**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes
doses de vinhaça**

Fábio Jordão Rocha

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2013**

Fábio Jordão Rocha
Engenheiro Agrônomo

**Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses
de vinhaça**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**
Co-Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Rocha, Fábio Jordão

Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça / Fábio Jordão Rocha.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
94 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Cana-de-açúcar 2. Fertirrigação 3. Irrigação localizada 4. Produtividade
5. Resíduo agroindustrial 6. Vinhaça I. Título

CDD 633.61
R672d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A minha esposa Camila e ao
meu filho Pedro.

Dedico

A minha mãe Maria Beatriz e
aos meus irmãos Thiago e
Renata, a minha avó Cecília e
ao meu avô Alcione (*in
memorian*).

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Marcos Vinícius Folegatti, pelas orientações na iniciação científica, mestrado e doutorado, pela amizade e pelo incentivo;

Aos Professores Dr. Rubens Coelho e Jarbas de Miranda pela participação e auxílio na pesquisa;

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas pelo aprendizado adquirido nas disciplinas;

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelas bolsas de iniciação científica, mestrado e doutorado, pelo auxílio a pesquisa, e pelo apoio financeiro no exterior;

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa de doutorado sanduíche;

Ao Professor Dr. Juan Enciso e ao Dr. Hugo Perea pela excelente orientação e amizade no período do Doutorado Sanduíche;

À Texas A&M University e à Texas Agrilife Research and Extension Center;

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), em nome da Engenheira Agrônoma Ana Carolina Guimarães, pela recomendação e fornecimento das mudas de cana-de-açúcar;

À Usina Capuava, em nome do Engenheiro Agrônomo José Luis, pelo fornecimento da vinhaça;

À John Deere Water pelo fornecimento do material de irrigação;

Ao Engenheiro Agrônomo João Alberto Lelis, um dos idealizadores desse projeto e meu companheiro de pesquisa, congressos, viagens e cursos ministrados – “Valeu, meu filho!!”

Aos estagiários Pedro Henrique Chinelato, Luciano Alves de Oliveira e Thales Sattolo pela grande ajuda em todas as etapas do experimento;

Aos colegas de pós-graduação pelos grandes momentos vividos! Em especial ao Roque Pinho pela continuidade no trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas: Gilmar Batista Grigolon, Antonio Agostinho Gozzo, Hélio Toledo Gomes, Luís Custódio de Camargo, Osvaldo Rettore Neto, Antonio Pires de Camargo, Marinaldo Ferreira Pinto, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Beatriz Regina Duarte Novaes, Davilmar Aparecida D. Collevatti, Angela Márcia Derigi Silva e Lino Stênico;

À equipe da Biblioteca Central da ESALQ/USP pela ajuda na finalização da Tese;

Aos meus amigos Dr. Thiago Benatti e Maribel León, Dr. Jorge da Silva e Denise Rossi, Denise Carvalho e Gustavo Manino (Vai Corinthians!!), pela grande amizade formada durante o doutorado sanduíche;

Ao my best American friend, Antonio Reyna! Grande companheiro;

Aos meus irmãos da República K-labouço! “A corrente jamais será quebrada”. E a grande amiga Lena pelo café e carinho de todas as manhãs!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	23
2.1 Revisão bibliográfica.....	23
2.1.1 Etanol da cana-de-açúcar.....	23
2.1.2 Resíduos (Subprodutos) da agroindústria sucroenergética.....	28
2.1.2.1 Bagaço da cana-de-açúcar	28
2.1.2.2 Vinhaça.....	29
2.1.3 Irrigação e fertirrigação da cana-de-açúcar	31
2.1.4 Estresse hídrico.....	33
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	35
3.2 Delineamento estatístico e tratamentos (definição e aplicação).....	37
3.3 Preparo da área	41
3.4 Plantio da cana-de-açúcar e instalação do sistema de irrigação	42
3.5 Variedade.....	46
3.6 Características das parcelas experimentais e instalação dos tensiômetros, extratores de solução e tubos de acesso da sonda diviner 2000.....	48
3.7 Manejo da irrigação	50
3.8 Avaliações	52
3.8.1 Monitoramento das características químicas da solução do solo	52
3.8.2 Monitoramento do comportamento dos gotejadores quanto ao entupimento	53
3.8.3 Biometria	55

3.8.4 Análise foliar e teor de clorofila	55
3.8.5 Produtividade e características tecnológicas	56
3.8.6 Produção de açúcar e etanol.....	57
3.9 Análise estatística dos dados.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Dados climáticos ao longo dos ciclos da cultura	59
4.2 Monitoramento do pH e condutividade elétrica do solo	63
4.3 Biometria.....	68
4.4 Análise nutricional das folhas e teor de clorofila.....	71
4.5 Características tecnológicas e produtividade agrícola e industrial	76
4.6 Monitoramento do comportamento dos gotejadores quanto ao entupimento	84
5 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	87

RESUMO

Desenvolvimento e produtividade de cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça aplicada por gotejamento subsuperficial

A vinhaça é um resíduo da produção de etanol e reutilizada nas áreas de cana-de-açúcar fornecendo nutrientes para cultura, principalmente potássio. Gerada na proporção de 10 a 13 litros para cada litro de etanol produzido, a vinhaça representa uma excelente alternativa aos fertilizantes químicos e apresenta desafios ambientais e técnicos para sua aplicação nos solos agrícolas. O manejo inadequado da aplicação de vinhaça pode acarretar, além dos problemas ambientais, pior qualidade da matéria prima para indústria. Esta pesquisa teve como objetivo estudar o efeito da aplicação de diferentes doses de vinhaça via gotejamento subsuperficial no desenvolvimento, na produtividade agrícola, nos parâmetros tecnológicos ($^{\circ}$ Brix, Pol, pureza, fibra, açúcar redutor, açúcar redutor total, açúcar total recuperável e teor de cinzas), na produção de bioprodutos da cana-de-açúcar e nas alterações do pH e da condutividade elétrica da solução do solo, além da avaliação do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. O experimento foi instalado na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas – USP/ESALQ, situada em Piracicaba-SP. Foi adotado o delineamento estatístico inteiramente casualizado com 6 tratamentos e 4 repetições, sendo o tratamento 1 sem irrigação e com adubação convencional junto ao plantio, tratamento 2 fertirrigado convencional, e os tratamentos de 3 a 6 fertirrigados com diferentes doses de vinhaça. O tratamento 4 recebeu a dose (D_{CETESB}) calculada segundo os critérios da norma técnica P4.231/2005 da CETESB, e os tratamentos 3, 5 e 6 receberam, $\frac{1}{2} D_{CETESB}$, $2 \times D_{CETESB}$ e $3 \times D_{CETESB}$, respectivamente. Dois ciclos, cana-planta e primeira soca, foram avaliados. O acompanhamento do pH e da condutividade hidráulica do solo, o desenvolvimento vegetativo, a análise nutricional das folhas e o desempenho do sistema de irrigação foram avaliados no primeiro ciclo. A produção de biomassa, a produção de açúcar, a produção de etanol foram avaliados nos dois ciclos. Os resultados mostraram que houve um aumento dos valores de pH e CE no solo, diante do aumento do volume aplicado, mas evidenciou-se a necessidade de um maior intervalo de tempo para a percepção de suas diferenças. Os tratamentos 4, 5 e 6 apresentaram maiores valores de área foliar e altura de planta em relação ao tratamento 1, enquanto que os outros dados de biometria não apresentaram diferença entre os tratamentos. As análises foliares realizadas mostraram que não houve influência das doses de vinhaça no estado nutricional das plantas. Dentre os parâmetros tecnológicos avaliados o teor de cinzas no caldo foi influenciado pela aplicação de diferentes doses nas duas colheitas realizadas, já os outros parâmetros não foram influenciados. A produtividade de cana-de-açúcar apresentou diferença entre os tratamentos apenas na primeira colheita, sendo que aplicação de vinhaça resultou no aumento de produção. Esse aumento de produtividade ocorrido no primeiro ciclo resultou diretamente em um aumento do etanol de segunda geração (E2G), enquanto que a produção de açúcar, etanol de primeira geração (E1G) e etanol total (E1G+E2G) não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos.

Palavras-chave: Fertirrigação; Resíduo agroindustrial; Irrigação localizada

ABSTRACT

Sugarcane yield and development to different doses of vinasse injected with a subsurface drip irrigation system

Vinasse is a by-product from ethanol production and reused in sugarcane fields providing nutrients to the plants, mainly potassium. Generated at a rate of 10-13 liters for every liter of ethanol, the vinasse represents an excellent alternative to chemical fertilizers and it also presents environmental and technical challenges for its applications on agricultural soils. Mismanagement of vinasse can cause environmental impacts and lower the quality of sugarcane production. This study had as aim to study the effect of application of different doses of vinasse by a subsurface drip irrigation system in sugarcane vegetative development, sugarcane yields, technological parameters, bio-products production, changes in pH and electrical conductivity (EC) of the soil, evaluation of potential to use of drip irrigation to apply vinasse. A completely randomized design with 6 treatments and 4 repetitions was conducted at experimental area of Bio systems Engineering Department of USP/ESALQ, placed in Piracicaba-SP. The treatment 1 was performed in dry land system with chemical fertilization at planting; treatment 2 was fertigated with chemical fertilizers (no vinasse); treatments from 3 to 6 received different levels of vinasse. Treatment 4 received the dose (D_{CETESB}) calculated in according to criteria from technical standard P4.231/2005 of CETESB, and treatments 3, 5 and 6 received $\frac{1}{2} D_{\text{CETESB}}$, $2 \times D_{\text{CETESB}}$ and $3 \times D_{\text{CETESB}}$, respectively. Two cycles of sugarcane were evaluated, first year and first ratoon. The monitoring of pH and EC of the soil, vegetative development, leaf nutritional analysis and drip irrigation performance were evaluated at first cycle. Biomass, sugar and ethanol production were evaluated at first and second cycles. The results showed that an increase of pH and EC occurred due to the vinasse application, however, was evident the need of a higher interval of time to see the differences. Treatments 4, 5 and 6 showed higher values of leaf area and plant height when compared to treatment 1, while the another biometric data did not show difference between the treatments. Leaf nutritional analysis showed that did not have effect of vinasse doses in nutritional status of the plants. Among technological parameters just as content was affected by the application of different doses of vinasse at two harvests, and the another parameters were not affected. Sugarcane yields showed difference between treatments just at first year when vinasse application resulted in production increasing. This increase caused an increase of second generation ethanol production (E2G), while the sugar, first generation ethanol (E1G) and total ethanol (E1G+E2G) did not show significance difference between treatments.

Keywords: Fertigation; Agroindustrial waste; Drip irrigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem da área retirada do Google Earth®	36
Figura 2 – Distribuição dos tratamentos. T – tratamento; R – repetição.....	37
Figura 3 – Momento de recebimento da vinhaça (A); Estrutura para armazenamento e aplicação da vinhaça e da fertirrigação.....	40
Figura 4 – Preparo do solo (A); Massa verde formada pela crotalaria (B); Incorporação da crotalaria (C) e (D).....	41
Figura 5 - Etapas dos ajustes do conjunto (A), (B) e (C); Conjunto operando na área de testes (D); Solo sulcado com o gotejador já enterrado (E) e (F)	43
Figura 6 – Esquema do espaçamento combinado de 1,5 m (0,5 m)	44
Figura 7 – Início do processo de sulcagem (A); Gotejador enterrado a 0,3 m (B).....	44
Figura 8 – Preparo das mudas e etapas do plantio da cana-de-açúcar.....	45
Figura 9 – Etapas da montagem do sistema de irrigação	46
Figura 10 – Produtividade em 5 cortes para as variedades CTC 12 e SP80-1842 (A); Pol% das variedades CTC12, SP80-1842 e SP81-3250, média de 2 cortes (B). Fonte CTC.....	48
Figura 11 – Esquema da parcela experimental com o posicionamento dos extratores de solução, dos tensiômetros e do tubos de acesso para sonda Diviner 2000; Esquema dos tensiômetros e extratores de solução instalados de maneira equidistante de um gotejador	49
Figura 12 – Etapas da instalação dos tensiômetros e extratores de solução.....	49
Figura 13 – Manejo da irrigação utilizando o tensiômetro (A), e manejo utilizando a sonda Diviner 2000 (B).....	50
Figura 14 – Bomba de vácuo (A) e Vista detalhada da aplicação do vácuo (B).....	53
Figura 15 – Gotejador selecionado para o ensaio de vazão (A); Vista frontal da distribuição dos recipientes na parcela para a realização do teste de vazão (B); Coleta da vazão (C) e Pesagem (D)	54
Figura 16 – Equipamento ClorofiLOG (Falker) determinando o teor de clorofila nas folhas	56
Figura 17 – Vista da área acamada (A); Pesagem dos colmos (B); Pesagem das ponteiros (C); Feixe com 10 plantas amostradas (D).....	57
Figura 18 - Distribuição do pH, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011	64

