20-0,40	5,06	17,0	4,00	0,30	1,67	1,13	0,15	7,05	43,26	8,85

Camada M	Análises físicas							Classe textural
	D _s ⁽⁴⁾ Mg m ⁻³	Areia	Silte	Argila	Θ _{cc} ⁽⁵⁾	Θ _{pmp} ⁽⁶⁾		
	-----g kg ⁻¹ -----			---m ³ m ⁻³ ---				
0-0,20	1,72	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenosa	
0,20-0,40	1,86	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenosa	

⁽¹⁾Capacidade de troca de cátions potencial; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ saturação por alumínio; ⁽⁴⁾ densidade do solo; ⁽⁵⁾ capacidade de campo; ⁽⁶⁾ ponto de murcha permanente

O preparo do solo foi realizado 15 dias antes da instalação do experimento e consistiu de uma gradagem (grade aradora e grade niveladora) para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação do calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos de plantio. Para correção do solo aplicou-se calcário na dose de 465 kg ha⁻¹. No cálculo da quantidade de calcário utilizou-se o método da neutralização do alumínio trocável.

Já a adubação foi realizada no dia do plantio e toda em fundação, com aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e o nitrogênio (de acordo com cada tratamento), utilizando-se como fontes o cloreto de potássio, superfosfato simples e ureia, respectivamente. Tanto para a recomendação da calagem quanto para a adubação foram utilizadas as recomendações de IPA (2008).

O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se mudas da variedade de cana-de-açúcar RB92579. As mudas foram repartidas, deixando três gemas por rebolo (tolete). Os toletes foram distribuídos dentro dos sulcos de plantio totalizando 18 gemas por metro linear.

As parcelas experimentais foram constituídas por 10 fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 66,0 m². A área útil correspondeu às seis fileiras centrais, com 6,0 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 39,6 m².

Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (Li) e cinco doses de nitrogênio (Ni). As lâminas de água foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura, a saber: $L_0=1498$, $L_1 = 1614$, $L_2 = 1739$ e $L_3 = 1854$ mm, estando incluso os valores da precipitação pluvial acumulada e lâmina inicial (1360 + 138 mm). As doses de nitrogênio foram determinadas com base nas recomendações de IPA (2008) para cana-planta, sendo: $N_0 = 0$, $N_1= 20$, $N_2 = 40$, $N_3 = 80$ e $N_4=120$ kg ha⁻¹, arranjados em faixas e delineados em blocos casualizados, com quatro repetições (Figura 1).

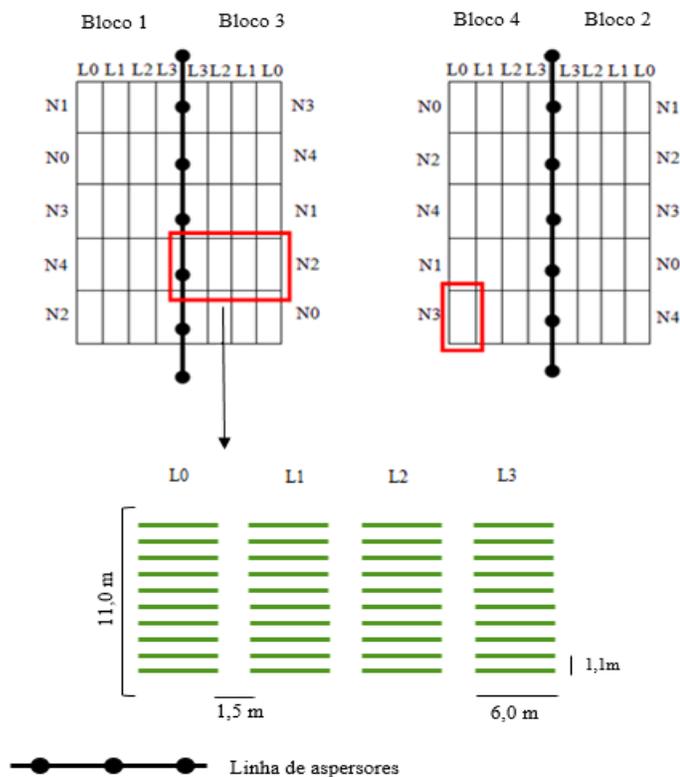


Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental

O sistema de irrigação utilizado foi o “line source sprinkler system” (aspersão em linha) de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). 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 foram do tipo minicanhão KS 1500 - PLONA, com bocais de diâmetro de 16,0 × 5,0 mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de 13,61 m³ h⁻¹ e diâmetro molhado de 60 m.

A relação entre a lâmina referência L_2 (100%) e as demais, assim como as lâminas aplicadas em cada tratamento, foi obtida por avaliações do sistema de irrigação. Os ensaios para medição das lâminas de irrigação consistiram na distribuição de linhas de coletores perpendiculares à linha de aspersores, cinco coletores em cada parcela, espaçados de 1 m entre si, distribuídos em cada bloco experimental entre as linhas de plantio, sendo as lâminas definidas pela média do volume de água coletado nos cinco coletores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado em cada tratamento

Lâminas	Ia (mm h ⁻¹)	Li (%)	La (mm)	L (mm)	P (mm)	Lt (mm)
L ₃	27,8	150	356	138	1360	1854
L ₂	18,5	100	241	138	1360	1739
L ₁	9,6	48	116	138	1360	1614
L ₀	0,0	0	0	138	1360	1498

Ia, intensidade de aplicação do sistema de irrigação; Li, lâmina de irrigação baseada na evapotranspiração da cultura; La, lâmina aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura (mm); P, precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento; L, lâmina inicial aplicada; Lt, lâmina total (mm)

A irrigação era realizada quando a diferença entre o somatório da evapotranspiração diária da cultura (ETc) e a precipitação ocorrida no período atingia 40% da água total disponível no solo. Para determinação da água total disponível no solo foram considerados os resultados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo, além da profundidade do sistema radicular. Os dados do balanço hídrico durante o cultivo da cana planta estão apresentados na Figura 2.

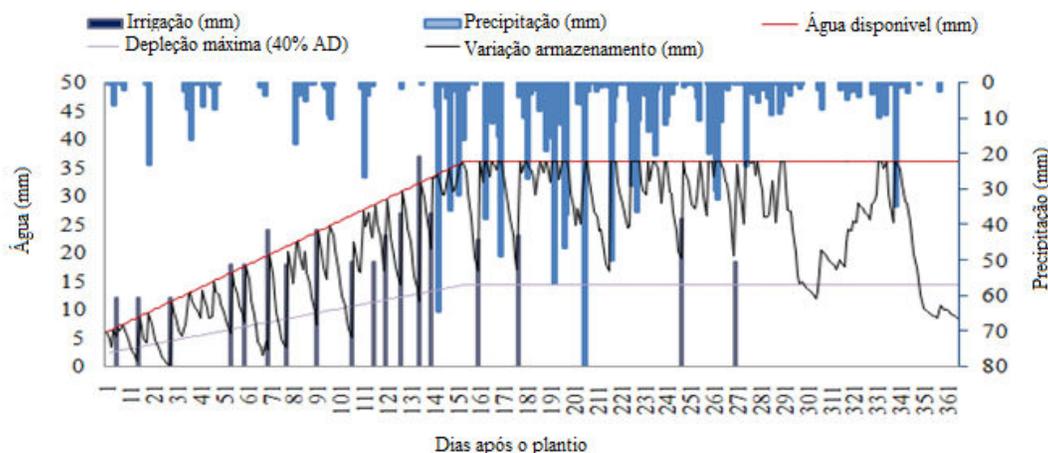


Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta

A evapotranspiração diária da cultura ET_c (mm) foi calculada pela seguinte equação:

$$ET_c = ECA \times K_p \times K_c \quad (1)$$

Em que,

ECA = evaporação do tanque Classe A, mm;

K_p = coeficiente do tanque Classe A;

K_c = coeficiente de cultura.

Os valores de K_p foram obtidos a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e evaporação do tanque classe A, instalado próximo à área experimental, com vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m (Doorenbos & Pruitt, 1976). Para o K_c foram utilizados valores recomendados por Doorenbos & Kassam (1994) para os estádios de desenvolvimento, visando-se determinar a evapotranspiração da cultura em cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de cultura (K_c) para cana planta em diferentes períodos de desenvolvimento.

Cana planta	
Dias	K_c
1-61	0,40
62-153	0,75
154-244	1,10
245-334	1,25
335- 360	0,70

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Nos três primeiros meses do ciclo da cultura foram realizadas irrigações uniformes em todos os tratamentos, totalizando uma lâmina de 138 mm, devido o plantio ter sido realizado no verão, época mais seca do ano, de modo a assegurar uniformidade de brotação e estabelecimento das plantas, utilizando-se o sistema de aspersão do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água. Em seguida, iniciou-se a aplicação das lâminas diferenciadas, utilizando-se o sistema de aspersão em linha “line source sprinkler system”.

Aos 270 DAP foi interrompida a irrigação promovendo assim um estresse hídrico na cultura. O estresse hídrico teve como objetivo induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois, segundo Doorenbos & Kassam (1994), durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo.

Em relação ao fator doses de nitrogênio, as quantidades de nitrogênio foram definidas tomando-se como ponto de partida a dose considerada padrão para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta) no Estado de Pernambuco, que é de 40 kg ha⁻¹ (IPA, 2008), as demais doses aplicadas foram determinadas em termos percentuais a partir da dose padrão, utilizando-se como fonte de nitrogênio, a ureia.

A produtividade de colmos foi obtida através da pesagem total dos colmos da área útil, no momento da colheita, com o auxílio de um dinamômetro da marca Crown BR (Oswaldo Filizola, Ltda.) com capacidade para pesar até 1000 kg e os valores expressos em Mg ha⁻¹.

Em cada parcela útil foi retirada uma amostra de dez colmos que foram encaminhadas ao Laboratório Agroindustrial da Usina Petribu S/A, em Pernambuco para determinação do teor de sólidos solúveis (° Brix), teor de sacarose do caldo (Pol caldo), teor de sacarose da cana (Pol da cana), açúcar teórico recuperável (ATR) e fibra, conforme metodologia descrita por Fernandes (2003).

As amostras foram submetidas à prensa hidráulica automática MA098, (Marconi Equipamentos para Laboratório, Ltda.), sob pressão de 250 kg cm⁻², durante um minuto para coleta do caldo do colmo. O ° Brix foi determinado a partir do caldo extraído da amostragem de cana de açúcar e para cada amostra, utilizando-se um refratômetro digital Autopol 589, (Tecnal Equipamentos para Laboratórios), dotado de correção automática de temperatura. O teor de sacarose aparente no caldo (Pol caldo) foi determinado utilizando-se um aparelho denominado sacarímetro automático Autopol 589, (Tecnal, Equipamentos para Laboratórios).

Os demais atributos tecnológicos, fibra, açúcar teórico recuperável (ATR) e percentagem de sacarose no colmo (Pol cana) foram determinados através de equações descritas em Fernandes (2003) e Carvalho et al. (2008). A produtividade de açúcar (Mg ha⁻¹) foi obtida através do produto entre o teor de sacarose no colmo (Pol cana) e a produtividade de colmos.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e posterior análise de variância e regressão pelo teste F a 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR, versão 5.0 (Ferreira, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 encontra-se um resumo da ANOVA para as características produtividade de colmos (PROD C), produtividade de açúcar (PROD A), teor de sólidos solúveis (° Brix), sacarose do caldo (Pol caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR), sacarose da cana (Pol cana) e fibra da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, submetida a lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N). Observou-se efeito significativo da interação lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N) sobre a produtividade de colmos e produtividade de açúcar ao nível de significância de 1% de probabilidade, e para as variáveis ATR e Pol da cana a 5% de probabilidade. Verificou-se ainda que as lâminas de água influenciaram de maneira isolada o ° Brix e a fibra da cana-de-açúcar a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, não havendo efeito das doses de nitrogênio sobre estas variáveis.

Shekinah et al. (2012) avaliando o efeito da adubação nitrogenada sobre os parâmetros tecnológicos da cana-planta não verificaram efeito significativo das doses de nitrogênio sobre a qualidade industrial da cana-de-açúcar.

Tabela 4. Resumo da ANOVA e valores médios de produtividade de colmos e açúcar e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N)

FV	GL	Variáveis						
		Produtividade		Atributos do caldo		Atributos da cana		
		PROD C (Mg ha ⁻¹)	PROD A (kg Mg ⁻¹)	° Brix (%)	Pol caldo (%)	ATR (kg Mg ¹)	Pol cana (%)	Fibra (%)
BL	3	0,307 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,542 ^{ns}	0,405 ^{ns}	0,334 ^{ns}	0,364 ^{ns}	0,805 ^{ns}
L	3	208,49**	66,45**	4,77*	0,996 ^{ns}	1,831 ^{ns}	1,41 ^{ns}	7,343**
Erro(L)	9	---	---	---	---	---	---	---
N	4	140,97**	140,78**	0,411 ^{ns}	1,416 ^{ns}	3,389*	3,145*	0,772 ^{ns}
Erro(N)	12	---	---	---	---	---	---	---
LxN	12	9,63**	3,87**	0,834 ^{ns}	1,825 ^{ns}	2,184*	2,563*	1,052 ^{ns}
Erro(L,N)	36	---	---	---	---	---	---	---
Média		124,26	20,02	20,51	18,2	153,86	16,03	12,89
CV(L) (%)		4,78	9,24	4,24	8,77	9,38	11,61	5,44
CV(N) (%)		9,59	9,54	5,73	4,85	4,07	4,24	6,01
CV(LxN) (%)		4,79	8,10	5,73	6,60	6,69	7,56	8,10

^{ns} não significativo, * significativo a 5%, ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; Valores de F calculado;

Avaliando-se a produtividade de colmos em função das lâminas de água e nas diferentes doses de nitrogênio (Figura 3A), verificou-se um aumento linear na produtividade para as plantas adubadas com as cinco doses de nitrogênio. Segundo Silva et al. (2013) o aumento de produtividade está diretamente e linearmente correlacionado com o aumento do consumo de água. A máxima produtividade (186,4

Mg ha⁻¹) foi obtida no tratamento equivalente a 1854 mm de água e na dose de nitrogênio de 80 kg ha⁻¹. Essa combinação é 48% superior a reposição da evapotranspiração da cultura e quanto à aplicação de nitrogênio é 100% superior a recomendada para a cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco.

Maduri et al. (2011) estudando o efeito de níveis de nitrogênio sobre o rendimento de variedades de cana-de-açúcar também constataram que a cana-de-açúcar responde a doses maiores que a recomendada para a cultura, isso ocorre provavelmente devido a influência do nitrogênio em vários processos e sua participação em compostos que se encontram na planta, relacionados ao aumento do desenvolvimento vegetativo e do rendimento da cultura.

O menor valor médio da produtividade de colmos, 59,73 Mg ha⁻¹, foi obtido na lâmina de água de 1498 mm e na ausência de adubação nitrogenada, resultando em um aumento de 228,68% em produtividade do tratamento L₀N₀ para o tratamento L₃N₃.

Boas condições hídricas aliada ao fornecimento correto de nitrogênio podem favorecer o crescimento radicular (Robinson et al., 2010), inferindo na absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, desse modo, além de aumentar a produtividade de colmos, a adubação nitrogenada e a disponibilidade hídrica podem gerar efeito sinérgico na absorção de outros nutrientes (Franco et al., 2007) o que levaria aos componentes das plantas a acumulá-los em níveis adequados, tornando-as melhor nutridas, conferindo produtividade de colmos e qualidade de açúcar não somente em um ciclo de produção, mas com efeito aditivo nos ciclos posteriores, proporcionando maior longevidade do canavial (Oliveira, 2011a).

Com relação ao efeito das doses de nitrogênio sobre a produtividade de colmos em cada lâmina de água (Figura 3B) verificou-se resposta significativa em todas as lâminas estudadas, ajustando-se equações quadráticas para as lâminas 1498, 1614 e 1854 mm e equação linear para a lâmina 1739 mm. Considerando-se os valores obtidos pelas equações de regressões observou-se que as maiores produtividades de colmos foram obtidas na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹ (163,65, 178,56 e 185,77 Mg ha⁻¹) enquanto as menores na ausência de nitrogênio (83,25, 94,32 e 90,97 Mg ha⁻¹), para as lâminas 1614, 1739 e 1854 mm, respectivamente, havendo um aumento de 96,6, 89,3 e 104,2% da menor para a maior dose de nitrogênio aplicada.

A cana-de-açúcar irrigada apresenta maior resposta a prática da adubação nitrogenada (Wiedenfeld & Enciso, 2008), isso ocorre devido ao aumento da eficiência da utilização dos fertilizantes (Thorburn et al., 2003) que conseqüentemente contribui

para a elevação da produtividade de colmos (TCH). Na literatura estudos comprovam a importância do nitrogênio e da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. Uribe et al. (2013) verificaram efeito positivo e sinérgico da irrigação com N-fertilizante na produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Andrade Júnior et al. (2012) estudando níveis de água e nitrogênio em cana-de-açúcar, no Município de União no Estado do Piauí, obtiveram produtividades máximas de colmos com o acréscimo da aplicação da lâmina de irrigação e das doses de nitrogênio.

Na lâmina 1498 mm a maior produtividade de colmos ($133,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi obtida na dose de nitrogênio de 90 kg ha^{-1} , diminuindo para $123,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ na dose de 120 kg ha^{-1} . O menor potencial produtivo na lâmina 1498 mm se deu provavelmente a condição de menor disponibilidade hídrica, já que a água no solo exerce um impacto substancial no crescimento e desenvolvimento dos cultivos agrícolas. Diversos autores sugerem que a taxa de crescimento da cana-de-açúcar é mais afetada pela disponibilidade de água no solo do que pelo próprio fornecimento de nitrogênio, ou seja, quando o estresse hídrico aumenta, a resposta à fertilização diminui (Carvalho et al., 2009).

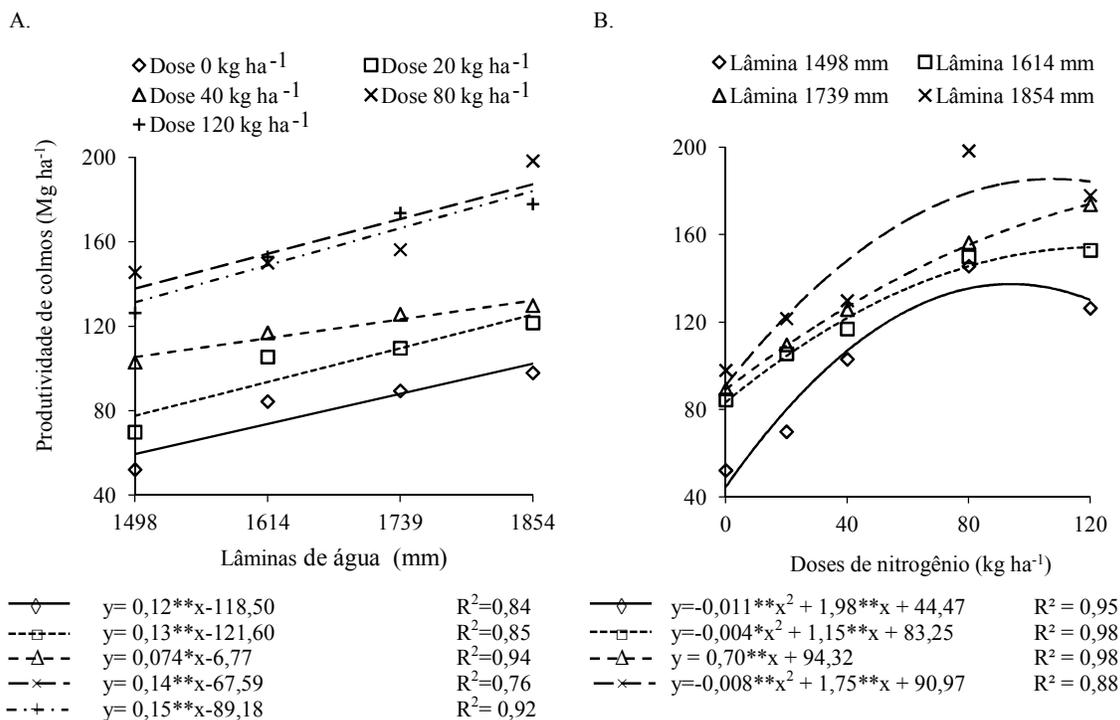


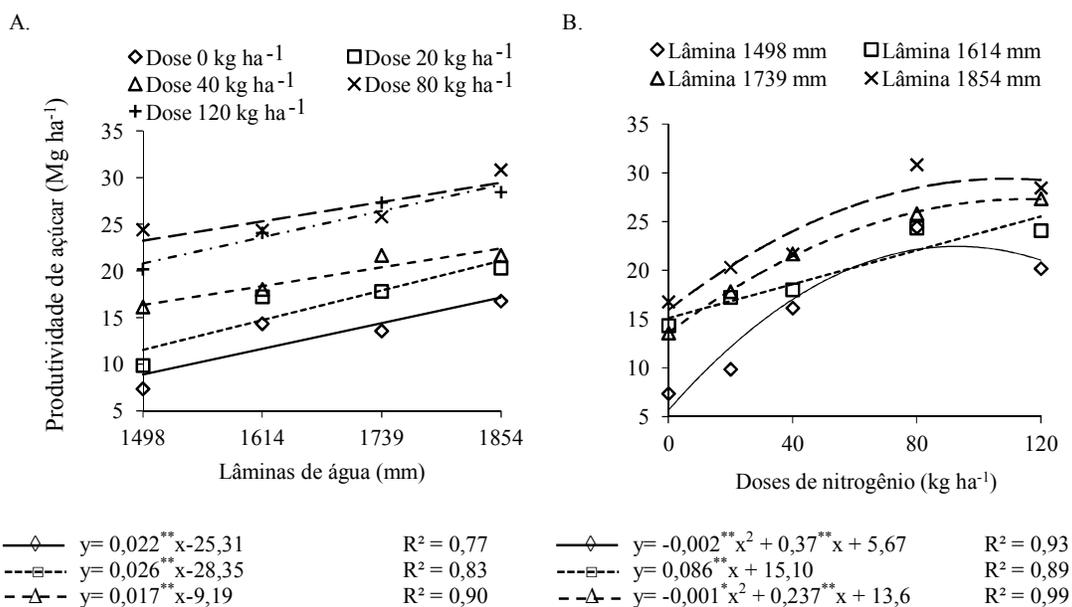
Figura 3. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92 579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

As curvas de respostas da produtividade de açúcar em relação às lâminas de água e as doses de nitrogênio encontram-se na Figura 4. Na Figura 4A observou-se um

aumento na produtividade de açúcar com o aumento das lâminas de água em todas as doses de nitrogênio estudadas, sendo as maiores produtividades de açúcar (28,89 e 28,19 Mg ha⁻¹) obtidas nas doses de nitrogênio de 80 e 120 kg ha⁻¹, respectivamente, e na maior lâmina de água (1854 mm) e a menor produtividade (7,64 Mg ha⁻¹) obtida no tratamento sem adubação nitrogenada e na menor lâmina de água (1498 mm).

Segundo Chen et al. (2012) a aplicação de fertilizantes e a irrigação podem ser indicadas como uma das medidas altamente eficazes para cultivo de cana-de-açúcar. Na literatura estudos comprovam a importância do nitrogênio e da irrigação na cultura, como por exemplo, os trabalhos realizados por Teodoro et al. (2013) em Rio Largo - AL, Oliveira et al. (2011a) em Carpina-PE, Silva et al. (2014) em Campo Verdes - GO e Franco et al. (2010) em Pirassununga – SP, tais autores constataram reduções na produtividade de açúcar e baixa resposta à adubação nitrogenada quando o estresse hídrico foi mais acentuado.