Figura 19 - Distribuição do pH, nos tratamentos 4, 5 e 6 (T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011	65
Figura 20 - Distribuição da condutividade elétrica, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011	66
Figura 21 - Distribuição da condutividade elétrica, nos tratamentos 4, 5 e 6 (T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011 ..	67
Figura 22 - Teor de clorofila <i>a</i> na folha	75
Figura 23 - Teor de clorofila <i>b</i> na folha	75
Figura 24 - Teor de clorofila <i>total</i> na folha.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (PRADA et al., 1998).....	30
Tabela 2 – Resultados da análise química do solo da área experimental, Piracicaba, SP, 2010...	36
Tabela 3 – Resultados da análise química do solo da área experimental (continuação)	36
Tabela 4 – Análise física do solo da área experimental, Piracicaba, SP, 2010	37
Tabela 5 – Esquema da análise de variância	37
Tabela 6 – Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar (ciclo cana planta de 12 meses). .	39
Tabela 7 – Quantidade de fertilizante e vinhaça por tratamento	39
Tabela 8 – Características da vinhaça utilizada no experimento, Piracicaba, SP, 2011.....	41
Tabela 9 – Características da variedade CTC 12.....	47
Tabela 10 – Reação a pragas e doenças da variedade CTC 12.....	47
Tabela 11 – Resultados da CTC 12 obtidos no final de 2002 (5 cortes, 27 locais e 50 ensaios) em comparação com outras variedades	47
Tabela 12 – Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e parâmetros (α , m e n) do modelo de Van Genuchten (1980) do solo, Piracicaba, SP, 2010.....	50
Tabela 13 – Fatores de conversão de 1 kg de ATR para os bioprodutos da cana-de-açúcar	57
Tabela 14 – Valores médios mensais dos dados meteorológicos ocorridos no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)	60
Tabela 15 – Dias após o plantio (DAP), Graus-dias (GD) e Graus-dias negativos (GDneg) no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)	60
Tabela 16 – Valores médios mensais dos dados meteorológicos ocorridos no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)	61
Tabela 17 – Dias após o primeiro corte (DAPc), Graus-dias (GD) e Graus-dias negativos (GDneg) no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)	62
Tabela 18 – Evapotranspiração de referência (ET_o), Evapotranspiração de cultura (ET_c), Evapotranspiração de cultura ajustada ($Etc_{ajustada}$), precipitação e irrigação ocorridas no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)	62
Tabela 19 - Evapotranspiração de referência (ET_o), Evapotranspiração de cultura (ET_c), Evapotranspiração de cultura ajustada ($Etc_{ajustada}$), precipitação e irrigação ocorridas no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)	63
Tabela 20 - Altura de planta (cm) aos 127, 226, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)	70

Tabela 21 - Área foliar (cm ²) aos 109, 182, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP).....	70
Tabela 22 - Diâmetro de colmo (mm) aos 110, 182, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)	70
Tabela 23 - Distância de internódios (cm) aos 260, 273 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP).....	71
Tabela 24 - Número de internódios aos 260, 273 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP).....	71
Tabela 25 - Número de colmos por metro após estabilização da cultura	71
Tabela 26 - Análise nutricional das folhas (macronutrientes) – 180 DAP	72
Tabela 27 - Análise nutricional das folhas (micronutrientes) – 180 DAP	72
Tabela 28 - Análise nutricional das folhas (macronutrientes) – 300 DAP	72
Tabela 29 - Análise nutricional das folhas (micronutrientes) – 300 DAP	73
Tabela 30 - Classificação dos teores de nutrientes em relação à faixa adequada – 180 DAP	73
Tabela 31 - Classificação dos teores de nutrients em relação a faixa adequada – 180 DAP	73
Tabela 32 - Classificação dos teores de nutrientes em relação à faixa adequada – 300 DAP	74
Tabela 33 - Classificação dos teores de nutrients em relação a faixa adequada – 300 DAP	74
Tabela 34 - Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar (cana planta) (Piracicaba, SP).....	78
Tabela 35 - Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar (cana primeira soca) (Piracicaba, SP)...	79
Tabela 36 - Produtividade de biomassa total, colmos industrialmente utilizáveis e ponteira (cana planta) (Piracicaba, SP).....	80
Tabela 37 - Produtividade de biomassa total, colmos industrialmente utilizáveis e ponteira (primeira soca) (Piracicaba, SP)	80
Tabela 38 - Produção e rendimento de açúcar branco e etanol anidro (cana planta) (Piracicaba, SP).....	82
Tabela 39 - Produção e rendimento de açúcar branco e etanol anidro (primeira soca) (Piracicaba, SP).....	82
Tabela 40 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 123 kg TC ⁻¹ de LM (cana planta) (Piracicaba, SP).....	83
Tabela 41 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 123 kg TC ⁻¹ de LM (cana primeira soca) (Piracicaba, SP)	83

Tabela 42 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 61,5 kg TC ⁻¹ de LM (cana planta) (Piracicaba, SP)	83
Tabela 43 - Valores calculados para o teste de uniformidade de distribuição do sistema de irrigação.....	84
Tabela 44 - Valores obtidos pela coleta de vazão separada por tratamento	84

1 INTRODUÇÃO

A produção de biocombustível tem sua importância ligada a substituição do combustível fóssil devido a questões econômicas, estratégicas e ambientais. No ano de 1975 no Brasil foi lançado o Programa Nacional do Alcool, o Pró-Alcool, motivado por um elevado aumento no preço do barril de petróleo ocorrido em 1973 e pela queda do preço do açúcar no mercado internacional em 1975. O programa teve apenas caráter econômico e estratégico (segurança energética) e ganhou força em 1979 com uma nova crise do petróleo. Na década seguinte, com o êxito da venda de carro movido a etanol, houve uma expansão dos canaviais em uma época onde os movimentos ecológicos estavam começando a ganhar força, mas ainda permitindo que essa expansão ocorresse com grandes impactos ambientais, tais como poluição atmosférica (queimadas), desmatamento, poluição de águas superficiais e do lençol freático, entre outros (ROSSETTO, 2010a; SZMRECSÁNYI, 1994).

Duas datas podem ser consideradas importantes para as questões ambientais na agricultura brasileira posteriormente a Conferência de Estocolmo em 1972. A primeira foi em 1987 através do Relatório de Brundtland (Nosso Futuro Comum) onde pela primeira vez foi empregado o termo Agricultura Sustentável – “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. – Nesse relatório a Primeira Ministra da Noruega na época, Sra. Gro Harlem Brundlant, lançou conceitos de desenvolvimento sustentável utilizados nos tempos atuais, onde no relatório já é citada uma preocupação com o aquecimento global.

A segunda data foi em 1992 no Rio de Janeiro, onde ocorreu a reunião da ONU, a ECO92, onde foi debatido, entre outros assuntos, metas para controlar a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, abrindo caminho para o Protocolo de Kyoto (1997) – acordo internacional para redução da emissão de gases do efeito estufa por países industrializados – os países em desenvolvimento signatários não são obrigados a cumprir metas de redução de emissão de gases do efeito estufa, apenas manter a ONU informada do nível de emissão de CO₂ e estratégias para o desenvolvimento sustentável.

Dentre as medidas mitigadoras de emissão de gases do efeito estufa, destacaram-se combustíveis considerados limpos e renováveis, como os biocombustíveis, podendo destacar o etanol da cana-de-açúcar que é reconhecido mundialmente. Segundo Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USA Environmental Protect Agency – EPA), o etanol é classificado como um combustível avançado por reduzir em 61% a emissão de gases do efeito estufa quando comparado a gasolina.

Dados estatísticos mostram que o Brasil apresenta uma área de 8,04 milhões de hectares de cana-de-açúcar com uma produção 625 milhões de toneladas, o que resulta em uma produtividade de 77,798 t ha⁻¹. Desse total de cana-de-açúcar produzida foram gerados 38,67 toneladas de açúcar e 27,7 bilhões de litros de etanol total (anidro + hidratado) (dados da safra 2010/2011 – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011). Esses dados conferem ao Brasil o primeiro lugar no ranking de países produtores de cana-de-açúcar, maior produtor e exportador de açúcar, e segundo maior produtor e maior exportador de etanol (FAO). Esses números também mostram um aumento considerável na produção do combustível, quando em 2001/2002 a produção foi de 11,4 bilhões de litros. Essa evolução na produção veio junto com o lançamento da tecnologia *flex fuel* em 2003, onde é possível misturar álcool e gasolina em qualquer proporção, impulsionando a demanda por etanol hidratado.

A produção mundial de etanol equivale a 8% do consumo de gasolina (1,2 trilhão de litros anual) (NASTARI, 2011), sendo que em 2008 equivalia a 2% e em 2030 esse valor pode atingir entre 10 e 20% (WALTER et al., 2008). Esse cenário mostra um importante desafio para os produtores de etanol alcançarem quantidade suficiente de combustível para atender as futuras demandas de maneira sustentável.

Por outro lado o processo de produção de etanol, assim com o de açúcar, são geradores de uma grande quantidade de resíduos, tais como vinhaça, torta de filtro e bagaço, onde o correto gerenciamento é ponto fundamental para que todo processo seja sustentável. Nesse quesito as usinas se destacam, pois todo o resíduo gerado é reutilizado no seu próprio processo de produção. O bagaço pode ser utilizado para cogeração de energia elétrica e vapor, e com a tecnologia de etanol de segunda geração poderá ser utilizado como matéria prima para produção de etanol com potencial de gerar 186 L por tonelada de cana (ROSSEL, 2007). A vinhaça e a torta de filtro são usadas como fertilizantes orgânicos, substituindo parte da fertilização química na cana-de-açúcar, podendo diminuir os custos de produção.

O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de fertilizantes, mas representa apenas 2% da produção mundial, o que torna o país dependente da importação de fertilizantes. Em 2007, 75% do nitrogênio, 51% do fósforo e 91% do potássio foram importados (Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA). Essa dependência torna-se mais complicada considerando que são poucos os países exportadores de fertilizantes, e que os preços são atrelados ao preço do barril do petróleo e seus derivados. Diante disso, os resíduos como fonte alternativa aos fertilizantes químicos ganharam em importância e valor econômico, podendo ser tratados como subprodutos e não como resíduos (ROSSETTO, 2010b).

A vinhaça é gerada na proporção de 10 a 13 L para cada litro de etanol produzido, o que resulta em volume de pelo menos 277 bilhões de litros considerando a quantidade de etanol produzida na safra 2010/2011. Sua caracterização química mostra concentrações de potássio (K_2O) variando entre 1,2 a 7,83 $kg\ m^{-3}$, dependendo do tipo de mosto (melaço, caldo ou misto) (PRADA et al., 1998). Portanto, aplicando uma dose de 100 $m^3\ ha^{-1}$ de vinhaça, corresponde a uma aplicação de K_2O entre 120 e 783 $kg\ ha^{-1}$, que podem ser superiores aos valores convencionais de adubação potássica na cana-de-açúcar. Outros importantes elementos constituintes na composição da vinhaça são nitrogênio, cálcio, magnésio, enxofre e fósforo, que apresentam valores médios de 357, 515, 226, 1537 e 61 $g\ m^{-3}$, respectivamente (ELIA NETO; NAKAHONDO, 1995), além de apresentar elevado teor de matéria orgânica e relação C/N de 15.

No Estado de São Paulo através de sua Companhia Ambiental (CETESB) os critérios e procedimentos para aplicação de vinhaça em solo agrícola são regidos pela norma técnica P4.231 de 2005. A dosagem a ser aplicada é calculada por uma equação que leva em consideração a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo, concentração do potássio no solo, potencial de extração de potássio pela cana-de-açúcar, e a concentração de K_2O na vinhaça. Sua aplicação via fertirrigação é considerada a alternativa mais econômica e contribui para a fertilidade dos solos e produtividade, porém o manejo inadequado na aplicação pode ocasionar, além de impactos ambientais como contaminação do lençol freático, a perda na qualidade da matéria prima para indústria.

Lelis (2008) estudando a percolação dos componentes químicos da vinhaça mostrou que o tipo de solo foi um dos fatores que influenciou diretamente na movimentação dos componentes químicos da vinhaça, bem como a concentração dos nutrientes que fazem parte de sua composição ao longo da safra da cana-de-açúcar, onde o solo de textura argilosa não apresentou diferença significativa em termos de movimentação dos nutrientes, independente da dosagem de vinhaça aplicada. A própria CETESB comentando o trabalho de Lelis (2008), enfatizou a importância dessa linha de estudo principalmente pelo fato de 72% dos solos destinados aos canaviais do Estado de São Paulo serem argilosos.

Diversos autores citam que a vinhaça pode alterar as características do solo, tais como elevação do pH, elevação da capacidade de troca catiônica (CTC) e a quantidade de alguns nutrientes, aumento da atividade biológica promovendo maior número de bactérias e fungos. Esses fatores favorecem o ganho de produção da cana-de-açúcar. Outros autores citam que efeitos maléficos foram encontrados apenas em áreas sob doses excessivas de vinhaça (CAMARGO et al., 1987; GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983). O potássio, principal

elemento contido na vinhaça, é o macronutriente com maior taxa de extração pela cana-de-açúcar e pode ocorrer de maneira excessiva e não mostrar sintomas de toxicidade para planta, fenômeno conhecido como consumo de luxo (ROSSETTO et al., 2010), que não tem nenhum efeito negativo conhecido para o crescimento das plantas. Para cana-de-açúcar além da produtividade é importante a qualidade da matéria prima para indústria. O potássio está diretamente relacionado com o teor de cinzas no caldo que pode ser prejudicial no processo de fabricação do açúcar, e por outro lado pode ser benéfico para a produção de álcool, onde as cinzas servem como nutriente para as leveduras. Já o potássio em excesso pode fazer com que a planta produza sacarato de potássio ao invés de sacarose, diminuindo a produção de açúcar total recuperável (ATR) por tonelada de cana (FREIRE; CORTEZ, 2000; RODRIGUES, 1995).

A aplicação por aspersão é o método mais comum utilizado pelas usinas, onde os autopropeidos ou o sistema de montagem direta são alimentados por canais ou por caminhões tanques. Novas tecnologias como pivô central (fixo e rebocável) e o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial (SIGS) já estão sendo empregados pelas usinas, porém os sistemas fixos devem ser considerados para aplicação de vinhaça caso a irrigação seja viável, onde a fertirrigação atuará como valor agregado ao sistema.

O SIGS é caracterizado por aplicar baixos volumes com alta frequência, irrigando o solo parcialmente, diferente dos outros sistemas que aplicam maior volume de água com menor frequência entre eventos de irrigação. O uso SIGS para aplicar a vinhaça demanda mais pesquisas para alcançar conhecimento suficiente para garantir um manejo adequado. Com esse sistema é possível aplicar vinhaça em qualquer estágio da cultura, pois não há o contato da vinhaça com as folhas, e também é possível o fracionamento do volume total ao longo da safra.

Esta pesquisa teve como objetivo principal estudar o efeito da aplicação de diferentes doses de vinhaça, baseada na norma técnica P4.231, via gotejamento subsuperficial no desenvolvimento e na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Objetivou-se complementarmente avaliar a produção de bioprodutos da cana-de-açúcar, as alterações no pH e condutividade elétrica do solo, e o efeito da vinhaça na uniformidade de distribuição do sistema de gotejamento. Dois ciclos, cana-planta e primeira soca, foram avaliados. O acompanhamento do pH e da condutividade elétrica do solo, o desenvolvimento vegetativo, a análise nutricional das folhas e o desempenho do sistema de irrigação foram avaliados no primeiro ciclo. A produção de biomassa, a produção de açúcar, a produção de etanol foram avaliados nos dois ciclos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Histórico do etanol da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar está estritamente atrelada a história do Brasil desde a sua colonização. Após a chegada de Pedro Álvares Cabral em 22 de abril de 1500 e posteriormente de Américo Vespúcio em 1501, onde em sua carta-relatório para coroa portuguesa dizia: “*Nessa costa não vimos coisa de proveito, exceto uma infinidade de árvores de pau-tinto*”, praticamente não houve interesse em iniciar a colonização, que veio ocorrer três décadas após o descobrimento pelo sistema de Capitanias Hereditárias. Em 1532 através do Capitão Donatário Martim Afonso de Souza, foi oficialmente introduzida a cultura da cana-de-açúcar no Brasil na cidade de São Vicente, São Paulo. Posteriormente, em 1535, a cana chegou a região nordeste na Capitania de Pernambuco através de Duarte Coelho e seu cunhado Jerônimo de Albuquerque, crescendo rapidamente a área plantada na região (FIGUEIREDO, 2010).

Até o ano de 1630 a produção e comercialização (exportação) do açúcar viveu um momento de apogeu em função de seu alto valor. Os séculos seguintes foram marcados por momentos de glória e declínio. No século XIX, por exemplo, com a incidência da gomose nos canaviais brasileiros, a produção europeia de açúcar de beterraba, o surgimento da cultura do café, foram fatores que levaram um forte declínio da cana-de-açúcar (FIGUEIREDO, 2010).

No início do século XX já havia pesquisas sobre o álcool combustível e em 1925 ocorreu o primeiro grande teste para o motor movido a álcool, onde foi percorrido um trecho de 430 km entre Rio de Janeiro e São Paulo (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2008). Em novembro do mesmo ano ocorreu a conferência “O álcool como combustível industrial no Brasil” na Escola Politécnica do Rio de Janeiro (NATALENETTO, 2007), considerada uma das primeiras manifestações de defesa do uso do combustível (TÁVORA, 2011).

A mistura do álcool na gasolina também data dos primórdios de seu uso como carburante. Em 1931 através do decreto nº 19.717 a mistura do álcool na gasolina importada na taxa de 5% tornou-se obrigatória. Dois anos mais tarde foi criado pelo Presidente Getúlio Vargas o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), que deu ao Estado o controle do mercado de açúcar através do uso de cotas de produção e controle sobre todas as etapas do processo de produção e comercialização (TÁVORA, 2011). Entre as medidas tomadas pelo IAA, a

mistura de 5% do álcool foi estendida para à gasolina nacional após a implantação da primeira refinaria nacional de petróleo. Na década seguinte com a segunda guerra mundial, onde após submarinos alemães atacarem navios mercantes brasileiros, o Brasil declarou guerra contra o Eixo Alemanha, Itália e Japão. Isso trouxe ao país uma impossibilidade de exportação de açúcar acarretando em aumento no volume armazenado, e ao mesmo tempo o petróleo começou a ser racionado, assim como seus subprodutos (UNICA, 2008). Mediante a essa situação mistura do álcool na gasolina passou de 5% para 42%.

Com o fim da segunda guerra mundial o Brasil passou a investir mais na procura por petróleo em território nacional deixando o álcool da cana-de-açúcar voltado mais para o uso farmacêutico e industrial (MENEZES, 1980). Em 1953 foi fundada a Petrobras que tinha o monopólio sobre a perfuração e refino do petróleo com distribuição na esfera privada. Ainda houve incentivo do governo para a produção de açúcar aumentando o número de registro de produtores de açúcar pelo IAA (UNICA, 2008). Mas a década de 1950 foi marcada por oscilações do preço internacional do açúcar atingindo a indústria canavieira que ainda apresentava baixa eficiência e atraso tecnológico (MARCOCCIA, 2007).

Com o objetivo de organizar a cadeia sucroalcooleira foi fundada Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool, a Copersucar, que era responsável pela comercialização desses produtos, cabendo aos produtores os cuidados da lavoura e da indústria. O setor vivia uma época de baixo preço e alta oferta de açúcar, e em 1960 o Brasil chegou a estocar 25% da produção total de açúcar e parte da lavoura não foi colhida. Com o embargo dos EUA para o açúcar cubano, ocorrido também em 1960, possibilitou a entrada do açúcar brasileiro no país como mais uma oportunidade de comercialização (UNICA, 2008; COPERSUCAR, 2006).

Na década seguinte os países do Oriente Médio elevaram o valor do barril de petróleo de US\$ 2,90 para US\$ 11,65 em poucos meses, por considerarem que o petróleo é um bem finito. Também ocorreu um embargo aos EUA e países europeus por apoiarem Israel na Guerra do *Yom Kippur* (Dia do Perdão). Esses fatos caracterizam a primeira crise mundial do petróleo em 1973. Coube ao Brasil, governado pelos militares, tomar medidas protecionistas e incentivar a produção de álcool carburante, tais como um sistema de proteção contra as importações, incentivo ao carro a álcool através do controle de preço favorável ao combustível e financiamento de pesquisas para melhorar a produtividade dos canaviais e a tecnologia dos motores (FLEXOR, 2007). Essas medidas fizeram parte do Programa Nacional do Álcool, o Pró-Álcool, lançado no ano de 1975.

Realmente a crise do petróleo causou um déficit na balança comercial brasileira, mas essa também foi agravada pela queda do preço do açúcar no mercado internacional. No início

da década de 70 os usineiros tiveram um incentivo do governo através do “Programa de Modernização da Agroindústria Canavieira” elevando a produção de açúcar de 5,4 para 11,4 milhões de toneladas por safra. Portanto o lançamento do Pró-Álcool não foi primordialmente feito para inovar na produção de uma fonte de energia, mas sim para suprir os produtores de açúcar e álcool que haviam entrado em crise devido ao baixo preço do açúcar no mercado internacional. O álcool combustível comercializado no mercado nacional veio para suprir o momento de dificuldade dos usineiros (RAMOS, 1999; OHASHI, 2008).

Quatro anos após o seu lançamento ocorreu um segundo choque do preço do barril de petróleo, novamente com elevações altíssima, o que culminou na segunda fase do Pró-Álcool a partir de 1980 com maior incentivo para produção de álcool hidratado para ser usado como combustível único. Nessa segunda fase as indústrias automobilísticas em acordo com o governo passaram a produzir somente carros a álcool com a meta de produzir 900 mil unidade de novos carros entre 1980 e 82, converter para álcool outros 276 mil carros, e atingir a produção de 10,7 bilhões de litros em 1985 (FLEXOR, 2007; TÁVORA, 2011). Nessa segunda fase do Pró-Álcool que se estendeu até 1986 ocorreu um aumento na produção de cana-de-açúcar atrelado principalmente a expansão da área cultivada e com pouca tecnologia (ROSSETTO, 2010a).

A terceira fase do Programa Nacional do Álcool foi de 1986 a 1990, marcado pelo declínio do programa. O primeiro ponto a ser considerado foi a quebra de safra ocorrida em 86/87 na região Centro-Sul devido a falta de chuva, que ocasionou uma queda na oferta de álcool hidratado no mercado (OHASHI, 2008). Entre 1986 e 1989 o preço do petróleo reduziu bruscamente, fato conhecido como “contra-choque do petróleo”, e também ocorreu um novo aumento no preço do açúcar no mercado internacional. Isso levou os usineiros a se concentrarem novamente na produção de açúcar, chegando a faltar álcool nas bombas dos postos no ano de 1989. Esse desestímulo a produção de álcool pelos usineiros e a desconfiança dos consumidores e montadoras de automóveis, além de uma época de crise econômica no Brasil, levou o fim do Pró-Álcool pelo governo. E em 1990, já no Governo Collor, foi extinto o IAA abrindo caminho para uma futura desregulamentação do setor.

Entre a década de 30 e o final da década de 80 e início da de 90, a história do setor sucroalcooleiro é marcado por uma total intervenção do Estado, regulando preços de insumos, controlando a produção através de cotas, aplicando medidas políticas de incentivo e de sustentação da cana-de-açúcar. Ao mesmo tempo, na década de 80 o país passava por um conturbado momento na política econômica, como a inflação batendo recorde atrás de recorde, planos econômica que não surgiam efeito (Cruzado, Besser, Verão). Essa crise

econômica impossibilitando a viabilidade de créditos subsidiados levou a procura de políticas alternativas tanto pelo como os grupos de interesse, direcionando para uma liberação de mercado. Em 1988 com a promulgação da Constituição Federal o Congresso passou a aprovar o Orçamento da União diminuindo o papel interventor do Estado na economia. Ocorria também a partir de 1990 com o Governo Collor um processo de abertura da economia brasileira (BARROS; MORAES, 2002).

A liberação do preço da cana-de-açúcar, do açúcar e do álcool começaram em 1996, mas somente em 1999 que o preço de todos os produtos foram liberados. Porém, não se pode dizer que foi uma desregulamentação plena. Ainda foram lançadas ou mantidas leis sobre a obrigatoriedade da mistura do álcool anidro à gasolina, variando sempre entre 20 e 25%. A gasolina também passou a ser sobre taxada para atender recursos públicos para financiamento da produção e estocagem do álcool (BACCARIN, 2011). Ao lançar medidas que interferem na demanda e na oferta de um produto, interferem também no seu preço. Portanto não podemos dizer que o mercado de açúcar e álcool são plenamente desregulamentados.

Outro fato importante dentro da história do setor sucroalcooleiro foi o lançamento da tecnologia *flex fuel*, em 2003. Tal tecnologia permitiu a mistura do álcool hidratado na gasolina em qualquer proporção. No ano de lançamento foram produzidos 1.736.987 carros do segmento leves (automóveis e comerciais leves), desse total 49.264 (2.83%) foram produzidos com a tecnologia *flex fuel*, e no terceiro ano de produção esse valor subiu para 1.391.636 unidades, representando 56,31% do total da produção de veículos do segmento leve. Em 2011 a produção já passava de 2 milhões de unidades representando 80,93% do total (ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA, 2012). A partir de 2009 os postos de combustível passaram a adotar a palavra etanol no lugar de álcool.

Entre o ano de 2003 e 2010 a área de cana-de-açúcar no Brasil aumentou consideravelmente, sendo que a área plantada passou de 5.377.216 ha para 9.164.607 ha. Em termos de produtividade, na safra de 2002/2003 foi colhida uma área de 5.371.020 ha e produzida 602.193.000 toneladas de cana, resultando em 59 t ha⁻¹. Na safra de 2009/2010 a área colhida foi de 9.076.855 ha e produzida 602.193.000 toneladas, resultando em 66 t ha⁻¹ (UNICADATA – dados elaborados pela UNICA a partir de informações do IBGE). Em relação aos produtos finais, foram produzidos 22.567.000 toneladas de açúcar e 12.623.000 m³ de etanol na safra de 2002/2003, passando para 32.956.000 toneladas de açúcar e 25.694.000 m³ de álcool na safra de 2009/2010 (UNICADATA). Nota-se que praticamente dobrou a produção de etanol em apenas 7 anos.

Para Walter et al. (2008) o consumo de etanol em 2030 poderá atingir entre 10 e 20% do valor gasolina consumida mundialmente. Para atender esse cenário a capacidade de produção de etanol deverá atingir pelo menos entre 275 e 570 milhões de m³, o que implica em um aumento entre 3 e 7 vezes a produção mundial atual. Nastari (2011) com base nos dados do Datagro cita que em 2020 a demanda por cana-de-açúcar atingirá 1,23 bilhão de toneladas, aproximadamente o dobro produzido atualmente, e no mix de produção de açúcar e etanol, 68,5% da cana processada seria destinada ao combustível.

Novas tecnologias sempre são necessárias para que o aumento da produção ocorra pela eficiência produtiva e não só pelo aumento de área plantada. Embora ainda não economicamente viável, a tecnologia para produção de etanol de segunda geração, o etanol celulósico, já existe. Tal tecnologia consiste em produzir o etanol a partir da biomassa, e não da sacarose contida no caldo da cana, ou a partir do amido de milho, por exemplo. Hoje já se houve falar da *Energycane*, que seria a cana-de-açúcar com baixo teor de sacarose e alto teor de fibra, para a produção de etanol celulósico.

O Brasil apresenta uma importante vantagem em relação a produção etanol de segunda geração. Não seriam necessárias somente novas usinas para produção única do combustível celulósico, mas sim integrar a tecnologia na indústria já existente. Sua produção pode compartilhar parte da infraestrutura instalada, como por exemplo, concentração, fermentação, destilação, armazenagem e sistema de cogeração. Outra vantagem é que a matéria prima (material celulósico – o bagaço) já se encontra disponível dentro da indústria (DIAS et al., 2011).

Comparando diferentes cenários de tecnologia para produção integrada de etanol de primeira e segunda geração com a produção de uma planta autônoma de etanol celulósico, Dias et al. (2011) mostraram que através da tecnologia presente para 2012 a produção integrada de etanol geraria 102 L de etanol total por tonelada de cana, contra 82 L de uma destilaria autônoma usando a tecnologia de primeira geração. Outros cenários que adotaram novas tecnologias e processos à produção atingiriam 116 L de etanol total por tonelada de cana, contra 35 L em uma destilaria autônoma com tecnologia somente de segunda geração.