Para o efeito das doses de nitrogênio em cada lâmina de água, sobre o rendimento de açúcar (Figura 4B) ajustou-se equação de regressão quadrática para as lâminas 1498, 1739 e 1854 mm e equação linear para a lâmina 1614 mm. As maiores produtividades de açúcar foram 22,42, 27,64 e 29,74 Mg ha⁻¹ para as lâminas 1614, 1739 e 1854 mm, respectivamente, na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹. Na lâmina 1498 mm, a máxima produtividade (22,4 Mg ha⁻¹) foi obtida na dose de nitrogênio de 91,5 kg ha⁻¹. Bahrani et al. (2009) também verificaram aumento na produtividade de açúcar da cana-planta com o aumento do volume de água aplicado e da adubação nitrogenada, sendo a maior produtividade de açúcar (13,4 Mg ha⁻¹) obtida com a dose de nitrogênio de 86 kg ha⁻¹.



$$\begin{array}{ll} \text{---} \times \text{---} & y = 0,017^{**}x - 2,62 & R^2 = 0,76 & \text{---} \times \text{---} & y = -0,0011^{**}x^2 + 0,247^{**}x + 15,94 & R^2 = 0,91 \\ \text{---} \cdot \text{---} & y = 0,023^{**}x - 14,45 & R^2 = 0,95 & & & \end{array}$$

Figura 4. Produtividade de açúcar da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

O teor de sólidos solúveis (° Brix) reduziu linearmente com o aumento das lâminas de água (Figura 5). O valor máximo de sólidos solúveis (21,0%) foi verificado na lâmina 1498 mm e o mínimo (20,0%) na lâmina 1854 mm havendo uma redução de 4,8 % no teor de sólidos solúveis da maior para menor lâmina de água estudada. Oliveira et al. (2011a) também verificaram um decréscimo no teor de sólidos solúveis da cana-de-açúcar com o uso da irrigação. A redução na disponibilidade de água possivelmente provocou um estresse na planta e como consequência aumentou a concentração do teor de sólidos solúveis no colmo.

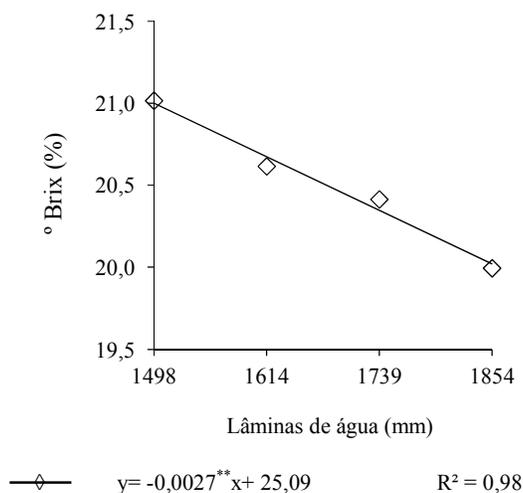


Figura 5. °Brix da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água

Para o ATR verificou-se efeito significativo das lâminas de água nas doses de nitrogênio de 0 e 20 kg ha⁻¹, ajustando-se equações de regressões lineares (Figura 6A). Os maiores valores de ATR (161,18 e 161,02 kg Mg⁻¹) foram obtidos na lâmina 1854 mm e os menores (141,25 e 141,44 kg Mg⁻¹) na lâmina 1498 mm para as doses de nitrogênio de 0 e 20 kg ha⁻¹, respectivamente, havendo ganhos de 14,11 e 13,84 % no total de ATR da maior para a menor lâmina de água estudada. Para as doses de nitrogênio de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ não foi possível ajustar equações de regressão, obtendo-se valores médios de 156,33, 157,58 e 152,17 kg Mg⁻¹, respectivamente.

Quanto ao efeito das doses de nitrogênio sobre o ATR para cada lâmina de água, observou-se efeito significativo apenas para a lâmina 1498 mm, ajustando-se equação de regressão quadrática (Figura 6B). O maior valor de ATR foi obtido na dose de nitrogênio de 83 kg ha⁻¹ (158,36 kg Mg⁻¹), havendo ganho de 19,9% em relação a ausência de adubação nitrogenada (132,08 kg Mg⁻¹). A partir dessa dose, o ATR decresceu, atingindo na dose de nitrogênio de 120 kg ha⁻¹, 153,2 kg Mg⁻¹, ou seja, houve uma redução de 3,25% no teor de açúcar teórico recuperável da dose de nitrogênio de 80 para a dose de 120 kg ha⁻¹. Franco et al. (2010) também verificaram uma redução (5,3%) no ATR da cana-de-açúcar (cana-planta) da dose de nitrogênio de 80 para a dose 120 kg ha⁻¹. O excesso de água e/ou nitrogênio está associado com o maior crescimento vegetativo da planta, correlacionando-se positivamente com o teor de umidade na planta e negativamente com a acumulação de açúcares (Oliveira et al., 2012).

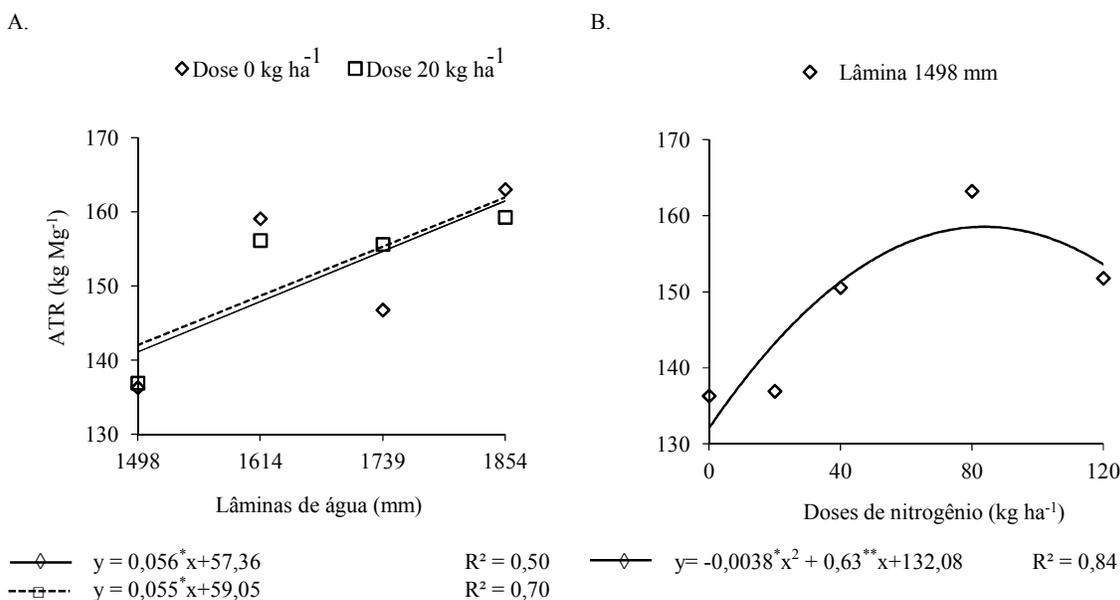


Figura 6. Açúcar teórico recuperável da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

O Pol da cana-de-açúcar foi avaliado em resposta as lâminas de água e em cada dose de nitrogênio, sendo ajustadas equações de regressões lineares para as doses de nitrogênio de 0 e 20 kg ha⁻¹ (Figura 7A). Para as demais doses não houve efeito significativo das lâminas de água sobre o teor de sacarose da cana-de-açúcar, apresentando valores médios de 16,33, 16,38 e 15,84 % para as doses de nitrogênio de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹, respectivamente. Na ausência de adubação nitrogenada o maior

teor de sacarose (15,46 %) foi obtido na lâmina 1854 mm e o menor teor (13,32 %) na lâmina 1498 mm, representando um aumento de 16,73 %. Já na dose de nitrogênio de 20 kg ha⁻¹ o maior teor médio de sacarose foi 15,67 % obtido na lâmina de 1854 mm.

O Pol da cana-de-açúcar também foi avaliado em resposta às doses de nitrogênio e em cada lâmina de água (Figura 7B). Observou-se que o teor de sacarose foi influenciado apenas pela lâmina 1498 mm, sendo o maior teor (16,39%) obtido na dose de nitrogênio de 77 kg ha⁻¹, reduzindo para 15,46 % na dose de 120 kg ha⁻¹. Para o restante das lâminas não houve efeito significativo das doses de nitrogênio sobre o teor de sacarose da cana-de-açúcar apresentando valores médios de 16,12, 16,21 e 16,46 % para as lâminas 1614, 1739 e 1854 mm, respectivamente.

O acúmulo máximo de sacarose ocorre quando a planta encontra condições que restringem seu crescimento (seja deficiência hídrica, falta de nutrientes e/ou condições adversas de clima). Estas condições forçam a planta a parar seu crescimento e amadurecer. Segundo Silva et al. (2009) a percentagem da Pol tende a diminuir com o aumento da adubação nitrogenada e no caso da cana-de-açúcar os colmos armazenam menos açúcar visto que os esqueletos carbônicos são consumidos para fazer mais vegetação (Malavolta, 2006).

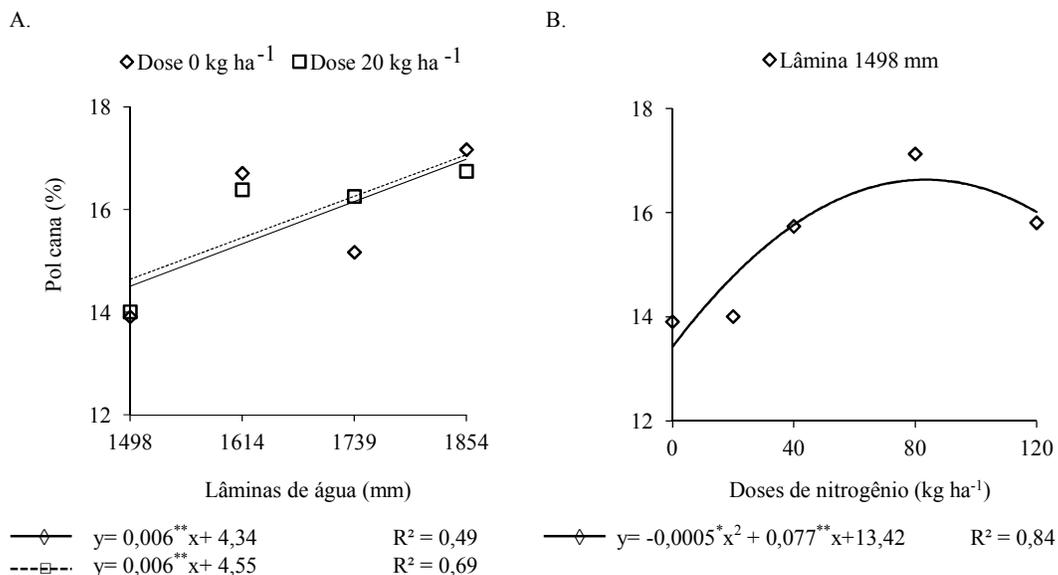


Figura 7. Teor de sacarose no colmo da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

Para o teor de fibra da cana-de-açúcar nota-se que houve uma redução com o aumento das lâminas de água (Figura 8). A maior percentagem de fibra (13,37 %) foi

obtida na lâmina 1498 mm e a menor (12,48%) observada na lâmina 1854 mm, havendo uma redução de 6,66 % no teor de fibra da maior para a menor lâmina de água.

Farias et al. (2009) avaliando os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação no Município de Capim, PB também constataram uma diminuição no teor de fibras à medida que se aumentou o volume de água aplicado via irrigação. Em condições de maior disponibilidade hídrica o colmo da cana-de-açúcar tende a possuir o percentual de fibra inferior, uma vez que a disponibilidade de água irá influenciar no aumento do seu comprimento, fazendo com que a parede celular fique mais delgada e conseqüentemente haja uma diminuição na percentagem de fibra.

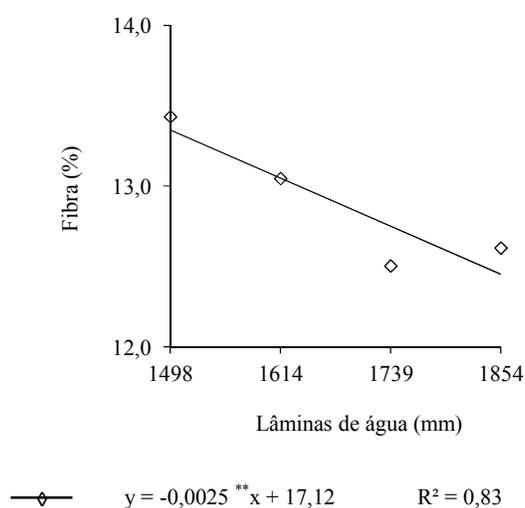


Figura 8. Teor de fibra da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92579, em função das lâminas de água

CONCLUSÕES

1. A aplicação de água aumentou o rendimento de colmos e açúcar segundo uma relação linear, em todas as doses de nitrogênio aplicadas.
2. As doses crescentes de nitrogênio incrementaram o rendimento de colmos e açúcar da cana-de-açúcar em cada lâmina de água estudada.
3. A aplicação de doses crescentes de nitrogênio aumentou o teor de açúcar teórico recuperável e sacarose da cana-de-açúcar até as doses de nitrogênio de 83 e 77 kg ha⁻¹ de na lâmina de 1498 mm de água.
4. O teor de sólidos solúveis e a fibra da cana-de-açúcar diminuíram com o aumento das lâminas de água independentemente das doses de nitrogênio.

5. As lâminas de água e as doses de nitrogênio não influenciaram o teor de sacarose do caldo da cana-de-açúcar.

LITERATURA CITADA

- Andrade Júnior, A. S.; Bastos, E. A.; Ribeiro, V. Q.; Duarte, J. A. L.; Braga, D. L.; Noleto, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, n.1, p.76-84, 2012.
- Bahrani, M. J.; Shomeili, M.; Zande-Parsa, S.; Kamgar-Haghighi, A. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in subtropical Iran. *Iran Agricultural Research*, v.28, n.1, 2009.
- Carvalho, C. M.; Azevedo, H. M.; Dantas Neto, J.; Melo, E. P.; Silva, C. T. S.; Gomes Filho, R. R. Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.3, p.337-342, 2008.
- Carvalho, C. M.; Azevedo, H. M.; Dantas Neto, J.; Farias, C. H. A.; Silva, C. T. S.; Gomes Filho, R. R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.4, p.72-77, 2009.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IPA. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação. 2 ed. rev. Recife: IPA, 2008.
- Chaves, L. H. G.; Dantas Neto, J.; Fernandes, J. D.; Alves, H. S.; Ribeiro, P. H. P. Adubação silicatada e lâminas de irrigação no crescimento e produção da cana-de-açúcar. *Global Science and Technology*, v. 06, n. 03, p.67-78, dez. 2013.
- Chen, G. F.; Tang, Q. Z.; Li, Y. R.; Huang, Y. Y.; Liu, B., Xu, L.; Huang, H. R. Effects of Sub-soil Drip Fertigation on Sugarcane in Field Conditions. *Sugar Tech*, v.14, n.4, p. 418-421, 2012.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2014/2015. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em janeiro de 2015.
- Doorenbos, J.; Kassan, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).

- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193 p.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina: Planta, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Farias, C. H. A. De; Fernandes, P. D.; Azevedo, H. M. De; Dantas Neto, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, p. 356-362, 2008.
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Dantas Neto, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 419-428, 2009.
- Ferreira, D. F. SISVAR, versão 5.0 (Build 67), DEX/FLA, 2003.
- Fernandes, A. C. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. 2.ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.
- Franco, H. C. J.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Trivelin, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. Brangantia, v.66, n.4, p. 521-526, 2007.
- Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O.; Faroni, C. E.; Vitti, A. C.; Otto, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. Scientia Agrícola, v.67, n.5, p.579-590, 2010.
- Frizzone, J. A.; Matioli, C. S.; Rezende, R. Gonçalves, A. C. A. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum spp.*, para a região Norte do Estado de São Paulo. Acta Scientiarum, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.
- Hanks, R. J. et al. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. Soil science Society of American Journal, v.40, p. 426-429, 1976.
- Maduri, K. V. N.; Kumar, M. H.; Sarala, N. V. Influence of Higher Doses of Nitrogen on Yield and Quality of Early Maturing Sugarcane Varieties. Sugar Tech, v.13, n.1, p. 96-98, 2011.

- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, J. F.; Oliveira, A. C.; Simões Neto, D. E.; Rocha, A. T.; Carvalho, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.46, n.6, p.617-625, 2011a.
- Oliveira, E. C. A. de; Oliveira, R. I. de; Andrade, B. M. T. de; Freire, F. J.; Lira Júnior, M. A.; Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.9, p.951–960, 2010b.
- Oliveira, F. M.; Aspiazu, I.; Kondo, M. K.; Borges, I. D.; Pegoraro, R. F.; Vianna, E. J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. Revista Ceres, v.59, n.6, p. 832-840, 2012.
- Oliveira, F. M.; Aspiazu, I.; Kondo, M. K.; Borges, I. D.; Pegoraro, R. F.; vianna, E. J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. Revista Trópica, v. 5, n. 1, p. 56 - 67, 2011b.
- Robinson, N.; Gamage, H.; Whan, A.; Fletcher, A.; Brackin, R.; Holst, J.; Lakshamanan, P.; SchmidT, S. Evidence of differences in nitrogen use efficiency in sugarcane genotypes. In: Australian Society Of Sugarcane Technologists, 31., 2009. Balina. Proceedings...Balina, 2010. p. 256-264.
- Shekinah, D. E.; Sundara, B.; Rakkiyappan, P. Relative Significance of N Nutrition on Yield, Quality and Ethanol in Sugarcane (Saccharum species hybrid) Plant: Ratoon System. Sugar Tech, v.14, n.2, p. 134-137, 2012.
- Silva, A. B. da; Dantas Neto, J.; Farias, C. H. de A.; Azevedo, C. A. V. de. Rendimento e qualidade da cana- de -açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. Revista Caatinga, v.22, p.236 -241, 2009.
- Silva, V. de P. R. da; Silva, B. B.; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J.R.; Souza, I. F. de; Dantas Neto, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. Agricultural Water Management, v. 128, p. 102-109, 2013.
- Silva, M. A.; Arantes, M. T.; Rhein, A. F. de L.; Glauber, 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, n.3, p.241–249, 2014.

- Teodoro, I.; Dantas Neto, J.; Souza, J. L. de; Lyra, G. B.; Brito, K. S.; Sá, L. de A.; Santos, M. A. L.; Sarmiento, P. L. V. de S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. *Irriga*, v. 18, n. 3, p. 387-401, 2013.
- Thorburn, P. J.; Dart, I. K.; Biggs, I. M.; Baillie, C. P.; Smith, M. A.; Keating, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *Irrigation Science*, v.22, p.201-209, 2003.
- Umesh, U. N.; Kumar, V.; alam, M.; Sinha, S. K.; Verma, K. Integrated effect of organic and inorganic fertilizers on yield, quality parameter and nutrient availability of sugarcane in calcareous soil. *Sugar Tech*, v. 15, n. 4, p. 365 – 369, 2013.
- Uribe, R. A. M.; Gava, G. J. C.; Saad, J. C. C.; Kolln, O. T.; Ratoon sugarcane yield integrated drip´-irrigation and nitrogen fertilization. *Engenharia Agrícola*, v.33, n.6, p.1124-1133, 2013.
- Wiedenfeld, B.; Enciso, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. *Agronomy Journal*, v. 100, p. 665-671, 2008.
- Wiedenfeld, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management*, v. 43, p. 173-182, 2000.

CAPÍTULO VI

Função de resposta da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Função de resposta da cana-de-açúcar submetida a lâminas de água e doses de nitrogênio

Resumo: A água e os nutrientes são fatores fundamentais para o êxito da agricultura e seu manejo é imprescindível para otimização da produção agrícola, por isso, realizou-se um experimento com o objetivo de estudar as relações entre lâminas de água, doses de nitrogênio e sua interação sobre o rendimento da cana de-açúcar (cana-planta), estabelecendo uma função de produção que vise a otimização econômica do uso da água e da adubação nitrogenada. A pesquisa foi realizada na estação experimental de cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada em Carpina, Pernambuco. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (1498; 1614; 1739 e 1854 mm) e cinco doses de nitrogênio (0; 20; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) arranjados em faixas e delineados em blocos ao acaso com quatro repetições. As lâminas de água e as doses de nitrogênio incrementaram o rendimento de colmos da cana-de-açúcar. A máxima receita líquida estimada pelo modelo foi de R\$ 4201,8 obtida com uma produtividade 150 Mg ha⁻¹, utilizando-se 1662 mm de água e 76 kg ha⁻¹ de nitrogênio. A produtividade máxima foi obtida com um volume de água maior que a lâmina máxima estudada. O nitrogênio afetou mais a produtividade de colmos da cana-de-açúcar do que as lâminas de água.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, irrigação; adubação nitrogenada; função de produção

Response function of the sugarcane subjected to water depths and nitrogen doses

Abstract: Water and nutrients are key factors to the success of agriculture and its management is indispensable for optimization of agricultural production, therefore, it was performed an experiment in order to study the relations between water depths, nitrogen doses and their interaction on the yield of sugar cane culture (plant cane), establishing a production function that aims economic optimization of water usage and nitrogen fertilization. The research was conducted in field, at the experimental station of sugarcane the University Federal Rural of Pernambuco, in Carpina, Pernambuco. The treatments consisted of four water depths (1498; 1614; 1739 and 1854 mm) and five nitrogen doses (0; 20; 40; 80 and 120 kg ha⁻¹), arranged in strips and outlined in randomized blocks with four replications. The maximum net income estimated by

model was R\$ 4,201.8 obtained with a productivity of 150 Mg ha⁻¹, using 1662 mm of water and 76 kg ha⁻¹ of nitrogen. The maximum productivity was obtained with a volume of water greater than the maximum depth studied. The nitrogen had more influence than water depths on the productivity of sugar cane stem.

Keywords: *Saccharum spp.*, irrigation; nitrogen fertilization; production function

INTRODUÇÃO

O principal objetivo de um empreendimento agrícola é a otimização de sua rentabilidade e para isso é necessário o uso racional dos recursos disponíveis no processo de produção, de forma a se obterem os mais altos níveis de rendimento econômico (Santos Júnior, 2014).

Quando um agricultor opta por otimizar sua produção agrícola, entre as alternativas de produção disponíveis, ele deve escolher a mais eficiente na utilização dos recursos disponíveis e a que satisfaz a certos objetivos pré-estabelecidos. De acordo com Andrade Júnior et al. (2001), um dos elementos básicos para estudos econômicos relativos ao planejamento dos recursos disponíveis é a obtenção da função de resposta de produção. A função de produção é a relação física entre as quantidades utilizadas de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para uma dada tecnologia conhecida. A partir da função de resposta, é possível obter a solução ótima para uma determinada combinação insumo-produto, que possa maximizar a receita líquida do produtor (Castro et al. 2007).

Frizzone & Andrade Júnior (2005) afirmaram que a definição de estratégias ótimas de irrigação, com base na análise econômica de funções de produção, pode considerar duas situações: (a) A disponibilidade de terra é o único fator limitante da produção. Neste caso, a água pode ser adquirida e aplicada a um custo unitário constante. A regra de otimização agroeconômica preconiza que a lâmina aplicada deva maximizar a receita líquida por unidade de área e (b) A disponibilidade de água é o único fator que limita a produção. A quantidade de terra é relativamente abundante e não limitante. O objetivo da otimização é atingir a máxima receita líquida por unidade de volume de água, deixando alguma área sem irrigar.

No Estado de Pernambuco, a disponibilidade de área para expansão da cana-de-açúcar está cada vez mais escassa, sendo imprescindível manejar a cultura em busca de maiores produções por unidade de área (Oliveira et al., 2010).

Na costa leste do Nordeste brasileiro os impactos das deficiências hídricas na produção de cana-de-açúcar causadas pela irregularidade das chuvas são, isoladamente, os fatores que exercem maior peso na oscilação dos rendimentos agrônômicos da referida cultura agrícola (Souza et al., 2012). Assim, a irrigação suplementar funciona como um fator imprescindível para a garantia de produção com qualidade e aumento da produtividade, principalmente em regiões onde há irregularidade na distribuição das chuvas.

Aliada à irrigação, a adubação nitrogenada é também uma alternativa para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, visto que o solo é quem fornece nutrientes para a planta, porém nem sempre apresenta na quantidade de que a cultura necessita para o seu pleno desenvolvimento, deste modo, a melhoria da fertilidade do solo torna-se fundamental para a sustentabilidade do cultivo de cana-de-açúcar (Umesh et al., 2013).