Com o advento da tecnologia para produção de etanol celulósico o Brasil teria condições de aumentar a produtividade de etanol entre 20 e 40%, em outras palavras, a produção aumentaria mantendo a mesma área cultivada, o que do ponto de vista ambiental também é um excelente resultado. A produção de etanol de segunda geração é uma importante e real alternativa para atender a demanda crescente de etanol nos próximos anos.

2.1.2 Resíduos (Subprodutos) da agroindústria sucroenergética

2.1.2.1 Bagaço da cana-de-açúcar

Atualmente, além das questões econômicas na agricultura estão ligadas as questões ambientais e sociais, diferentemente do que ocorreu no passado (década de 70, *e. g.*) onde as atividades agrícolas estiveram mais ligadas as questões econômicas, sem preocupações ambientais e trabalhistas, com reflexos até os dias atuais (ROSSETTO, 2004, 2010a). Quando se fala em combustível limpo, ou renovável, ou sustentável, não necessariamente pode-se dizer que apenas o seu uso final trará melhores resultados para o ambiente, também é necessário que o seu processo de produção seja sustentável.

Dentro do processo de produção da indústria canavieira pode-se destacar o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça. Esses três resíduos apresentam alto valor agregado podendo ser considerados subprodutos que são reutilizados no próprio processo produtivo (ROSSETTO, 2010b). A reutilização de resíduos é um importante ponto em um relatório de sustentabilidade, e a adequada gestão pode trazer melhorias para imagem de uma empresa ou de um produto (ROSSETTO, 2010a; SPADOTTO, 2008).

No o processo de moagem é separado o caldo de cana-de-açúcar do bagaço. Em média a cada tonelada processada, é gerado 250 kg de bagaço (50% de umidade). Logo após esse processo o bagaço é transportado por esteiras até as caldeiras para produção de vapor que acionará turbinas para a produção de energia elétrica, a bioeletricidade (UNICA, 2011). Hoje as usinas de cana-de-açúcar são autosuficientes energeticamente e ainda apresentam um excedente em torno de 3.400 MW para serem comercializados atendendo outros setores (ROSSETTO, 2010a).

Aumentando-se a eficiência do sistema de cogeração de energia e otimizando o processo de produção de etanol acarretará num excedente de bagaço dentro da indústria. Esse excedente pode ser utilizado para a produção de etanol de segunda geração ou outros bioprodutos (DIAS et al., 2009; BUDDADEE et al., 2008; ENSINAS et al., 2007). Outra alternativa para um excedente de bagaço é trazer para indústria a palhada da cana-de-açúcar para cogeração de energia elétrica (DIAS et al., 2012).

O Protocolo Agroambiental assinado pelo setor sucroenergético e o Governo do Estado de São Paulo promove a antecipação do prazo final da queima da palha da cana para 2017. A

colheita da cana crua (sem queima) gera um aumento significativo de palhiço¹ disponível para geração de energia elétrica (RIPOLI; RIPOLI, 2010). O resíduo remanescente no campo após a colheita também tem importância agrônômica como diminuir a erosão do solo, diminuir o crescimento de plantas daninhas, manter a umidade do solo e reciclagem de nutrientes. Porém alguns autores citam que levar até 50% do palhiço para indústria é viável (DIAS et al., 2009, 2011, 2012; WALTER; ENSINAS, 2010; HASSUANI et al., 2005).

A geração de energia através da queima do bagaço é de baixa emissão de gases na atmosfera, sendo que com 24 projetos de cogeração aprovados em 2006, estima-se que serão evitados 450.000 toneladas de carbono lançadas na atmosfera, podendo ser comercializado no mercado de carbono (ROSSETTO, 2010a; ZVEIBIL, 2006).

2.1.2.2 Vinhaça

A vinhaça é considerada um resíduo sólido por se enquadrar na definição da Norma Brasileira NBR 10.004 da ABNT (1987), por faltar um tratamento convencional adequado. A NBR 10.004 classifica os resíduos em três diferentes classes, tais como: resíduo classe I – perigoso; resíduo classe II – não-inertes; e resíduo classe III – inertes. Segundo a Copersucar (1994) a vinhaça se enquadra no resíduo classe II devido suas características físico-químicas e na adequação do sistema de aplicação da vinhaça ao solo que são considerados seguros em relação à contaminação ambiental e à saúde pública (FREIRE; CORTEZ, 2000). No entanto, caso não considerado o manejo racional da vinhaça, esse resíduo apresenta alto poder poluidor devido à alta carga de matéria orgânica podendo ser nocivo a microflora e microfauna (SILVA, 2007).

A composição química da vinhaça (Tabela 1) depende de vários fatores como: natureza e composição da matéria prima, sistema de fermentação alcoólica, raça de levedura, entre outros. Dependendo da sua composição química e do solo onde será aplicada, a vinhaça poderá substituir parcial ou totalmente a adubação química da cana-de-açúcar (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984). A vinhaça apresenta quantidades de potássio (K_2O) variando de 1,2 a 7,83 kg m⁻³, dependendo do tipo de mosto (melaço, caldo ou misto) (PRADA et al., 1998). Portanto, aplicando uma dose de 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça, corresponde a uma aplicação

¹ Palhiço é quantidade de palhada (folhas e ponteiros com teor de umidade menor que 15%) somada aos colmo e frações de colmos remanescentes na área após a colheita, além de plantas daninhas e partículas de terra agregadas a todos estes componentes (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

de K_2O entre 120 a 783 kg ha⁻¹, que podem ser superiores aos valores convencionais de adubação potássica na cana-de-açúcar.

Tabela 1 – Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (PRADA et al., 1998)

Elementos	Vinhaça de mosto		
	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
N (MG L ⁻¹ N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
K ₂ O (mg L ⁻¹)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
CaO (mg L ⁻¹)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
MgO (mg L ⁻¹)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
SO ₄ (mg L ⁻¹)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
C (MG L ⁻¹)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Subst. redutoras (mg L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

Paulinio et al. (2002) estudando diferentes doses de vinhaça na produção agrícola e industrial da cana-de-açúcar, mostraram que doses intermediárias entre 300 e 400 m³ ha⁻¹ resultaram em melhores produções, e que doses superiores a essa houve queda na produção agrícola e industrial, além de aumentar os custos de produção. Medina et al. (2002), também em um estudo de doses, mostraram que as doses intermediárias, entre 300 e 400 m³ ha⁻¹, foram as que obtiveram melhores resultados.

Leite (1999) estudando aspectos econômicos da adubação mineral e adubação com vinhaça mostrou que o custo por hectare com adubação com vinhaça foi maior do que o com adubação mineral, enquanto que o custo por tonelada de cana foi maior quando adubado com adubo mineral, devido ao aumento da produtividade ocasionado pela aplicação de vinhaça.

Em relação às mudanças das características do solo, a vinhaça promove alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas, que, quando benéficas, causam aumentos de fertilidade, de porosidade e de retenção de água, contribuindo para melhor desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984). Por outro lado, além da resposta da cana-de-açúcar a doses de vinhaça, é importante dar atenção aos impactos ambientais que podem ocorrer com aplicação de doses elevadas, ou também devido à aplicação contínua da vinhaça nos solos, podendo causar salinização ou contaminação do lençol freático. Há trabalhos científicos dedicados ao estudo dos efeitos da vinhaça como

fertilizante, porém poucos relacionados à investigação dos efeitos do resíduo sobre a qualidade das águas subterrâneas (CORAZZA, 2006).

As quantidades de vinhaça a serem aplicadas no solo como fertilizantes foram inicialmente normatizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em 1986 onde a dose máxima era limitada a 400 kg ha^{-1} de K_2O por ano. Nesse ano também foi proibida a utilização de área sacrifício (SANTOS, 2000), na qual grandes volumes de vinhaça eram descartadas.

A norma de 1986 não levava em consideração tipo de solo, tais como suas características físicas, químicas e biológicas, não levando em consideração a capacidade dos solos receberem a dosagem máxima permitida (SANTOS, 2000). Essa proposta de 1986 teve um impacto ambiental positivo na época, porém muitos aspectos inerentes ao uso e aplicação da vinhaça demonstram-se ineficazes, o que levou a novas modificações para seu manejo (KLEIN et al., 2009).

Em 2005, a CETESB lançou a Norma Técnica P4.231 que teve como objetivo dispor sobre os critérios e procedimentos da aplicação e armazenamento da vinhaça (CETESB, 2005). Entre diversos itens da norma, existe o que trata do cálculo da dosagem máxima permitida para ser aplicada ao solo. Esse cálculo leva consideração as características do solo como a capacidade de troca catiônica e a quantidade de potássio no solo, a quantidade de extração de potássio pela cana-de-açúcar por corte, e o teor de potássio presente na vinhaça.

Com a norma técnica P4.231/95 muitas áreas se tornarão mais restritas ao recebimento de vinhaça, sendo necessário seu transporte para áreas mais distantes o que implica em maiores custos. Um das soluções em estudo trata da vinhaça concentrada (ROSSETTO, 2010), o que implica em novas tecnologias de aplicação e investimento na parte industrial para sua concentração deve ser levado em consideração. Atualmente a aplicação de vinhaça via fertirrigação tem se mostrado a maneira mais econômica além de melhorar a fertilidade do solo e a produtividade de cana-de-açúcar.

2.1.3 Irrigação e fertirrigação da cana-de-açúcar

O consumo diário de água pela cana-de-açúcar varia entre 2 e 6 mm dia^{-1} , considerando diferentes regiões produtoras do país, variedade, estágio de desenvolvimento da cultura e demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial) (BERNARDO, 2006). O mesmo autor cita também, que para o cultivo irrigado de cana-de-açúcar é importante definir os estádios fenológicos a fim de otimizar a eficiência de aplicação

da irrigação, sendo eles: germinação e emergência; perfilhamento e estabelecimento da cultura; desenvolvimento da cultura; e maturação.

A cana-de-açúcar no Brasil é na maior parte cultivada em condições de sequeiro, sendo a irrigação mais presente em grandes propriedades ou usinas mais tecnificadas (DALRI et al., 2008), já para pequenas e médias lavouras a irrigação se torna pouco atrativa e inviável economicamente, devido a alto custo de implantação para o pequeno ganho de produtividade em relação ao sequeiro, variando de 10 a 20% (COELHO et al., 2009).

Os benefícios da irrigação podem ser considerados como diretos e indiretos (MATIOLI et al., 1996 apud DALRI et al., 2008) sendo o ganho de produtividade e longevidade das soqueiras como benefícios diretos, e a redução de custos no processo produtivo agrícola como benefícios indiretos. Isso tudo engloba toda a economicidade e praticidade que se pode ter com os sistemas de irrigação, principalmente pela fertirrigação, onde existe a possibilidade de se fracionar e aumentar a eficiência da adubação ao longo do ciclo da cultura, além de diminuir o tráfego de máquinas e mão-de-obra.

A irrigação por gotejamento enterrado se caracteriza pela aplicação localizada de água diretamente na zona radicular da cultura, apresentando elevado potencial de utilização devido à eficiência no uso da água (PHENE, 2005, apud BARBOSA et al., 2009). Na produção de cana-de-açúcar o gotejamento enterrado é uma prática recente e a técnica tem elevado custo inicial de implantação e há escassez de informações, tanto do manejo técnico do sistema de irrigação quanto ao do retorno econômico (BARBOSA et al., 2009).

A adoção de um sistema de irrigação localizada é um grande salto tecnológico para uma propriedade agrícola e as adaptações necessárias no sistema de produção exigem um elevado grau de conhecimento e informações. Um ponto importante a ser considerado é o caso do manejo da fertirrigação, onde a intensa aplicação de nutrientes numa pequena área de solo provoca movimentação intensa dos íons no perfil do solo resultando em forte acidificação, inclusive nas camadas mais profundas.

Em um experimento com cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, Dalri et al. (2008) estudaram três frequências de irrigação, 10, 20 e 30 mm de evapotranspiração acumulada, e mostraram um aumento de produtividade de 47,33%, 58,53% e 39,86%, respectivamente, em relação ao sequeiro, porém em relação a qualidade tecnológica não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. Carvalho et al. (2009) avaliaram a produção de colmos e os rendimentos de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica, e observaram que a irrigação e a adubação influenciaram significativamente a

produção de colmos e nos rendimentos de açúcar e álcool, porém sempre em relação ao tratamento de sequeiro.

Kwong et al. (1999) estudando meios de se reduzir a adubação nitrogenada na cana-de-açúcar, mostrou que com a fertirrigação foi possível diminuir em aproximadamente 30% da adubação nitrogenada em relação ao de sequeiro (120 kg ha^{-1} de N). Dalri e Cruz (2008) mostraram que com a fertirrigação de N e K, obteve-se um incremento de 43,5% e 67,2% para soca e ressoca, respectivamente, em relação à cana-de-açúcar de sequeiro, e um incremento de 38,4% e 72,9% de açúcar total recuperável (ATR), para soca e ressoca, respectivamente, também em relação à cana-de-açúcar de sequeiro.

2.1.4 Estresse hídrico

O estresse é definido por Larcher (2000) como um desvio significativo das condições ótimas para a vida, e induz mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo, os quais são reversíveis a princípio, mas podem tornar permanentes. Para Taiz e Zeiger (2002), o estresse é um fator externo que exerce uma influência na planta.

O déficit hídrico é definido como um conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação. O estresse hídrico interfere em diversos fatores na planta, como a inibição da fotossíntese no cloroplasto. Boyer (1970) mostra o efeito do estresse hídrico sobre o girassol, como diminuição na expansão foliar e a inibição da fotossíntese sob moderados níveis de estresse, no caso isso ocorreu já com potencial de água na folha de $-0,4\text{MPa}$ e $-0,8\text{MPa}$ para expansão foliar e inibição da fotossíntese, respectivamente. Entre outros fatores que o estresse hídrico causa as plantas estão: diminuição da área foliar, abscisão foliar (síntese de etileno), acentuado crescimento da raiz e fechamento estomático (ácido abscísico).

Laclau; Laclau (2009) mostraram que a irrigação teve bastante influência na distribuição de raízes de cana-de-açúcar, sendo que no momento da colheita a cultura em condição de sequeiro apresentou uma distribuição de raízes até 1 m de profundidade, 49 % superior em relação à cultura irrigada, já a máxima profundidade que o sistema radicular alcançou foi pouco influenciada pela irrigação, o que sugere um forte controle genético.

Com intuito de prover informações que auxiliem melhoristas na adoção de características para selecionar variedades tolerantes à seca, Silva et al. (2008) avaliaram em 80 genótipos as relações entre os caracteres número de colmos, altura de colmos, diâmetro de colmos e massa de colmos com a produtividade de cana-de-açúcar cultivada em

uma área, sob deficiência moderada de água, durante o período de maior desenvolvimento. Os autores concluíram que é possível selecionar genótipos de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico moderado, com maior produtividade associada com maior número, altura e massa de colmos, podendo tornar o processo de melhoramento mais rápido e barato.

Considerando três fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, crescimento inicial, crescimento máximo, e a fase de acúmulo de sacarose no colmo, Machado et al. (2009) estudaram o efeito do estresse hídrico nessas três distintas fases em dois genótipos, IACSP 94-2094 e IACSP 96-2042. Os resultados mostraram que os genótipos responderam de maneira diferente ao déficit hídrico, sendo o IACSP 94-2096, tolerante a seca, manteve a produção de fitomassa mesmo com redução das trocas gasosas, e o IACSP 96-2042 com déficit hídrico na fase de crescimento inicial teve a produção de fitomassa e de sólidos solúveis reduzidos devido à menor condutância estomática e menor eficiência aparente de carboxilação da fotossíntese.

Alberter e Thornber (1976) estudaram o efeito do estresse hídrico no conteúdo e organização da clorofila no mesófilo em plantas de milho, sendo as plantas com 55 dias de idade foram submetidas a oito dias de estresse e posteriormente voltaram a ser irrigadas. Os resultados mostram que as plantas testemunhas (sem corte de irrigação), tiveram um incremento de 30% no teor de clorofila. Já as plantas sem irrigação apresentaram uma lenta diminuição em seis dias, até atingirem potencial de água na folha de -1,6MPa, posteriormente uma queda mais significativa ocorreu nos outros dois dias. Com a volta da irrigação elas recuperaram seu teor inicial de clorofila em três dias, porém não atingiram o mesmo teor das plantas controle.

Outro indicador de estresse hídrico é a temperatura foliar, pelo fato de que a água transpirada resfria a folha. Portanto, conforme o teor de água no solo diminui, a transpiração diminui e a temperatura das folhas aumenta, ficando mais alta que a temperatura do ar, devido à maior absorção da radiação (FOLEGATTI, 1988; FOLEGATTI et al., 1990).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Areão (22°43'' de latitude sul e 47°38'' de longitude oeste com uma altitude de 511m) na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP, situada em Piracicaba-SP (Figura 1). O clima da região é do tipo Cwa no sistema Koppen, denominado subtropical úmido, com estiagem no inverno, temperatura média no mês mais frio de 18°C e no mês mais quente de 22°C, temperatura média anual de 21,4°C e pluviosidade anual de 1257 mm. O solo é do tipo Nitossolo Vermelho eutrófico segundo a classificação brasileira de solos da EMBRAPA (2006). Para caracterização das características químicas e físicas do solo da área experimental foram realizadas amostragens em quatro profundidades 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m. Os resultados podem ser observados na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

A área consta com uma estação meteorológica localizada próxima as parcelas experimentais com sensores de radiação global, radiação líquida, velocidade de vento, temperatura e umidade relativa do ar. Com os dados obtidos estimam-se a evapotranspiração de referência seguindo o método de Penman-Monteith parametrizado por Allen et al. (1998).

Figura 1 – Imagem da área retirada do Google Earth®

Tabela 2 – Resultados da análise química do solo da área experimental, Piracicaba, SP, 2010

Profundidade	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V
Cm	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³							%
00-20	8	27	5,0	2,5	30	15	39	1	48	86	55
20-40	5	20	5,2	1,7	28	14	33	0	43	77	57
40-60	5	13	5,5	0,6	22	14	25	0	37	62	60
60-80	5,7	9	4,2	0,2	17	12	23	0	35	58	62

Tabela 3 – Resultados da análise química do solo da área experimental (continuação)

Profundidade	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Cm	mg dm ⁻³					
00-20	16	0	2	15	92	3
20-40	28	0	2	11	53	1
40-60	79	0	1	6	9	0
60-80	80	0	1	4	5	0

Tabela 4 – Análise física do solo da área experimental, Piracicaba, SP, 2010

Profundidade	Argila	Silte	Areia	Densidade do solo
Cm	g cm ⁻³			
00-20	44,73	26,35	28,92	1,29
20-40	55,85	23,53	20,62	1,49
40-60	65,41	13,67	20,92	1,36
60-80	65,91	12,54	21,55	1,40

3.2 Delineamento estatístico e tratamentos (definição e aplicação)

Foi adotado o delineamento estatístico inteiramente casualizado com 6 tratamentos e 4 repetições (Tabela 5 e Figura 2). O tratamento 1 foi conduzido no sistema de sequeiro com adubação química junto ao plantio. Os tratamentos 2, 3, 4, 5 e 6 foram conduzidos no sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, onde o tratamento 2 foi fertirrigado apenas com adubação química e os outros apenas com vinhaça.

Tabela 5 – Esquema da análise de variância

Causa da variação	Grau de liberdade
Tratamentos	5
Resíduos	18
Total	23

2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T3R1	T6R1	T1R2	T3R3	T5R1	T1R3	T6R2	T2R2	T2R23	T4R3	T6R3	T6R4
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
T1R1	T3R2	T2R1	T4R1	T4R2	T5R2	T3R1	T5R3	T1R4	T5R4	T4R4	T2R4

Figura 2 – Distribuição dos tratamentos. T – tratamento; R – repetição

As adubações dos tratamentos 1 e 2 foram realizadas seguindo a recomendação de Raij et al. (2006) com base na fertilidade do solo e produtividade esperada (superior a 100 t ha^{-1}), resultando em 40 kg ha^{-1} de N, 170 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 110 kg ha^{-1} de K_2O , aplicados na forma de uréia, MAP e cloreto de potássio, respectivamente. O tratamento 1 recebeu toda a adubação junto ao plantio, e o tratamento 2 recebeu 50% da adubação fosfórica no plantio e o restante parcelado em 10 aplicações onde a quantidade por aplicação seguiu a curva de extração de nutrientes sugerida por Malavolta (1994) (Tabela 6).

Os tratamentos de 3 a 6 receberam diferentes doses de vinhaça, sendo a dose do tratamento 4 (D_{CETESB}) calculada segundo a norma técnica P4.231/2005 da CETESB (Equação 1), e os tratamentos 3, 5 e 6 receberam $\frac{1}{2} D_{\text{CETESB}}$, $2xD_{\text{CETESB}}$ e $3xD_{\text{CETESB}}$, respectivamente. A única adubação química recebida por esses tratamentos foi de 50% da adubação fosfórica junto ao plantio.

Para o ciclo cana primeira soca as adubações dos tratamentos 1 e 2 foram $120, 30$ e 120 kg ha^{-1} de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente. Os tratamentos de 3 a 6 receberam a mesma quantidade de vinhaça do primeiro ano. Na Tabela 7 estão apresentadas as quantidades de vinhaça e fertilizantes recebidos em cada tratamento.

$$VV = \frac{(0,05CTC - K_s)3744 + 185}{K_{vi}} \quad (1)$$

Onde, VV = volume de vinhaça a ser aplicado;

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc dm^{-3} a pH 7,0, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia do Instituto Agronômico de Campinas de Análise de Solo, devidamente assinado por responsável técnico;

K_s = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm^{-3} , à profundidade de 0,80 m, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de Análise de Solo do Instituto Agronômico de Campinas, devidamente assinado por responsável técnico;

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc dm^{-3} ou meq 100 cm^{-3} , para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 m de profundidade;

185 = kg de K_2O extraído pela cultura por ha, por corte;

K_{vi} = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $K_2O \text{ m}^{-3}$, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico.

Tabela 6 – Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar (ciclo cana planta de 12 meses)

Dias após o Plantio	Nutrientes ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)		
	N	P_2O_5	K_2O
1-30 Dias	1.2	0.1	0.2
31-80 Dias	1.5	0.4	0.24
81-110 Dias	2	1	0.4
111-150 Dias	0.75	0.3	0.75
151-190 Dias	--	--	1.5

Fonte: Malavolta (1994)

Tabela 7 – Quantidade de fertilizante e vinhaça por tratamento

Treatmento	Vinhaça $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	N kg ha^{-1}	P_2O_5 kg ha^{-1}	K_2O kg ha^{-1}
T1. SI + AQ	0	40* (120)	170* (30)	110* (120)
T2. Fertirrigado c/ AQ	0	40	170** (120)	110 (120)
T3. $\frac{1}{2} D_{\text{CETESB}}$	164	0	85***	0
T4. D_{CETESB}	328	0	85***	0
T5. $2x D_{\text{CETESB}}$	656	0	85***	0
T6. $3x D_{\text{CETESB}}$	984	0	85***	0

SI – sem irrigação; AQ – adubação química

* 100% aplicado no plantio

** 50% aplicado no plantio e 50% via fertirrigação

*** aplicado no plantio

() – adubação da primeira soca

A vinhaça é geralmente aplicada mais frequentemente em áreas próximas às usinas, principalmente devido aos custos de transporte e com o passar dos anos torna-se necessário aplicar a vinhaça em áreas mais distantes. O tratamento 3, $\frac{1}{2} D_{\text{CETESB}}$ foi selecionada para verificar se a cana-de-açúcar responde positivamente quando comparada a adubação química (tratamento 2). Os tratamentos 5 e 6 foram selecionados para verificar se a cana-de-açúcar responde negativamente a altas doses, superiores a D_{CETESB} , situação que representaria a aplicação excessiva em áreas mais próximas a usina. Paralelamente a esse experimento outra pesquisa foi conduzida na mesma área para avaliar a dinâmica dos constituintes da vinhaça no perfil do solo (LELIS NETO, 2012).

As doses dos tratamentos de 3 a 6 foram divididas em 10 aplicações no primeiro ciclo e 8 no segundo, as quais ocorreram entre os dias 04 de julho e 21 de novembro de 2010 e entre os dias 01 de maio de 2011 e 01 de setembro de 2011, com um intervalo entre 10 e 15 dia. As aplicações desses tratamentos ocorreram no mesmo dia da aplicação do tratamento 2, conforme o procedimento a seguir: a) todas as parcelas com registro aberto; b) pressurização do sistema com água da irrigação; c) fechamento do tratamento 2; d) desligamento do sistema de irrigação e início da aplicação da vinhaça (tratamento de 3 a 6 abertos; e) fechamento do tratamento 3; f) fechamento do tratamento 4; g) fechamento do tratamento 5; h) final da aplicação de vinhaça quando atingido o volume calculado no tratamento 6; i) limpeza do sistema de irrigação (tratamento 2 fechado, 3, 4, 5 e 6 abertos); j) fechamento dos tratamentos de 3 a 6 e abertura do tratamento 2; k) aplicação do tratamento 2; l) limpeza do sistema de irrigação.

A estrutura para fazer a fertirrigação foi composta de três caixas d'água, sendo duas para a aplicação de vinhaça e uma para a fertirrigação convencional, uma bomba centrífuga de 1,5 cv, 1 filtro de disco de 125 mesh e uma válvula de retenção de segurança. Na caixa d'água da vinhaça foi montado um sistema de agitação com objetivo de evitar a deposição da matéria orgânica da vinhaça. Nas Figura 3A e Figura 3B é possível ver o momento do recebimento da vinhaça e a estrutura montada para aplicação dos tratamentos, respectivamente. No dia da aplicação uma amostra de vinhaça era coletada para análise de pH, condutividade elétrica (CE), potássio, cálcio, sódio, nitrato e enxofre (Tabela 8).

Figura 3 – Momento de recebimento da vinhaça (A); Estrutura para armazenamento e aplicação da vinhaça e da fertirrigação

Tabela 8 – Características da vinhaça utilizada no experimento, Piracicaba, SP, 2011

Ciclo da Cana-de-açúcar	pH	CE dS m ⁻¹	Potássio	Cálcio	Sódio	Nitrato	Enxofre
					mg L ⁻¹		
Cana planta	4,607	8,267	3195,2	522,8	58,6	425,991	890,376
Primeira soca	4,660	8,910	2956,2	468,75	53,86	111,450	918,340

3.3 Preparo da área

No dia 6 de janeiro de 2010 procedeu-se uma subsolagem e gradagem para o preparo do solo (Figura 4A). Antes do plantio do experimento foi semeado a lanço no dia 11 de janeiro de 2010, a *Crotalaria juncea* com uma densidade variando entre 55 a 60 sementes por m². Essa leguminosa foi escolhida por possuir características como crescimento rápido e vigoroso, apresentando bom controle de ervas daninhas e, também boa produção de massa verde (Figura 4B) e fixação de nitrogênio, sendo também má hospedeira de nematóides, contribuindo para a diminuição da população destes. No dia 18 de março de 2010 foi realizada incorporação da *C. juncea* (Figura 4C e Figura 4D) a fim de aproveitá-la como adubação verde e preparar o solo para o plantio da cana-de-açúcar.