Entre os elementos essenciais, o N é um dos mais exigidos em quantidade pela cana-de-açúcar, assim a necessidade da cultura por nitrogênio muitas vezes é suprida com fertilizantes, mas esse insumo representa uma parcela significativa na composição dos custos de produção tornando-se imprescindível a necessidade de um manejo adequado da adubação. O manejo balanceado de nutrientes é essencial para se alcançar altos rendimentos e melhorar a eficiência do seu uso, beneficiado os agricultores, a sociedade e o ambiente (Cabrera & Zuaznábar, 2010).

Nesse sentido, as funções de produção ou de respostas servem para orientar os agricultores nas tomadas de decisões em relação à quantidade de insumos a ser utilizada num determinado cultivo agrícola.

Portanto, objetivou-se neste trabalho estudar o efeito da água, do nitrogênio, e da interação desses fatores sobre o rendimento produtivo e econômico da cultura da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo, na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W, a 180 m de altitude), no período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A caracterização química e física do solo foi realizada antes da instalação do experimento nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, de acordo com EMBRAPA (1997)

(Tabela 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Camada m	Análises químicas									
	pH	P	H+AL	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾
	H ₂ O	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----				-----%-----			
0-0,20	5,18	17,5	3,45	0,25	1,67	1,63	0,15	6,99	50,64	6,57
0,20-0,40	5,06	17,0	4,00	0,30	1,67	1,13	0,15	7,05	43,26	8,85

Camada M	Análises físicas						
	Ds ⁽⁴⁾	Areia	Silte	Argila	Θ _{CC} ⁽⁵⁾	Θ _{PMP} ⁽⁶⁾	Classe textural
	Mg m ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----			---m ⁻³ m ⁻³ ---		
0-0,20	1,72	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenosa
0,20-0,40	1,86	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenosa

⁽¹⁾Capacidade de troca de cátions potencial; ⁽²⁾ saturação por bases; ⁽³⁾ saturação por alumínio; ⁽⁴⁾ densidade do solo; ⁽⁵⁾ capacidade de campo; ⁽⁶⁾ ponto de murcha permanente

O preparo do solo foi realizado 15 dias antes da instalação do experimento e consistiu de uma gradagem (grade aradora e grade niveladora) para destorroamento, destruição dos restos culturais, incorporação do calcário, sistematização da área e posterior abertura dos sulcos de plantio. Para correção do solo aplicou-se calcário na dose de 465 kg ha⁻¹. No cálculo da quantidade de calcário utilizou-se o método da neutralização do alumínio trocável.

Já a adubação foi realizada no dia do plantio e toda em fundação, com aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e o nitrogênio (de acordo com cada tratamento), utilizando-se como fontes o cloreto de potássio, superfosfato simples e ureia, respectivamente. Tanto para a recomendação da calagem quanto para a adubação foram utilizadas as recomendações de IPA (2008).

O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se mudas da variedade de cana-de-açúcar RB92579. As mudas foram repartidas, deixando três gemas por rebolo (tolete). Os toletes foram distribuídos dentro dos sulcos de plantio totalizando 18 gemas por metro linear.

As parcelas experimentais foram constituídas por 10 fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 66,0 m². A área útil correspondeu às seis fileiras centrais, com 6,0 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 39,6 m².

Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de água (Li) e cinco doses de nitrogênio (Ni). As lâminas de água foram determinadas de acordo com a

evapotranspiração da cultura, a saber: $L_0=1498$, $L_1 = 1614$, $L_2 = 1739$ e $L_3 = 1854$ mm, estando incluso nesses valores a precipitação pluvial acumulada e a lâmina inicial (1360 + 138 mm). As doses de nitrogênio foram determinadas com base nas recomendações de IPA (2008) para cana-planta, sendo: $N_0 = 0$, $N_1= 20$, $N_2 = 40$, $N_3 = 80$ e $N_4=120$ kg ha^{-1} , arranjados em faixas e delineados em blocos casualizados, com quatro repetições (Figura 1).

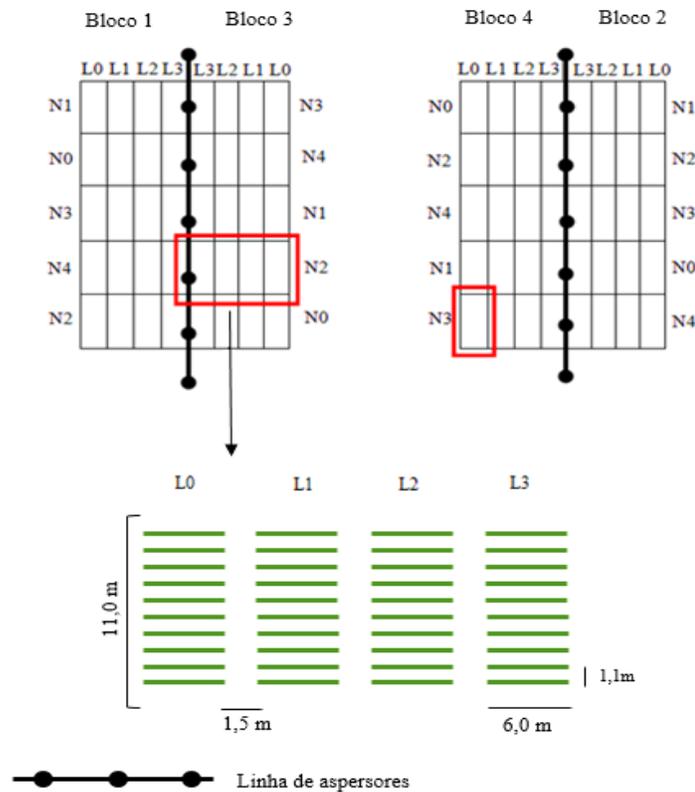


Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental

O sistema de irrigação utilizado foi o “line source sprinkler system” (aspersão em linha) de acordo com metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). 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 foram do tipo minicanhão KS 1500 - PLONA, com bocais de diâmetro de $16,0 \times 5,0$ mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de $13,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e diâmetro molhado de 60 m.

A relação entre a lâmina referência L_2 (100%) e as demais, assim como as lâminas aplicadas em cada tratamento, foi obtida por avaliações do sistema de irrigação. Os ensaios para medição das lâminas de irrigação consistiram na distribuição de linhas de

coletores perpendiculares à linha de aspersores, cinco coletores em cada parcela, espaçados de 1 m entre si, distribuídos em cada bloco experimental entre as linhas de plantio, sendo as lâminas definidas pela média do volume de água coletado nos cinco coletores (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da avaliação do sistema de irrigação e volume de água aplicado

Lâminas	Ia (mm h ⁻¹)	Li (%)	La (mm)	L (mm)	P (mm)	Lt (mm)
L ₃	27,8	150	356	138	1360	1854
L ₂	18,5	100	241	138	1360	1739
L ₁	9,6	48	116	138	1360	1614
L ₀	0,0	0	0	138	1360	1498

Ia, intensidade de aplicação do sistema de irrigação; Li, lâmina de irrigação baseada na evapotranspiração da cultura; La, lâmina aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura (mm); P, precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento; L, lâmina inicial aplicada; Lt, lâmina total (mm)

A irrigação era realizada quando a diferença entre o somatório da evapotranspiração diária da cultura (ETc) e a precipitação ocorrida no período atingia 40% da água total disponível no solo. Para determinação da água total disponível no solo foram considerados os resultados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo, além da profundidade do sistema radicular. Os dados do balanço hídrico durante o cultivo da cana planta estão apresentados na Figura 2.

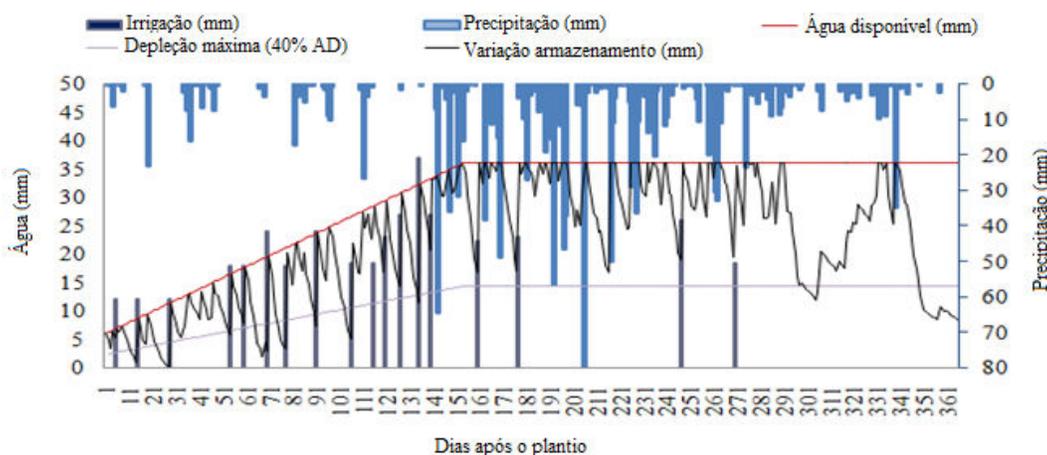


Figura 2. Balanço hídrico durante o cultivo da cana-planta

A evapotranspiração diária da cultura ETc (mm) foi calculada pela seguinte equação:

$$ETc = ECA \times Kp \times Kc \quad (1)$$

Em que,

ECA = evaporação do tanque Classe A, mm;

Kp = coeficiente do tanque Classe A;

Kc = coeficiente de cultura.

Os valores de Kp foram obtidos a partir dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e evaporação do tanque classe A, instalado próximo à área experimental, com vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m (Doorenbos & Pruitt, 1976). Para o Kc foram utilizados valores recomendados por Doorenbos & Kassam (1994) para os estádios de desenvolvimento da planta, visando-se determinar a evapotranspiração da cultura em cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de cultura (Kc) para cana planta em diferentes períodos de desenvolvimento

Cana planta	
Dias	Kc
1-61	0,40
62-153	0,75
154-244	1,10
245-334	1,25
335- 360	0,70

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

Nos três primeiros meses do ciclo da cultura foram realizadas irrigações uniformes em todos os tratamentos, totalizando uma lâmina de 138 mm, devido ao plantio ter sido realizado no verão, época mais seca do ano, de modo a assegurar uniformidade de brotação e estabelecimento das plantas, utilizando-se o sistema de aspersão do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água. Em seguida, iniciou-se a aplicação das lâminas diferenciadas, utilizando-se o sistema de aspersão em linha “line source sprinkler system”.

Aos 270 DAP foi interrompida a irrigação promovendo assim um estresse hídrico na cultura. O estresse hídrico teve como objetivo induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos & Kassam (1994) durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo.

Em relação ao fator doses de nitrogênio, as quantidades de nitrogênio foram definidas tomando-se como ponto de partida a dose considerada padrão para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta) no Estado de Pernambuco, que é de 40 kg ha^{-1} (IPA,

2008), as demais doses aplicadas foram determinadas em termos percentuais a partir da dose padrão, utilizando-se como fonte de nitrogênio a ureia.

As variáveis analisadas foram:

Produtividade de colmos

A produtividade foi obtida através da pesagem total dos colmos da área útil no momento da colheita, com o auxílio de um dinamômetro da marca Crown BR (Oswaldo Filizola, Ltda.) com capacidade para pesar até 1000 kg e os valores expressos em Mg ha⁻¹.

Função de produção

A função de produção utilizada para expressar a resposta da cana-de-açúcar à interação dos dois insumos, lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, foi a seguinte:

$$Z(L, N) = X_0 + X_1.L + X_2.N + X_3.L^2 + X_4.L.N + X_5.N^2 \quad (2)$$

A escolha do modelo que melhor representasse a função $y = y(L, N)$, baseou-se na análise do coeficiente de determinação, coeficiente de determinação ajustado e teste F para análise de variância, para tanto utilizou-se o software STATISTICA (10.1). Segundo Sousa et al. (1999) as curvas de regressão polinomial de segunda ordem se ajustam satisfatoriamente a relação entre as produtividades de colmos, lâminas de irrigação aplicadas e adubação.