Figura 4 – Preparo do solo (A); Massa verde formada pela crotalária (B); Incorporação da crotalária (C) e (D)

3.4 Plantio da cana-de-açúcar e instalação do sistema de irrigação

Para cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial normalmente é utilizado o espaçamento combinado, também conhecido como plantio “abacaxi”, onde o tubo gotejador fica posicionado entre duas linhas de cana-de-açúcar (Figura 6). O enterrio dos tubos gotejadores ocorre junto ao processo de sulcagem para o plantio com auxílio de um implemento acoplado ao sulcador.

Esse procedimento (sulcagem + enterrio) foi realizado neste experimento através de um sulcador de duas linhas e o implemento de enterrio dos tubos fornecido pela empresa John Deere Water. Inicialmente foi necessário fazer testes e ajustes na montagem do conjunto para garantir qualidade na operação. A primeira etapa consistiu no ajuste do espaçamento entre os sulcadores onde foi possível aproximá-los a uma distância mínima de 0,5 m. Posteriormente testou-se o implemento de enterrio acoplado na mesma barra do sulcador, resultando em um espaço livre reduzido impedindo do solo passar e cobrir adequadamente o gotejador, além da diferença de altura entre o implemento e o sulcador. Com auxílio de barras de ferro foi possível acoplar o implemento de enterrio a frente do sulcador resolvendo o problema da cobertura do gotejador (Figura 5A a Figura 5D). Nas Figura 5E e Figura 5F é possível observar os sulcos abertos já com o tubo gotejador enterrado.

Figura 5 - Etapas dos ajustes do conjunto (A), (B) e (C); conjunto operando na área de testes (D); solo sulcado com o gotejador já enterrado (E) e (F)

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado no dia 23 de abril de 2010 adotando-se o sistema de plantio combinado de 1,5 m (0,5 m) onde o tubo gotejador foi enterrado à profundidade de 0,3 m (Figura 7A e Figura 7B)

Figura 6 – Esquema do espaçamento combinado de 1,5 m (0,5 m)

Figura 7 – Início do processo de sulcagem (A); gotejador enterrado a 0,3 m (B)

As mudas inteiras foram levadas ao campo e distribuídas uniformemente no sulco efetuando-se a transposição das canas, os chamados “pé com ponta”, ou seja, os toletes foram dispostos sempre cruzando a ponta do colmo anterior com a parte inferior do seguinte. Após a distribuição, os colmos foram cortados no sulco com o auxílio de um facão, deixando-se sempre de 3 a 4 gemas em cada tolete. A densidade do plantio ficou em torno de 15 gemas por metro de sulco. Logo após o corte dos colmos, os toletes foram cobertos manualmente com uma camada de terra de 7 cm (Figura 8A, Figura 8B, Figura 8C e Figura 8D).

Figura 8 – Preparo das mudas e etapas do plantio da cana-de-açúcar

A área experimental já constava com estrutura de bombeamento e filtração através de filtros de areia que foi utilizada para a irrigação do experimento. Sendo necessário distribuir a linha principal, as linhas de derivações e suas conexões com as linhas laterais previamente instaladas (Figura 9A, Figura 9B, Figura 9C e Figura 9D). O gotejador escolhido foi o Hydrolite (John Deere Water) com uma vazão de 1 L h^{-1} espaçados a 0,45 m operados à pressão de serviço de 100 kPa.

Figura 9 – Etapas da montagem do sistema de irrigação

3.5 Variedade

A variedade escolhida foi a CTC 12 do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), que apresenta hábito de crescimento ereto, com despalha fácil; internódios de comprimento curto a médio, tumescentes, com zigue-zague suave; gemas triangulares; folhas eretas, de tonalidade intermediária a escura e aurículas assimétricas; palmito de comprimento curto. Recomendada para ambientes de médio a alto potencial e colheita no início da safra. Nas Tabela 9 a Tabela 11 e nas Figuras 10A e 10B estão apresentadas as características da variedade.

Tabela 9 – Características da variedade CTC 12

Produtividade cana planta	Alta
Produvidade cana soca	Média
Exigência em fertilidade do solo	Média/alta
Brotação de soqueira	Boa
Perfilhamento	Bom
Fechamento nas entrelinhas	Médio
Tombamento	Ausente
Florescimento	Ausente
Isoporização	Ausente
Teor máximo pol	Muito alto
Maturação	Precoce
Teor fibra % cana	Baixo
Sensibilidade a herbicidas	Não

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

Tabela 10 – Reação a pragas e doenças da variedade CTC 12

Ferrugem	Resistente
Carvão	Resistente
Escaldadura	Resistente
Mosaico	Resistente
Amarelecimento	Não
Reação à broca dos colmos	Intermediária

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

Tabela 11 – Resultados da CTC 12 obtidos no final de 2002 (5 cortes, 27 locais e 50 ensaios) em comparação com outras variedades

Variedade	Fibra	Pol	TCH	MC
SP80-1842	11,9	15,7	79	456
SP81-3250	11,2	15,6	83	486
CTC12	10,3	16,8	77	513

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

Figura 10 – Produtividade em 5 cortes para as variedades CTC 12 e SP80-1842 (A); Pol% das variedades CTC12, SP80-1842 e SP81-3250, média de 2 cortes (B)

3.6 Características das parcelas experimentais e instalação dos tensiômetros, extratores de solução e tubos de acesso da sonda diviner 2000

Em cada parcela experimental foram plantadas cinco linhas duplas de cana-de-açúcar com 6 metros de comprimento resultando em uma área total de 60 m². Considerou-se como bordadura da parcela a primeira e a quinta linha dupla e o primeiro e último metro, resultando em 24 m² de área útil onde foram instalados os tensiômetros e extratores de solução nas profundidades de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m, e os tubos de acesso na profundidade de 0,8 m.

Na Figura 11 está apresentado o desenho esquemático das parcelas experimentais com o posicionamento de cada equipamento. Nota-se que os tensiômetros e extratores foram instalados de maneira equidistante (0,15 m) de um gotejador. Na Figura 12A e Figura 12B estão apresentadas as etapas de instalação dos tensiômetros e extratores.

Figura 11 – Esquema da parcela experimental com o posicionamento dos extratores de solução, dos tensiômetros e dos tubos de acesso para sonda Diviner 2000; Esquema dos tensiômetros e extratores de solução instalados de maneira equidistante de um gotejador

Figura 12 – Etapas da instalação dos tensiômetros e extratores de solução

3.7 Manejo da irrigação

Foram utilizadas as mesas de tensão de 0; 10, 20 e 40 cm de coluna d'água, e também a câmara de Richard para as tensões de 100, 330, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 15.000 cm de coluna d'água para determinação da curva de retenção de água no solo. Os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (Tabela 12) que descrevem as curvas de retenção de água no solo, foram obtidos a partir do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

A irrigação foi realizada com um intervalo médio de 3 dias, para garantir que o solo alcançasse a capacidade de campo e não atingisse umidade inferior a umidade crítica. As leituras dos tensiômetros foram realizadas a cada 3 dias. A Figura 13A e Figura 13B mostram os métodos instalados e utilizados para o manejo da irrigação no experimento.

Tabela 12 – Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e parâmetros (α , m e n) do modelo de Van Genuchten (1980) do solo, Piracicaba, SP, 2010

Camada (m)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	m	n
0,00-0,20	0,53	0,21	0,31	0,27	1,37
0,20-0,40	0,48	0,24	0,38	0,44	1,79
0,40-0,60	0,52	0,30	0,30	0,20	1,25
0,60-0,80	0,53	0,30	0,09	0,27	1,37

Figura 13 – Manejo da irrigação utilizando o tensiômetro (A), e manejo utilizando a sonda Diviner 2000 (B)

Os dados climáticos coletados pela estação meteorológica, tais como radiação global, radiação líquida, velocidade do vento, temperatura, umidade relativa precipitação e fluxo de

calor no solo foram utilizados para calcular a evapotranspiração de referência (ET_0) através da equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (Eq. 2). A evapotranspiração de cultura (ET_c) foi calculada através da multiplicação da ET_0 pelo coeficiente de cultura ($K_{cb} + K_e$) e ajustado pelo coeficiente de estresse hídrico resultando na (Eq. 3). Os procedimentos utilizados para os cálculos da evapotranspiração podem ser encontrados detalhadamente no anexo 8 em Allen et al. (1998)

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (2)$$

Onde, Δ é a declividade da curva de pressão de vapor na saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é a radiação líquida ou saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T é a temperatura média diária à 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento à 2 m de altura (m s^{-1}), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa).

$$ET_{c_{aj}} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (3)$$

Onde $ET_{c_{aj}}$ é a evapotranspiração de cultura ajustada, K_s é o coeficiente de estresse hídrico, K_{cb} é o coeficiente de cultura basal e K_e é o coeficiente de evaporação do solo.

Com os dados de temperatura máxima, mínima e com a temperatura basal para cana-de-açúcar foi calculado o graus-dia pelas equações 4 ou 5, e correlacionadas com razão entre comprimento do dia em horas às 12 h (Equação 6) (VILLA NOVA et al., 1972); e o graus-dia negativo pela equação 7 ou 8 (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004). O graus-dia negativo foi utilizado por Scarpari e Beauclair (2004) para estimar o acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar, sendo uma ferramenta bastante útil, junto com graus-dia para determinação dos estágios fenológicos da cana-de-açúcar. Nesse experimento o graus-dia negativo foi utilizado como referência para discussão dos resultados.

$$GD = (T_m - T_b) + \frac{(T_M - T_m)}{2}; \text{ se } T_m > T_b \quad (4)$$

$$GD = \frac{(T_M - T_b)^2}{2(T_M - T_m)}; \text{ se } T_m < T_b \quad (5)$$

$$GD = DD \times \frac{N}{12} \quad (6)$$

$$DD_{neg} = \frac{4}{3} \times \frac{(T_b - T_m)^2}{2(T_M - T_m)}; \text{ se } T_b > T_m \quad (7)$$

$$DD_{neg} = 0; \text{ se } T_b \leq 0 \quad (8)$$

Onde, GD é o graus-dia, T_m é a temperatura diária mínima ($^{\circ}\text{C}$), T_M é a temperatura diária máxima ($^{\circ}\text{C}$), T_b é a temperatura basal (20°C) (BARBIERI et al., 1979), N é a duração do dia (h) e DD_{neg} é o graus-dia negativo.

3.8 Avaliações

3.8.1 Monitoramento das características químicas da solução do solo

As coletas de solução do solo foram sempre realizadas 24 horas após a aplicação dos tratamentos, e ao final da última aplicação as coletas foram realizadas quinzenalmente até próximo a colheita. Para extrair a solução do solo, criou-se um vácuo na câmara interna do extrator, de aproximadamente 80 kPa, por meio de uma bomba de vácuo. Nesse momento, verificou a umidade do solo por meio de tensiômetros e pela sonda Diviner 2000. As soluções do solo foram retiradas das câmaras dos extratores, 24 horas após a aplicação do vácuo, tempo necessário para atingir um equilíbrio do solo com a cápsula do extrator de solução.

Para a determinação do pH e a condutividade elétrica (CE) foram utilizados medidores de pH e um condutivímetro de mesa (Digimed). Esses dados foram coletados e analisados em conjunto com Lelis Neto (2012).

Figura 14 – Bomba de vácuo (A) e vista detalhada da aplicação do vácuo (B)

3.8.2 Monitoramento do comportamento dos gotejadores quanto ao entupimento

A amostragem foi realizada antes da primeira aplicação de vinhaça, depois da quinta e no final das 10 aplicações, sendo a pressão aferida com o auxílio de um manômetro de glicerina durante cada avaliação. As avaliações foram realizadas com água, utilizando uma balança de precisão certificada da marca OHAUS com precisão de 0,01 g para pesagem de cada recipiente com água; descontando-se sua tara para obtenção em volume.

Foram selecionados como padrão 3 gotejadores em cada parcela, posicionados no início, no meio e no final da linha, totalizando 12 gotejadores analisados por tratamento. Todos os gotejadores selecionados foram encamisados por um tubo de PVC de 4 polegadas com o intuito de verificar somente o entupimento devido à vinhaça, uma vez que não haveria intrusão radicular nesses gotejadores. O procedimento para os testes da vazão dos gotejadores consistiram de: pressurização do sistema (150 kPa) por 15 minutos, para ter certeza que todo sistema estaria pressurizado; posicionamento dos recipientes plásticos sob os respectivos gotejadores; retirada sequencial dos recipientes após dez minutos; pesagem dos recipientes (método gravimétrico); e tabulação dos dados, expressando-se os valores de vazão em $L\ h^{-1}$ (Figura 15A a Figura 15B).

Figura 15 – Gotejador selecionado para o ensaio de vazão (A); Vista frontal da distribuição dos recipientes na parcela para a realização do teste de vazão (B); Coleta da vazão (C) e Pesagem (D)

Depois de tabulado os dados, calculou-se a vazão média, o coeficiente de variação de vazão e a uniformidade de distribuição de água utilizando as eq. (9) a eq. (11).

$$q = \frac{P}{1000 \times t} 60 \quad (9)$$

Onde:

q – vazão do gotejador, L h⁻¹;

P – peso da água coletada, g; e

t – tempo de coleta, min.

$$CV_q = \frac{s}{q} 100 \quad (10)$$

Onde:

CVq – coeficiente de variação da vazão, %;

s – desvio padrão da vazão dos gotejadores, L h⁻¹; e

q – vazão do gotejador, L h⁻¹.

$$UD = \frac{q_{25\%}}{q_{média}} 100 \quad (11)$$

3.8.3 Biometria

As seguintes medidas de biometria foram realizadas ao longo do primeiro ciclo do experimento:

a) Altura de planta: medindo do nível do solo até a última região auricular visível da folha (cartucho);

b) Diâmetro de colmo, número de colmos e distância de internódio: com auxílio de um paquímetro digital mede-se o diâmetro de colmo em 10 plantas por parcela, onde também são contados os números de colmos e medida a distância de internódios;

c) Área foliar: através da leitura do comprimento e largura da folha +3, e utilizando a Eq. 12 proposta por Hermann e Camara (1999):

$$AF = C \times L \times F \times (NF + 2) \quad (12)$$

d) Número de perfilhos: contagem desde o início da fase de perfilhamento até a estabilização natural da cultura.

3.8.4 Análise foliar e teor de clorofila

Foram realizadas duas amostras de folha, aos 180 e 300 DAP, para avaliação do estado nutricional das plantas. Foram coletadas 10 folhas +3 (terço médio sem nervura) por parcela e enviadas ao laboratório para análise nutricional. Os resultados das análises foram comparados

com os teores adequados propostos por Raij e Cantarella (1996). Os teores de clorofila (a, b, e total) nas folhas foram determinados pelo equipamento ClorofiLOG (Falker) (Figura 16) com leituras em 10 plantas (folha +3) por parcela.

Figura 16 – Equipamento ClorofiLOG (Falker) determinando o teor de clorofila nas folhas

3.8.5 Produtividade e características tecnológicas

A primeira colheita foi realizada entre os dias 16 e 18 de fevereiro de 2011, 300 dias após o plantio devido ao acamamento ocorrido no dia 12 de fevereiro (Figura 17A). A segunda colheita foi realizada entre os dias 20 e 24 de abril de 2012, 433 DAP.

Após o corte as plantas foram separadas em colmo e ponteira, e pesadas separadamente (Figura 17B e Figura 17C). Foi colhida apenas a área útil do experimento, sendo que a produtividade em kg m^{-2} foi transformada em ton ha^{-1} . Para determinação das qualidades tecnológicas, foram enviadas amostradas 10 plantas por parcela (Figura 17D) e enviadas ao laboratório para determinação do °Brix, pureza, porcentagem de fibra, ATR e teor de cinzas no caldo.

Figura 17 – Vista da área acamada (A); pesagem dos colmos (B); pesagem das ponteiros (C); feixe com 10 plantas amostradas (D)

3.8.6 Produção de açúcar e etanol

As quantidades de açúcar branco e etanol anidro foram calculadas a partir dos valores de ATR multiplicados pelos fatores de conversão propostos pela CONSECANA (2006) (Tabela 13). Esse cálculo representa quanto de cada produto poderia ser produzido individualmente.

Tabela 13 – Fatores de conversão de 1 kg de ATR para os bioprodutos da cana-de-açúcar

Produto	Fator
Açúcar branco	0,95283
Etanol anidro	0,56654

Fonte: CONSECANA (2006)

A produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa foi estimada com base em um cenário obtido da literatura. Esse cenário considera uma produção integrada de etanol de primeira e segunda geração em uma destilaria autônoma onde o bagaço excedente é utilizado como matéria prima para produção de etanol. As principais características desse cenário são tecnologia atual para hidrólise, 123 kg de material lignocelulósico (LM) por

tonelada de cana-açúcar (base seca), potencial de 158 L de etanol por tonelada de LM. Maiores detalhes sobre o cenário adotado pode ser encontrado em Dias et al. (2009, 2010).

3.9 Análise estatística dos dados

Para a análise estatística do projeto utilizou-se o software “*Statistical Analysis System*” (SAS INSTITUTE, 2001) onde foram interpretados os dados individualmente, a partir das análises de variância, utilizando-se o teste F e respeitando-se o delineamento experimental adotado. Por se tratar, neste experimento, da investigação do desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar, realizou-se a comparação entre as médias utilizando o teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados climáticos ao longo dos ciclos da cultura

Segundo Castro (1999) a cana-de-açúcar plantada entre janeiro e abril na região centro-sul do Brasil apresenta desenvolvimento lento entre os meses de maio a outubro, e um desenvolvimento acelerado de outubro a abril, principalmente a partir de dezembro, considerando condições hídricas favoráveis, sendo o processo de maturação iniciado a partir de maio. Temperaturas médias diurnas entre 22 e 30°C favorecem o crescimento ótimo da cultura (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977). O crescimento representa o oposto de armazenamento de sacarose, onde a atividade da enzima invertase é aumentada (TAIZ; ZEIGER, 1998), com o transporte de sacarose do citosol para os vacúolos no gasto de energia (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004). Na região centro-sul do Brasil é necessário uma temperatura entre 10 e 20°C para início da maturação (Scarpari, 2002), pois o metabolismo da planta é afetado por temperaturas noturnas abaixo de 20°C (ALEXANDER, 1973).

Na Tabela 14 estão apresentados os dados meteorológicos ocorridos no ciclo cana planta. Nota-se que para esse ciclo as menores temperaturas ocorridas foram nos primeiros quatro meses iniciais, período que compreende o estágio fenológico de perfilhamento. No final do primeiro ciclo, entre os 223 e 300 DAP, a temperatura esteve entre 20 e 32°C em um período com elevado índice pluviométrico, favorecendo o rápido desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar. O método dos graus-dia é o melhor para correlacionar o desenvolvimento dos vegetais com temperatura (VILLA NOVA et al., 1972).

Tabela 15 mostra que o acumulado de graus-dia para o ciclo cana planta foi de 1041,88, que é um valor inferior aos encontrados na literatura que mostram que durante o ciclo da cana planta o acumulo de graus-dia entre o plantio e a colheita é superior a 1200, considerando a temperatura base entre 18 e 20°C (ALMEIDA et al., 2008; FERREIRA JÚNIOR, 2010; SCARPARI, 2007),

Scarpari e Beauclair (2004) com objetivo de estimar a maturação da cana-de-açúcar com dados referentes a armazenamento de água no solo e graus-dias negativos chegaram a um modelo significativo com um coeficiente de determinação $R^2=0,7049$, onde o GDneg teve grande influência no modelo indicando um efeito benéfico do frio sobre o acúmulo de sacarose. Nota-se portanto, com base nas condições climáticas, que as plantas de cana-de-açúcar apresentavam-se no estágio fenológico de rápido desenvolvimento vegetativo no

momento da colheita, sendo necessário um período maior das plantas no campo para que se iniciasse o processo de maturação.

Tabela 14 – Valores médios mensais dos dados meteorológicos ocorridos no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)

Mês	DAP	Temperatura			UR	Vel. Vento	R _G	R _N	Precipitação
		Max	Min	Med	-----Média Mensal-----				Total
		-----°C-----			%	m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Abr	1-8	30,3	18,7	23,2	66,4	1,4	15,7	8,0	32,2
Mai	9-39	25,8	12,9	18,8	70,0	1,1	13,1	5,3	30,1
Jun	40-69	25,5	10,0	16,9	67,4	1,3	13,2	5,1	18,3
Jul	70-100	26,8	12,3	18,9	64,0	1,2	12,5	5,6	65,6
Ago	101-131	28,5	10,4	18,8	53,1	1,2	15,8	7,1	0,1
Set	132-161	29,4	15,2	21,6	58,9	1,3	15,7	7,2	134,0
Out	162-192	28,4	15,6	21,3	64,4	1,3	18,5	10,2	93,8
Nov	193-222	30,1	17,6	23,3	63,1	1,1	18,2	11,5	45,9
Dez	223-252	30,7	20,2	24,4	67,0	1,3	19,8	10,9	42,7
Jan	253-284	30,9	20,2	24,6	89,2	1,2	21,0	11,6	468,9
Fev	285-300	32,0	20,6	25,0	84,0	1,4	20,5	11,2	157,2

Tabela 15 – Dias após o plantio (DAP), Graus-dias (GD) e Graus-dias negativos (GD_{neg}) no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)

Mês	DAP	GD	GD _{neg}
Abr	1-8	34,6	1,32
Mai	9-39	78,7	90,58
Jun	40-69	108,4	133,64
Jul	70-100	158,6	93,62
Ago	101-131	221,8	113,63
Set	132-161	319,9	39,67
Out	162-192	415,3	38,12
Nov	193-222	554,2	13,63
Dez	223-252	738,4	2,62
Jan	253-284	934,4	0,71
Fev	285-300	1041,9	0,00

A Tabela 16 apresenta os dados climáticos para o ciclo cana primeira soca. Inicialmente, nos três primeiros meses, a temperatura média variou entre 22,4 e 32°C sendo favorável a emergência e perfilhamento das plantas. Os meses entre maio e setembro foram os que apresentaram menores temperaturas e menor índice pluviométrico, retomando as condições favoráveis em outubro. No final do ciclo, os últimos dois meses apresentaram temperatura mínima inferior a 20°C favorecendo o acúmulo de sacarose no colmo, apesar de

ainda apresentar índices pluviométricos que contribuem para manutenção da umidade do solo diminuindo o efeito benéfico do estresse hídrico no processo de maturação da cana-de-açúcar.

A variedade CTC 12 como já descrita anteriormente apresenta como característica precocidade e alto teor de sacarose, sendo recomendada a colheita no início de safra. Mesmo as condições climáticas no final do segundo ciclo terem sido mais favoráveis ao desenvolvimento vegetativo, a colheita foi realizada ao 433 DAP com um acúmulo de graus-dia de 1641,3, as características intrínsecas a variedade devem ser consideradas.

Tabela 16 – Valores médios mensais dos dados meteorológicos ocorridos no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)

Mes	Temperatura			Umidade Relativa	Vel. do Vento	Radiação Global	Radiação Líquida	Precipitação
	Max	Min	Med	-----Média Mensal-----				Total
	°C			%	m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Fev	32,0	20,2	24,7	86,7	0,8	21,6	11,1	70,8
Mar	28,2	19,6	23,1	90,9	1,2	15,2	7,1	218,3
Abr	29,2	17,5	22,4	87,4	0,8	16,1	7,3	131,2
Mai	25,9	12,5	18,5	84,5	0,8	14,9	5,7	29
Jun	24,6	9,3	16,3	84,0	0,8	13,8	4,7	48,8
Jul	27,0	12,8	19,3	77,6	0,9	14,7	5,0	3
Ago	28,1	13,2	20,3	73,4	1,2	17,0	5,9	30,8
Set	30,3	12,9	21,1	66,1	1,5	23,4	8,3	1,7
Out	29,6	17,1	22,7	77,5	1,6	21,3	8,7	193,9
Nov	30,7	18,6	24,0	77,4	1,5	24,9	10,7	155,3
Dez	30,7	18,6	24,0	81,2	1,2	25,4	11,4	153,4
Jan	29,2	18,5	22,7	88,9	1,1	21,7	9,5	214,9
Fev	33,1	20,1	25,7	81,7	0,7	24,7	11,9	138,7
Mar	31,6	18,8	24,4	81,7	1,1	23,7	10,7	61,5
Abr	30,8	18,1	23,7	83,8	0,9	20,7	8,2	85,7

Tabela 17 – Dias após o primeiro corte (DAPc), Graus-dias (GD) e Graus-dias negativos (GDneg) no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)

Mês	DAPc	GD	GD _{neg}
Fev	1-8	83,1	,126
Mar	9-39	206,8	2,22
Abr	40-69	313,5	15,887
Mai	70-100	353,9	92,93
Jun	101-131	380,0	168,245
Jul	132-161	434,9	85,4
Ago	162-192	515,2	86,7
Set	193-222	609,9	63,7
Out	223-252	733,7	18,75
Nov	253-284	854,4	25,4
Dez	285-300	1021,8	7,6
Jan	319-349	1159,9	8,6
Fev	350-378	1363,8	0,7
Mar	379-409	1531,6	5,6
Abr	410-433	1641,3	8,0

Em relação à entrada e saída de água do sistema (Tabela 18 e Tabela 19), o primeiro ciclo apresentou chuvas mais concentradas nos meses finais, sendo que 64% da precipitação total ocorreram nos últimos 3 meses, enquanto que no segundo ciclo 65% da precipitação total ocorreu nos últimos 7 meses. Essa melhor distribuição de chuva ocorrida no segundo ciclo ocasionou em uma maior precipitação efetiva, sendo que 84% da precipitação total foi aproveitada pela cultura no tratamento 1, contra 43% no primeiro ciclo. Os tratamentos irrigados (T2-T6) apresentaram $ET_{c\text{ajustada}}$ total de 1112 e 1620 mm, o que equivale a 3,7 e 3,74 mm dia⁻¹ para o primeiro e segundo ciclo respectivamente, contra 2.96 e 3.33 mm dia⁻¹ do tratamento 1. Esses dados estão de acordo com Doorenbos e Kassam (1994) que citam que o consumo hídrico total pela cana-de-açúcar varia entre 1500 e 2500 mm.

Tabela 18 – Evapotranspiração de referência (ET_0), Evapotranspiração de cultura (ET_c), Evapotranspiração de cultura ajustada ($ET_{c\text{ajustada}}$), precipitação e irrigação ocorridas no ciclo cana planta (Piracicaba, SP)

Tratamento	Evapotranspiração			Precipitação		Irrigação	Precipitação + Irrigação
	ET ₀	ETc	ETc _{ajustada}	Total	Efetiva		
	----- mm -----						
T1	1154	1244	888,49	1296	888,49	0	888,49
T2-T6	1154	1244	1112	1296	557	415	972

Tabela 19 - Evapotranspiração de referência (ET_0), Evapotranspiração de cultura (ET_c), Evapotranspiração de cultura ajustada ($ET_{c_{ajustada}}$), precipitação e irrigação ocorridas no ciclo cana primeira soca (Piracicaba, SP)

Tratamento	Evapotranspiração			Precipitação		Irrigação	Precipitação + Irrigação
	ET ₀	ETc	ETc _{ajustada}	Total	Efetiva		
	----- mm -----						
T1	1372	1621	1433,9	1537	1303,93	0	1303,93
T2-T6	1372	1621	1620,9	1537	1181,18	431,23	1612,41

4.2 Monitoramento do pH e condutividade elétrica do solo

Na Figura 18 a Figura 21 estão apresentados suas distribuições espaciais de pH e CE no perfil do solo entre 0,2 e 0,8 m ao longo do ciclo cana planta. Nota-se que para todos os tratamentos os valores de pH aumentaram, e alguns trabalhos tem indicado que algumas fontes de fósforo podem aumentar o pH do solo (VIEIRA et al., 2005, apud SOUSA; SILVA, 2010), e outros trabalhos indicam uma tendência de diminuir (OSZTOICS et al., 2005, apud SOUSA; SILVA, 2010). Nesse caso, como já mencionado anteriormente, foi adubado com dose total de fósforo necessário em T1 e meia dose nos outros tratamentos na adubação de plantio. O superfosfato simples tem, adicionalmente, o enxofre na forma de sulfato de cálcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), conhecido como gesso agrícola (SOUSA; SILVA, 2010), que é 150 vezes mais solúvel que o calcário e também mais móvel apresentando maiores efeitos em profundidades.