Os valores das variáveis independentes, L e N que maximizam a produção foram obtidos derivando-se a Equação 2 em relação a cada fator estudado e igualando-se a zero (Equações 3 e 4), e para determinar as dosagens que otimizam a receita líquida, utilizou-se as derivadas de cada insumo e igualou-se à relação entre o custo unitário do insumo e o preço de venda unitário da cana-de-açúcar, conforme Frizzone (1993) (Equações 5 e 6).

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(L)} = X_1 + 2.X_3.L = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(N)} = X_2 + 2.X_5.N = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(L)} = X_1 + 2 \cdot X_3 \cdot L = \frac{C_L}{P_Z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(N)} = X_2 + 2 \cdot X_5 \cdot N = \frac{C_N}{P_Z} \quad (6)$$

Em que:

$\frac{\partial(Z)}{\partial(L)}$ = 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);

$\frac{C_L}{P_Z}$ = relação entre o custo da lâmina (R\$ mm⁻¹ ha⁻¹) e o preço da cana-de-açúcar (R\$ Mg⁻¹);

$\frac{C_N}{P_Z}$ = relação entre o custo do nitrogênio (R\$ kg⁻¹) e o preço da cana-de-açúcar (R\$ Mg⁻¹);

X₁, X₂, X₃, X₅ - coeficientes do modelo.

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 7).

$$TMS_{N/L} = - \frac{\frac{\partial(Z)}{\partial(N)}}{\frac{\partial(Z)}{\partial(L)}} \quad (7)$$

Isoquantas e região de produção racional

Isoquantas ou curvas de isoproducto são curvas que representam as combinações de lâminas de água e doses de nitrogênio, as quais apresentam uma mesma produtividade, ou seja, são curvas que ligam os pontos de diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, ao mesmo rendimento. A partir da função de produção determinou-se 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.

Renda líquida

Renda líquida é a renda obtida após subtração dos custos e despesas do total rendimento. É obtida, subtraindo-se da renda bruta, os custos de produção (CP) provenientes de insumos mais serviços. Estes custos de produção foram calculados para cada tratamento, baseados nos custos e serviços utilizados para implantação de um hectare de cana-de-açúcar (cana-planta).

A renda líquida foi obtida através da seguinte equação:

$$RL(L,N) = P_Z \cdot TCH(L,N) - P_L \cdot L - P_N \cdot N - CP \quad (8)$$

RL= Renda líquida (R\$ ha⁻¹);

P_Z= Preço de venda da cana (R\$ Mg⁻¹);

TCH = Toneladas de colmos (Mg ha⁻¹);

CP = Custos de produção (R\$ ha⁻¹);

PL = Preço da lâmina (R\$ mm⁻¹ ha⁻¹);

PN = Preço nitrogênio (R\$ kg⁻¹);

L = Lâmina que otimiza receita líquida (mm);

N = Dose que otimiza receita líquida (kg ha⁻¹)

Para fins de análise considerou-se o preço da cana de R\$ 63,04 Mg⁻¹ (AFCP, 2015) e o preço do adubo nitrogênio de R\$ 2,30 kg (aquisição do produto no mercado local). O preço do milímetro de água (R\$ 6,90 mm⁻¹) foi calculado com base no custo médio de implantação do sistema de irrigação por aspersão obtido através de consulta à empresa especializada no ramo, na cidade de Recife, PE, volume de água evapotranspirado pela cultura e custos operacionais. Os valores do milímetro de água e do quilo de nitrogênio aplicados no ciclo de cultivo da cana planta estão na Tabela 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para o cálculo do custo do milímetro de água aplicado na cultura da cana-de-açúcar pelo sistema de irrigação por aspersão

Investimento	Custos fixos			Custos operacionais (R\$ mm ⁻¹ ha ⁻¹)	Custo Total (R\$ mm ⁻¹ ha ⁻¹)
	Vida útil	Lâmina anual			
\$ ha ⁻¹	(anos)	(mm)	R\$ mm ⁻¹ ha ⁻¹		
8000,00	10,00	241,00	3,30	3,40	6,90
Custos operacionais					
Consumo energia (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Mão-de-obra (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Manutenção (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Lâmina anual (mm)		Custo Total (R\$ mm ⁻¹ ha ⁻¹)
121,00	500,00	240,00	241,00		3,40

Custo médio de implantação do sistema de irrigação por aspersão obtido através de consulta à empresa especializada no ramo, na cidade de Recife-PE; Manutenção 3% do investimento

Tabela 5. Preço dos fertilizante utilizado na adubação nitrogenada da cana-de-açúcar

Adubo	Reais por tonelada de adubo	Reais por kg de nitrogênio
Ureia	1000,00	2,30

Preço médio de aquisição do produto no mercado local

O valor da tarifa de energia elétrica foi formado pela soma do custo do consumo efetivo da energia e do custo de demanda da potência elétrica. De acordo com as normas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) Resolução nº 456 de 29 de dezembro de 2000, só existe tarifa de demanda quando a potência instalada é superior a 75 KVA (Leite, 2013). Tendo em vista que para as condições da presente pesquisa o sistema operou com uma potência instalada de 44 KVA, utilizando um motor elétrico de 60 cv, o custo de demanda foi nulo, sendo a tarifa de energia elétrica composta apenas pelo custo do consumo. O preço do kWh (R\$ 0,21) foi obtido junto a CELPE (Companhia Energética do Estado de Pernambuco), tarifa do tipo B2 para serviço de irrigação.

O custo do consumo de energia elétrica foi obtido com base na seguinte equação (Andrade Júnior, 2001):

$$CE = 0,7355 \times Pot \times Tf \times PkWh \quad (8)$$

Sendo:

- CE custo da energia elétrica, em R\$;
 0,7355 fator de conversão de cv para kW;
 Pot potência do motor, em cv;
 Tf tempo em hora do funcionamento do sistema necessário para repor a ETc, considerando uma área irrigada de 1 ha;

PkWh preço do kWh, em R\$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se através da análise de variância que houve efeito significativo das lâminas de água, das doses de nitrogênio e da interação lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N) a 1% de probabilidade sobre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da ANOVA e valores médios de produtividade de colmos da cana-de-açúcar, variedade RB 92579, em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N)

FV	GL	Produtividade de colmos (Mg ha ⁻¹)		R ²
		QM	F	
BL	3	10,82	0,307 ^{ns}	
L	3	7357,32	208,49 ^{**}	
Efeito linear	1	21280,02	603,04 ^{**}	0,964
Efeito quadrático	1	351,18	9,95 [*]	0,980
Erro(L)	9	---	---	
N	4	19999,91	140,97 ^{**}	
Efeito linear	1	70307,90	495,56 ^{**}	0,879
Efeito quadrático	1	7175,53	50,58 ^{**}	0,968
Erro(L)	12	---	---	
LxN	12	341,76	9,63 ^{**}	
Erro(LxN)	36	---	---	
Média Geral			124,26	
CV _L (%)			4,78	
CV _N (%)			9,59	
CV _{LxN} (%)			4,79	

^{ns} não significativo, ^{*} significativo a 5%, ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

Avaliando-se a produtividade de colmos em função das lâminas de água e nas diferentes doses de nitrogênio (Figura 3A), verificou-se um aumento linear na produtividade para as plantas adubadas com as cinco doses de nitrogênio. A máxima produtividade estimada (186,40 Mg ha⁻¹) foi obtida no tratamento equivalente à aplicação de 1854 mm de água e 80 kg ha⁻¹ de N. Essa combinação é 48% superior à reposição da evapotranspiração da cultura e quanto à aplicação da dose de nitrogênio é 100% superior à recomendada para a cultura.

O menor valor médio da produtividade de colmos, 59,73 Mg ha⁻¹, foi obtido na menor lâmina de água (1498 mm) e na ausência de adubação nitrogenada (0 kg ha⁻¹), resultando, assim, em um aumento de 228,7% em produtividade do tratamento L₀N₀ (1498 mm e 0 kg ha⁻¹ de N) para o tratamento L₃N₃ (1854 mm e 80 kg ha⁻¹ de N) e um aumento de 229,2% em relação a produtividade média de colmos de cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco para a safra de 2014/2015 que foi de 56,62 Mg ha⁻¹. Segundo Epstein & Blomm (2006), a viscosidade da água é razoavelmente baixa, fator que

permite a rápida difusão de solutos, incluindo íons no sistema vascular, o que levaria aos componentes das plantas a acumular em níveis adequados os nutrientes, tornando-as melhor nutridas, favorecendo o aumento de produtividade de colmos (Oliveira et al., 2011).

Oliveira et al. (2014) realizaram um trabalho para avaliar o efeito de cinco níveis de água (1618, 1744, 1870, 1996 e 2122 mm) com e sem aplicação de nitrogênio (100 kg ha⁻¹) na cultura da cana-de-açúcar e não verificam efeito significativo da interação lâminas de água e doses de nitrogênio sobre a cultura, porém as lâminas de água afetaram isoladamente a produtividade de colmos da cana-de-açúcar e a máxima produtividade (250 Mg ha⁻¹) foi estimada na lâmina 2122, sendo 40% maior em relação às plantas que não receberam irrigação (178 Mg ha⁻¹).

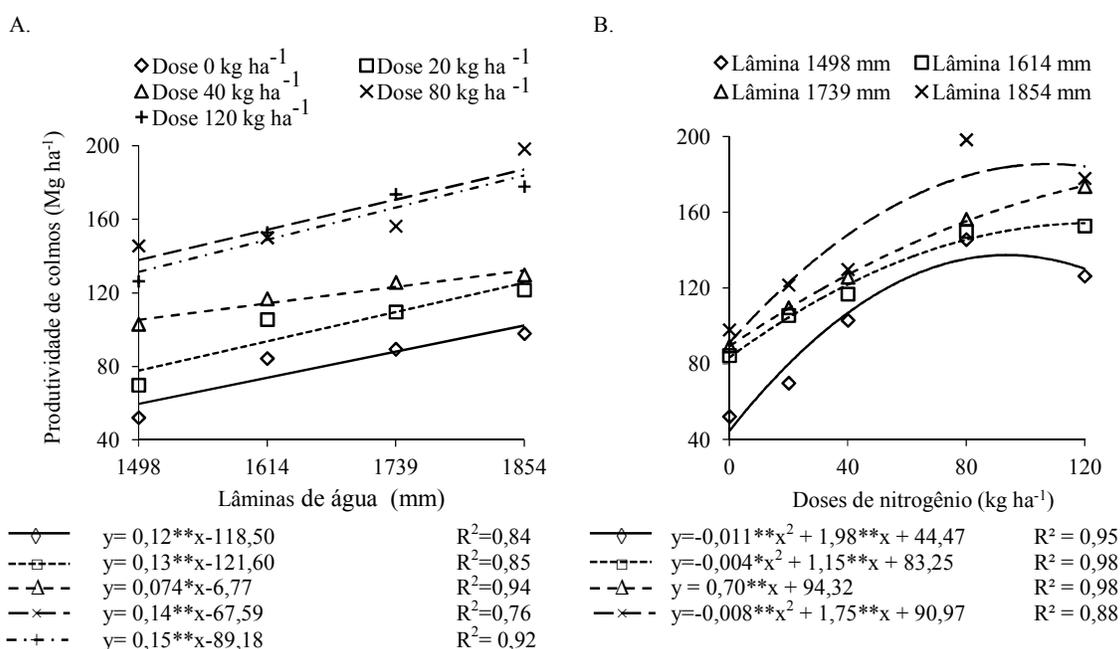


Figura 3. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar (cana-planta), variedade RB92 579, em função das lâminas de água (A) e doses de nitrogênio (B)

Procurando definir níveis ótimos de irrigação, nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar, primeira soca (variedade RB867515), para obtenção da máxima produção de colmos, Andrade Júnior et al. (2012), testaram diferentes níveis de irrigação, adubação nitrogenada e potássica e obtiveram produtividade máxima de colmos (207,4 Mg ha⁻¹) com a aplicação de 1154,0 mm de água, associada a 114,2 kg⁻¹ de N e 60,1 kg ha⁻¹ de K₂O.

Silva et al. (2013) realizaram um experimento em condições de campo com o objetivo de determinar a necessidade hídrica da cana-de-açúcar. Os autores constataram

que o aumento de produção está diretamente e linearmente correlacionado com o aumento do consumo de água. Assim, a maior produtividade ($136,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi obtida no tratamento 100% Eto e a menor ($62,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) no tratamento que não recebeu irrigação, havendo um ganho de 117% em produtividade da maior lâmina para a condição de sequeiro.

Estudando-se o efeito das doses de nitrogênio sobre a produtividade de colmos em cada lâmina de água (Figura 3B) verificou-se resposta significativa em todas as lâminas estudadas, ajustando-se equações quadráticas para as lâminas 1498, 1614 e 1854 mm e equação linear para lâmina 1739 mm. Considerando-se os valores obtidos pelas equações de regressão, verificou-se que as maiores produtividades de colmos foram para a dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} ($163,65$, $178,56$ e $185,77 \text{ Mg ha}^{-1}$) enquanto as menores na ausência de adubação nitrogenada ($83,25$, $94,32$ e $90,97 \text{ Mg ha}^{-1}$), para as lâminas 1614, 1739 e 1854 mm respectivamente, havendo um aumento de 96,6, 89,3 e 104,2 % da menor para a maior dose de nitrogênio aplicada.

Wiedenfeld & Enciso (2008) ao avaliar diferentes regimes de irrigação na região semiárida do Texas, EUA, não verificaram ganhos na produção de colmos com o aumento nos níveis de irrigação. Os mesmos autores também avaliaram o efeito de quatro doses de nitrogênio (0, 120, 160 e 180 kg ha^{-1}) sobre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar (cana-planta) e observaram um aumento linear na produtividade à aplicação de nitrogênio nos quatro ciclos da cultura. O maior valor de produtividade foi $110,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a dose de nitrogênio de 180 kg ha^{-1} .

Fortes et al. (2013) realizaram experimento para estudar o efeito de adubações nitrogenadas na cana-planta e soqueiras sobre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Os autores puderam constatar que na cana-planta houve um aumento linear da produtividade de colmos em resposta ao incremento das doses. A maior produtividade de colmos foi 160 Mg ha^{-1} na dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} .

À medida que se aumenta a disponibilidade de água no solo há um aumento na eficiência de absorção dos nutrientes, principalmente aqueles com elevada solubilidade, como o nitrogênio (Dalri & Cruz, 2008) já que estes estarão disponíveis na solução do solo para as plantas aumentando a absorção e favorecendo o seu aproveitamento como fertilizante.

Na lâmina 1498 mm a maior produtividade de colmos ($133,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi obtida na dose de nitrogênio de 90 kg ha^{-1} diminuindo para $123,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ na dose de nitrogênio de 120 kg ha^{-1} . O menor potencial produtivo na lâmina 1498 mm se deu provavelmente

a condição de deficiência hídrica, já que a disponibilidade de água no solo exerce um impacto substancial no crescimento e desenvolvimento dos cultivos agrícolas.

A obtenção das dosagens máximas físicas e econômicas de água e nitrogênio, sem que haja a fixação dos níveis de quaisquer fatores, leva a construção da superfície de resposta (Silva et al., 2008), ou seja, estima-se a produtividade comercial da cana-de-açúcar para as duas variáveis: lâmina total de água (L) e dose de nitrogênio (N).

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais para expressar a produtividade em função das lâminas de água e das dosagens de nitrogênio está representado pela Equação 9, com coeficiente de determinação (R^2) 0,90. Assim, 90% variação da produtividade de colmos da cana-planta são explicadas pela variação de água e dose de nitrogênio.

$$PC(L, N) = -520,8 + 0,608 \cdot L + 1,03 \cdot N - 0,00015 \cdot L^2 + 0,00027 \cdot L \cdot N - 0,0065 \cdot N^2 \quad (9)$$

PC = produtividade colmos da cana-de-açúcar, em $Mg \text{ ha}^{-1}$;

L = lâmina total de água, em mm ;

N = dose de nitrogênio, em $kg \text{ ha}^{-1}$.

Conhecendo-se a função de produção (Equação 10), chegou-se a derivada parcial em relação aos fatores estudados e igualou-se a zero para obtenção da máxima produtividade física (Equações 12 e 13).

$$\frac{\partial(Y)}{\partial(L)} = 0,608 - 0,0003 \cdot L \rightarrow = 2026 \text{ mm} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(Y)}{\partial(N)} = 1,03 - 0,013 \cdot N \rightarrow N = 79 \text{ kg ha}^{-1} \quad (11)$$

A produtividade máxima física de colmos estimada pelo modelo foi de 179 Mg ha^{-1} , a ser obtida com a lâmina 2026 mm e a dose de nitrogênio 79 kg ha^{-1} . Ambos os fatores foram limitantes para a determinação da produtividade, porém o nitrogênio foi o fator que mais afetou a produtividade de colmos da cana-de-açúcar em relação as lâminas de irrigação, fato esse evidenciado pela maior curvatura da linha do fator dose de nitrogênio na superfície de resposta (Figura 4).

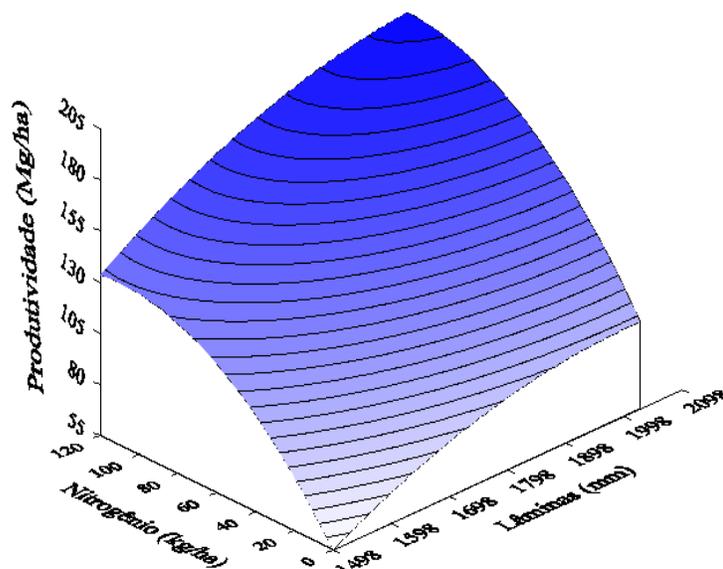


Figura 4. Função de resposta da produtividade da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio

Observa-se que o valor da lâmina para obtenção da máxima produtividade estimada pelo modelo é maior que o valor de lâmina máxima estudada neste trabalho, isso indica que a cana-de-açúcar responderia à lâminas de irrigação superiores a lâmina máxima utilizada nessa pesquisa. Teodoro et al. (2013) obtiveram produtividade agrícola máxima de 180 Mg ha⁻¹ obtida com 1737 mm de irrigação e 125 kg ha⁻¹ de nitrogênio, estes autores também encontraram a máxima produtividade com valor da lâmina superior a máxima estudada no experimento.

Na Tabela 7 encontram-se os valores das taxas marginais de substituição (TMS) de água por nitrogênio (TMSL/N), ou seja, a quantidade de nitrogênio que pode substituir uma unidade do fator água de modo a manter a mesma produtividade.

Tabela 7. Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar, no ciclo de cultivo da cana-planta, na região de Carpina, PE nas isoquantas de 110, 130, 150, 170 Mg ha⁻¹

N (kg ha ⁻¹)	110		130		150		170	
	(L)	TMS	(L)	TMS	(L)	TMS	(L)	TMS
20	1736	-8,83	**	**	**	**	**	**
40	1558	-3,62	1714	-8,20	**	**	**	**
60	---	---	1584	-1,88	1744	-2,95	**	**
80	---	---	1517	0,065	1646	0,087	1832	0,171
100	---	---	---	---	1605	2,13	1758	3,34
120	---	---	---	---	1600	4,14	1745	6,27

A TMS inicialmente foi negativa, indicando que a água estava sendo substituída pelo nitrogênio em proporções decrescentes. A partir do momento que a TMS torna-se positiva, indica que esta é antieconômica, pois a água passa a ser substituída por nitrogênio em quantidades crescentes.

Para obtenção dos níveis de produtividade descritos na Tabela 4 (110, 130, 150, e 170 Mg ha⁻¹), é possível a substituição de água por nitrogênio até a dose de nitrogênio correspondente a 60 kg ha⁻¹. Excedendo essa dose, a aplicação do fator torna-se inviável economicamente. Para a produtividade de 130 Mg ha⁻¹ e a dose de N 60 kg ha⁻¹ seria possível economizar 8 mm de água para cada kg de nitrogênio acrescentado. A TMS pode ser utilizada pelo produtor quando estiver em falta algum dos recursos na fazenda, mantendo a mesma produtividade (Dantas, 2010).

As isoquantas obtidas a partir da função de produção representam as diferentes combinações das lâminas de água e doses de nitrogênio que resultam numa mesma produtividade (Figura 5). Tomando, como exemplo, a produtividade 130 Mg ha⁻¹, nota-se que ela pode ser obtida com a lâmina 1714 mm e com a dose 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio ou 1584 mm de água e 60 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Quanto maior a produtividade, menor a quantidade de combinações dos fatores de produção analisados, até o ponto em que apenas uma combinação de água e N é possível, combinação esta que proporciona o máximo rendimento físico da cana-de-açúcar (179,0 Mg ha⁻¹). 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).

No caso deste trabalho, a região de produção racional no ciclo de cultivo da cana-planta é limitada pelas retas que iniciam na dose de 79 kg ha⁻¹ de nitrogênio e na lâmina 2026 mm que se uniriam no centro da isoquanta da produtividade máxima estimada de 179 Mg ha⁻¹ de cana.

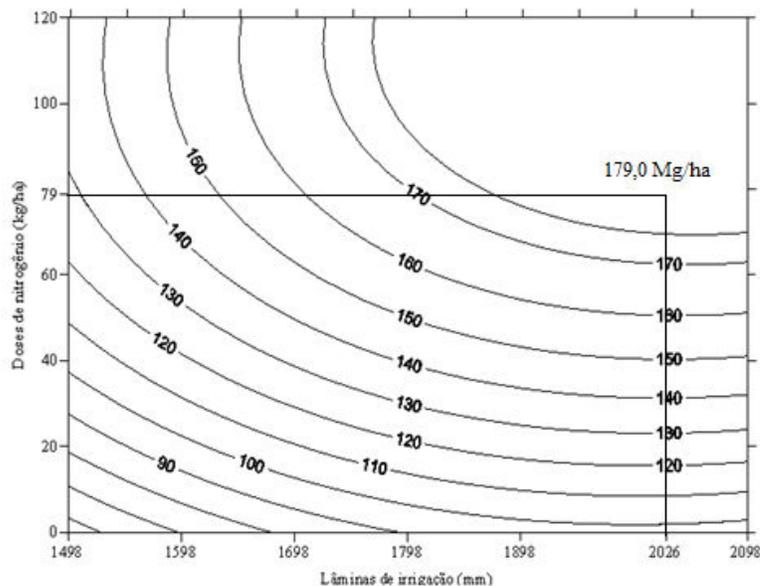


Figura 5. Isoquantas, produtividade máxima e região de produção racional

A partir da função de produção (Equação 1), obteve-se a produtividade que maximiza a receita líquida, através da derivada parcial em relação aos fatores estudados e igualando-as à relação entre os preços unitários da lâmina e preço de venda da cana-de-açúcar (P_L/P_Y) e à relação entre os preços unitários do nitrogênio e da cana-de-açúcar (P_N/P (Equações 12 e 13).

$$\frac{\partial(Y)}{\partial(L)} = 0,608 - 0,0003 \cdot L \rightarrow \frac{P_L}{P_Y} = 1662 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\frac{\partial(Y)}{\partial(N)} = 1,03 - 0,013 \cdot N \rightarrow \frac{P_N}{P_Y} N = 76 \text{ kg ha}^{-1} \quad (13)$$

Admitindo-se que o preço da água foi de R\$ 6,90 mm (detalhado em apêndice), o preço do nitrogênio R\$ 2,30 kg^{-1} , o preço da cana R\$ 63,04 ton^{-1} , e o custo de produção da cultura de R\$ 3954,70 por hectare (detalhado em apêndice), as quantidades de água e nitrogênio para se obter a máxima receita líquida são, respectivamente, 1662 mm e 76 kg ha^{-1} , que correspondem às doses de nitrogênio e de água que proporcionaram a produtividade ótima econômica da cana-de-açúcar, equivalente a 150 Mg ha^{-1} e uma receita líquida de R\$ 4201,80 (Tabela 8).

Tabela 8. Análise econômica para a lâmina de água dose de nitrogênio que maximizam o rendimento físico e receita líquida, estimados pelo modelo obtido

Tratamento	Lâminas*	Doses	P_L	P_N	Prod	RB (Prod* P_p)	RL (RB-CP-(P_L+P_N))
	mm	kg ha ⁻¹	R\$	R\$	Mg ha ⁻¹	R\$	R\$
Prod. Ótima	163	76	1124,7	182,0	179,0	9456,0	4201,8
Prod. Máxima	502	79	3463,8	175,0	150,0	11284,2	3684,0

*Para cálculo do preço das lâminas subtraiu-se a precipitação e lâmina inicia (1360 + 138 mm); P_y = R\$ 63,04 (APCP, 2015); *CP com irrigação R\$ 3954,70 (Detalhado em apêndice)

Vieira et al (2012) obtiveram lâmina de maior rendimento econômico de 1.334 mm para uma produtividade de 108,5 Mg ha⁻¹ e o valor do preço de água igual a R\$ 1,56 mm⁻¹ ha⁻¹ e preço do produto de R\$ 42,0.

Vale et al. (2009), com o preço da tonelada de cana na esteira da usina igual a R\$ 26,69 reais e o custo da ureia R\$ 1.719,47 reais, calcularam que a dose nitrogênio de maior retorno econômico foi 50 kg de N por hectare. De acordo com Teodoro et al (2013) isso indica que a lamina de irrigação e dose de nitrogênio economicamente mais viável depende do preço da cana e do insumo analisado.

CONCLUSÕES

1. As lâminas de água e as doses crescentes de nitrogênio incrementaram o rendimento de colmos da cana-de-açúcar.
2. Função polinomial de 2º grau se ajustou aos dados experimentais.
3. A máxima receita líquida estimada de R\$ 4201,8 foi obtida com uma produtividade 150 Mg ha, utilizando-se 1662 mm de água e 76 kg ha⁻¹ de nitrogênio;
4. A produtividade máxima alcançada ocorreu com uma aplicação de água maior que a lâmina máxima estudada, isso indica que a cana-de-açúcar responderia a lâminas de água superiores à máxima utilizada nessa pesquisa.
5. O nitrogênio afetou mais a produtividade de colmos da cana-de-açúcar do que as lâminas de água.

LITERATURA CITADA

Andrade Júnior, A. S.; Bastos, E. A.; Ribeiro, V. Q.; Duarte, J. A. L.; Braga, D. L.; Noleto, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, n.1, p.76-84, 2012.

- Andrade Júnior, A. S.; Frizzone, J. A.; Bastos, E. A.; Cardoso, M. J.; Rodrigues, B. H. N. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.2, p.301-305, 2001.
- Cabrera, J. A.; Zuaznábar, R. Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de larga duración con 24 cosechas acumuladas. *Cultivos Tropicales*, v.31, n.1, p. 93-100, 2010.
- Castro, R. P.; Costa, R. N. T.; Silva, L. A. C.; Gomes Filho, R. R. Modelos de decisão para otimização econômica do uso da água em áreas irrigadas da Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste – CE. *Irriga*, v. 12, n. 3, p. 377-392, 2007.
- Dalri, A. B.; Cruz, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 3, p. 516 - 524, 2008.
- Dantas, D. C. Função de produção do meloeiro em resposta à fertirrigação nitrogenada e potássica na microrregião de Mossoró. 2010. 80f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - UFRSA, Mossoró-RN, 2010.
- Doorenbos, J.; Kassan, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina: Planta, 2006.
- Fortes, C.; Trivelin, P. C. O.; Vitti, A. C.; Otto, R.; Franco, H. C. J.; Faroni, C. E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, n.1, p.88-96, 2013.
- Frizzone, J. A.; Andrade Júnior, A. S. Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.
- Frizzone, J. A. Funções de resposta das culturas à irrigação. Piracicaba: ESALQ-USP, 1993. 42 p. (Série didática, 6).

- 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.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IPA. Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2a. aproximação. 2 ed. rev. Recife: IPA, 2008.
- Leite, K. N.; Costa, R. N. T.; Crisóstomo, 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, n.4, p.739-747, 2013.
- Oliveira, E. C. A.; Oliveira, R. I.; Andrade, B. M. T.; Freire, F. J.; Lira Júnior, M. A.; Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.951-960, 2010.
- Oliveira, E. C. de; Freire, F. J.; Oliveira, A. C. de; Simões Neto, D. E.; Rocha, A. T. da; Carvalho, L. A. de. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n.6, p.617-625, 2011.
- Oliveira, R. C.; Cunha, F. N.; Silva, N. F.; Texeira; M. B.; Soares, F. A. L.; Megguer, C. A.; Productivity os fertirrigated sugarcane in subsurface drip irrigation system. *African Journal of Agricultural*, v. 9, n. 11, p. 993-1000, 2014.
- Santos Júnior, J. L. C.; Frizzone, J. A.; Paz, V. P. S. Otimização do uso da água no perímetro irrigado formoso aplicando lâminas máximas de água. *Irriga*, v. 19, n. 2, p. 196-206, 2014.
- SILVA, J. S.; Silva, H. G.; Soares, Y. M. A.; Martins, M. M. T. S. O processo de contabilização dos custos de implantação da cana-de-açúcar na Miriri Alimentos e Bioenergia S/A. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 2014, Natal. *Anais...* São Leopoldo: UNISINOS, 2014.
- Silva, P. A. M.; Pereira, G. M.; Reis, R. P.; Lima, L. A.; Taveira, J. H. S.; Função de resposta da alface americana aos níveis de água e adubação nitrogenada. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 4, p. 1266-1271, 2008.
- Silva, V. P. R.; Silva, B. B.; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J. R.; Souza, I. F.; Dantas Neto, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of

- sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 128, p. 102-109, 2013.
- Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação a água para três variedades, em Campos dos Goytacazes, RJ. *Engenharia Agrícola*, v. 19, n. 1, p. 28 - 42, 1999.
- Souza, J. K.; Silva, S. Dantas Neto, J.; Silva, M. B. R.; Teodoro, I. Importância da irrigação para a produção de cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. *Revista Educação Agrícola Superior*, v. 27, n. 2, p. 133-140, 2012.
- Teodoro, I.; Dantas Neto, J.; Souza, L.; Lyra, G. B.; Brito, K. S.; Sá, L. A.; Santos, M. A.; Sarmiento, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. *Irriga*, v. 18, n. 3, p. 387-401, 2013.
- Umesh, U. N.; Kumar, V.; Alam, M.; Sinha, S. K.; Verma, K. Integrated effect of organic and inorganic fertilizers on yield, quality parameter and nutrient availability of sugarcane in calcareous soil. *Sugar Tech*, v. 15, n. 4, p. 365 - 369, 2013.
- Vale, D. W.; Prado, R. M.; Pancelli, M. A. Análise econômica da adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar. *Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB*, v. 28 n. 2, p. 32 – 34, 2009.
- Vieira, G. H. S.; Mantovani, E. C.; Sediya, G. C.; Costa, E. L.; Delazari, F. T. produtividade de colmos e rendimento de açúcares da cana-de-açúcar em função de lâminas de água. *Irriga*, v. 17, n. 2, p. 234 - 244, 2012.
- Wiedenfeld, B.; Enciso, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. *Agronomy Journal, Madison*, v. 100, n. 3, p. 655 – 671, 2008.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1) A irrigação é uma técnica economicamente viável para a cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, visto que, mesmo nas condições edafoclimáticas do Estado a irrigação garantiu maior segurança à atividade de produção agrícola, sendo responsável por acréscimos na produtividade das lavouras. Porém há necessidade do dimensionamento detalhado da lâmina de irrigação para se garantir o retorno esperado, além de se considerar os ganhos indiretos da adoção dessa prática. Na presente pesquisa pôde-se verificar que a produtividade máxima física e econômica foi obtida com um volume de água maior à lâmina de água máxima estudada, sendo necessários novos estudos visando atender a exigência da cultura, garantindo ganhos em produtividade e retorno econômico, além da boa qualidade do produto.

2) A adubação nitrogenada constitui-se uma prática agrícola eficiente para a cultura da cana-de-açúcar, promovendo ganhos em termos de crescimento, acúmulo de nutrientes, produtividade e qualidade da cultura, porém os estudos sobre adubação nitrogenada ainda são escassos, sendo necessária a realização de novas pesquisas. Na presente pesquisa pôde-se observar que a cana-de-açúcar respondeu a doses maiores a dose recomendada para a cultura no Estado de Pernambuco, assim faz-se necessário desenvolver outros trabalhos considerando doses de nitrogênio maiores e a sua influência no desenvolvimento da planta e produtividade da cultura.

3) Os resultados obtidos sugerem que a irrigação da cana-de-açúcar, bem como a adubação nitrogenada, nessa região de Pernambuco são práticas de manejo que promovem retornos econômicos, uma vez que foram encontrados valores de produtividade superiores à média do estado e do país.

4) Os resultados encontrados no experimento sugerem que a irrigação da cana-de-açúcar conjuntamente com a adubação nitrogenada são práticas agrícolas que incrementam a produtividade e qualidade da cultura, uma vez que foram encontrados valores superiores à média para o Estado de Pernambuco e Brasil.

5) O estudo da exigência nutricional da cana-de-açúcar permitiu identificar o período de maior de maior acúmulo de nutrientes, dados estes escassos na literatura, além da quantificação do acúmulo de nutrientes em cada órgão da planta. O conhecimento da quantidade de nutrientes acumulados na planta, em cada estágio de desenvolvimento, fornece subsídios para auxiliar a elaboração de um programa para adubação da cultura.

6) A produtividade de colmos e a qualidade tecnológica da cana de açúcar (cana-planta) foram influenciadas pela adubação nitrogenada, opondo-se ao citado na literatura, que somente socas respondem a adubação nitrogenada.

APÊNDICE

Apêndice 1. Contabilização do custo de implantação de 1 hectare de cana-de-açúcar

Especificação	Unidades por ha		R\$ unitário	R\$ hectares
	Toneladas	Diária		
1) Mão-de-obra				
Análise do solo			24,00	2,40
Corte da semente	12		9,50	114,00
Semeio		4,77	22,93	109,38
Rebolamento		1,78	22,93	40,82
Retoque da cobertura		1,24	22,93	28,43
Alinhamento de talhões		1	22,93	22,93
Sub Total (mão-de-obra)				317,95
Encargos	%			
INSS	28,80			91,57
FGTS	8,00			25,44
13º salário	8,33			26,49
Férias	11,11			35,32
Multa rescisória	4,00			12,72
PIS	1,65			5,25
COFINS	7,60			24,16
Administração	5			15,90
Total (Encargos)				236,84
Total da mão-de-obra rural por hectare implantado				554,80
2) Mecanização				
	Toneladas	H/M	Diária	
Dessecagem química		1		65,00
Calagem		2		65,00
Subsolagem		2,5		85,00
1ª gradagem		1,1		85,00
2ª gradagem		1		85,00
Nivelamento		1		85,00
Transporte do adubo	0,5			40,00
Transporte de calcário	2			40,00
Transporte de pessoal			1	250,00
Sulcamento		2		85,00
Carrego da semente	12			6,00
Transporte da semente	12			25,00
Descarrego da semente		1		85,00
Reboque no descarrego		0,5		85,00
Coberta		1		65,00
Aplicação de defensivos		1		65,00
Total da mecanização				1595,50
3) Insumos				
	Toneladas	Litros		
Semente	12		65,45	785,40
Calcário	2		50,00	100,00
Cupinicida		0,2	700,00	140,00
Nematicida		7	27,00	189,00
Adubo de fundação	0,25		1700,00	425,00
Herbicida pré-emergência		3	30,00	90,00
Herbicida de secagem		5	15,00	75,00
Total dos insumos				1804,40
TOTAL				3954,70

Fonte: SILVA et al. (2014)