Nos tratamentos que receberam vinhaça ficou mais evidente a alteração do pH que ocorreu ao longo das dez aplicações. O pH dos solos tratados com vinhaça aumenta (SILVA; RIBEIRO, 1998, apud SILVA et al., 2006) principalmente em áreas cultivadas há mais tempo, embora nos primeiros dez dias após sua aplicação o pH sofra uma redução considerável para, posteriormente, elevar-se abruptamente, podendo alcançar valores superiores a sete. Este efeito está ligado à ação dos microrganismos (ROSSETTO, 1987).

Nos tratamentos T1 e T2 não ocorreu variações na CE da solução do solo, enquanto que para os tratamentos com vinhaça a CE aumentou proporcionalmente em relação ao aumento da dose, sendo o tratamento T6 o que apresentou maior valor na última coleta, $2,7 \text{ dS m}^{-1}$. Santana et al. (2007) mostraram que a adição de águas com concentração salina de 0,1; 2,0; 5,0 e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ elevou a CE do extrato saturado do solo para 2,26; 4,86; 6,89 e $10,25 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, porém esse estudo foi feito em ambiente protegido com aplicação de água salina a cada dois dias.

Figura 18 - Distribuição do pH, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011

Figura 19 - Distribuição do pH, nos tratamentos 4, 5 e 6 (T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011

Figura 20 - Distribuição da condutividade elétrica, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011

Figura 21 - Distribuição da condutividade elétrica, nos tratamentos 4, 5 e 6 (T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011

4.3 Biometria

As tabelas de Tabela 20 a Tabela 25 apresentam os dados de biometria referentes às avaliações realizadas durante o ciclo cana planta. Para altura de planta a avaliação realizada aos 127 DAP não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Até os 131 DAP pode-se considerar um período seco onde a irrigação foi necessária, porém foi também um período com temperatura média inferior a temperatura basal de 20°C, influenciando diretamente no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar. Ebrahim et al. (1998) estudando o desenvolvimento da cana-de-açúcar sob temperaturas a cima e a baixo da temperatura ótima mostraram que as plantas apresentaram baixo crescimento quando submetidas a temperatura de 15°C.

A avaliação realizada aos 226 DAP apresentou diferença em relação ao tratamento 1 que apresentou menor altura de planta em relação aos tratamentos irrigados. Segundo Silva et al. (2008) (apud MACHADO et al., 2009), a variação na altura da planta é um indicativo de tolerância ou suscetibilidade da cana-de-açúcar ao déficit hídrico, e Machado (2009) estudando dois genótipos de cana-de-açúcar, um tolerante e outro suscetível ao déficit hídrico, mostrou que esse segundo apresentou menor altura de planta principalmente quando foi submetido ao déficit na fase inicial de desenvolvimento da planta.

Aos 260 DAP os tratamentos 3 e 4, e aos 292 DAP os tratamentos 3, 4 e 6 foram superiores ao tratamento 1. Não houve diferença de altura de plantas entre os tratamentos irrigados em nenhuma das avaliações, resultado em acordo com Barbosa (2010) que não encontrou diferença entre altura de plantas de cana-de-açúcar (ciclo cana planta) submetida a diferentes doses de vinhaça, avaliadas aos 330 DAP. Também não foi encontrado pelo autor diferença de altura das plantas irrigadas com as plantas em condição de sequeiro, justificado pela boa disponibilidade hídrica na fase de alongamento dos colmos. Já para Magalhães (2010) a altura de planta para dose 120 m³ ha⁻¹ foi inferior para as doses de 240 e 420 m³ ha⁻¹ e também ao tratamento com adubação química convencional. É importante ressaltar que aplicação da vinhaça por Magalhães (2010) foi por aspersão convencional.

Os dados de área foliar evidenciaram que o déficit hídrico afetou o tratamento 1, sendo que as plantas apresentaram menor número e alongamento das folhas. Este resultado está de acordo com Smit e Singles (2006) que em um estudo sobre as respostas do dossel de plantas de cana-de-açúcar, mostraram que o surgimento de novas folhas é fortemente afetado pelo déficit hídrico. Inman-Bamber (2004) também concluiu que tanto o alongamento das folhas e dos colmos são afetados no início do estresse hídrico, e que posteriormente a senescência

foliar e a redução no surgimento de novas folhas são fatores que combinados influenciam no número de folhas verdes em relação a plantas não sujeitas ao estresse hídrico.

Aos 292 DAP os tratamentos 4, 5 e 6 se diferenciaram significativamente do tratamento 1, enquanto os tratamentos 2 e 3 não apresentaram diferença. Pode-se relacionar o potássio aos efeitos do estresse hídrico nas plantas por ser um regulador osmótico minimizando a perda de água pelas folhas (ANDERSEN et al., 1992). Vilela e Büll (1999) estudando o desenvolvimento de plantas de milho submetidas a diferentes doses de potássio e estresse hídrico concluíram que as folhas de milho se ajustaram osmoticamente em relação às doses de potássio em condições de estresse hídrico moderado, e que plantas mais bem nutridas com potássio produziram mais matéria seca, independente do nível de estresse. Portanto, pode-se explicar a diferença de área foliar dos tratamentos 4, 5 e 6 em relação ao tratamento 1 pela maiores doses de potássio (ou vinhaça) aplicadas. Já entre os tratamentos irrigados, não ocorreu diferença nas avaliações realizadas, concordando com Barbosa (2010) que encontrou os mesmos resultados para o ciclo cana planta, onde o tratamento com alta dose de vinhaça se diferenciou apenas do tratamento de sequeiro.

Em relação ao diâmetro de colmo a única diferença significativa encontrada foi na avaliação dos 182 DAP, onde o tratamento 4 foi superior ao tratamento 1. Nas outras avaliações não ocorreram diferença. As avaliações de distância de internódio também mostrou diferença apenas aos 260 DAP, sendo o tratamento 6 superior ao tratamento 1. Já o número de internódios não apresentou diferença significativa em nenhuma das avaliações. Barbosa (2010) também não encontrou diferença no diâmetro de colmo entre cana irrigada com diferentes doses de vinhaça com cana-de-açúcar em condição de sequeiro, o mesmo resultado encontrado por Magalhães (2010).

Nota-se que todas as variáveis biométricas analisadas não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos irrigados, o que demonstra que metade da dose padrão foi suficiente para suprir as necessidades nutricionais das plantas para as condições do experimento. Como já discutido anteriormente, a vinhaça proporcionou um aumento na condutividade do solo ao longo do ciclo, com diferença principalmente entre os tratamentos que receberam vinhaça com os que não receberam. Os valores variaram entre 0,05 a 3,37 dS m^{-1} , sendo que o índice de tolerância encontrado na FAO 56 para de açúcar é de 1,7 dS m^{-1} . Wiedenfeld (2007) comparou o efeito da irrigação com água de rio com 1,3 dS m^{-1} e água de poço 3,4 dS m^{-1} , sobre a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar, e mostrou que ocorreu uma redução de 17% na produtividade pela água com 3,4 dS m^{-1} em relação a água com 1,3 dS m^{-1} , enquanto os parâmetros de qualidades não foram alterados. Portanto, em relação ao

desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, as altas doses de vinhaça que ocasionaram aumento na CE do solo, não tiveram efeito negativo.

Tabela 20 - Altura de planta (cm) aos 127, 226, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	DAP			
	127	226	260	292
T1	21,2 a	80,0 b	141,5 b	200,9 b
T2	22,5 a	97,8 a	156,3ab	218,9ab
T3	22,4 a	99,6 a	170,5 a	224,7 a
T4	23,0 a	101,0a	173,8 a	231,0 a
T5	21,3 a	96,5 a	164,5ab	222,3 ab
T6	21,7 a	97,6 a	155,6ab	225,4 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 21 - Área foliar (cm²) aos 109, 182, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	DAP			
	109	182	260	292
T1	1427,9 a	2856,8 b	5081,4 a	5533,6 b
T2	1282,6 a	3499,1 ab	5671,3 a	6216,1 ab
T3	1389,0 a	3719,2 a	5657,9 a	6050,2 ab
T4	1355,9 a	3866,5 a	5847,7 a	6540,8 a
T5	1481,2 a	3644,4 ab	6006,5 a	6503,2 a
T6	1488,3 a	3532,0 ab	4635,8 a	6607,0 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 22 - Diâmetro de colmo (mm) aos 110, 182, 260 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	DAP			
	110	182	260	292
T1	16,4 a	25,5 b	33,1 a	31,3 a
T2	15,6 a	27,2ab	32,8 a	30,8 a
T3	16,9 a	29,6ab	32,8 a	31,3 a
T4	17,0 a	31,6 a	32,8 a	31,6 a
T5	16,7 a	29,2ab	34,0 a	32,0 a
T6	16,7 a	27,5ab	33,5 a	31,4 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 23 - Distância de internódios (cm) aos 260, 273 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	DAP		
	260	273	292
T1	12,2 b	16,6 a	17,3 a
T2	14,1ab	17,5 a	17,7 a
T3	13,9ab	18,9 a	19,1 a
T4	14,1ab	18,3 a	18,0 a
T5	13,2 b	18,4 a	18,2 a
T6	16,1 a	18,6 a	18,5 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 24 - Número de internódios aos 260, 273 e 292 dias após o plantio (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	DAP		
	260	273	292
T1	5,9 a	6,9 a	8,4 a
T2	6,5 a	7,6 a	8,7 a
T3	6,3 a	7,3 a	8,8 a
T4	6,2 a	7,8 a	9,2 a
T5	6,5 a	7,5 a	8,8 a
T6	5,8 a	7,3 a	8,5 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 25 - Número de colmos por metro após estabilização da cultura

T1	T2	T3	T4	T5	T6
11,3 a	11,5 a	12,4 a	12,5 a	13,3 a	14,5 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

4.4 Análise nutricional das folhas e teor de clorofila

Segundo Vitti et al. (2005) a data ideal para coleta de folhas para análise nutricional é 6 meses após a emergência das plantas, portanto a primeira análise seria a ideal para efeito de diagnose nutricional das plantas. Observa-se que não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos, sendo que os valores de potássio foram crescentes conforme o aumento das doses, tanto na primeira quanto na segunda análise.

Para facilitar a visualização dos resultados dessas análises foram montadas as Tabelas 30 a Tabela 33 para comparar os níveis de nutriente encontrados com a faixa adequada (RAIJ; CANTARELA, 1996) Observa-se que para todos os tratamentos na primeira coleta, os valores de fósforo foram inferiores aos valores adequados, sendo que na análise inicial do solo (Tabela 2) mostrou que o solo apresentava valores baixos desse elemento. Na segunda análise o teor de fósforo estava na faixa adequada em todos os tratamentos. Em relação ao potássio os

valores mostram-se adequados na primeira coleta, já na segunda os tratamentos 1 e 2 mostraram níveis abaixo do considerado ideal, já os tratamentos que receberam vinhaça apresentaram valores adequados.

Esses resultados, assim como os dados de biometria, mostram que a metade da dose padrão de vinhaça foi suficiente para suprir nutricionalmente as plantas de cana-de-açúcar e doses elevadas não ocasionaram excesso de nutrientes nas folhas.

Tabela 26 - Análise nutricional das folhas (macronutrientes) – 180 DAP

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
T1	21,87a	1,30a	12,03a	5,81a	3,25a	2,45a
T2	22,77a	1,26a	12,23a	5,86a	3,03a	2,46a
T3	22,40a	1,37a	12,43a	5,76a	3,28a	2,52a
T4	21,47a	1,47a	12,65a	6,24a	3,15a	2,72a
T5	23,29a	1,44a	12,80a	5,76a	3,15a	2,84a
T6	22,17a	1,46a	13,38a	5,45a	3,30a	2,79a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 27 - Análise nutricional das folhas (micronutrientes) – 180 DAP

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
1	7,02a	6,78a	126,18a	192,38a	33,70a
2	10,22a	6,38a	130,28a	177,30a	29,50a
3	5,66a	6,68a	132,20a	155,80a	34,90a
4	8,47a	6,93a	130,63a	199,85a	34,38a
5	5,36a	6,80a	126,50a	239,40a	34,53a
6	14,18a	6,83a	132,10a	211,15a	30,43a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 28 - Análise nutricional das folhas (macronutrientes) – 300 DAP

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
T1	20,50a	1,74a	9,37a	7,04a	2,90a	1,75a
T2	21,20a	1,80a	9,76a	6,95a	2,68a	1,69a
T3	20,20a	1,84a	10,71a	6,14a	2,88a	1,87a
T4	19,82a	1,90a	10,71a	7,18a	2,65a	2,27a
T5	21,39a	1,98a	10,14a	7,40a	2,73a	2,45a
T6	22,47a	1,97a	11,10a	6,59a	2,58a	2,65a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 29 - Análise nutricional das folhas (micronutrientes) – 300 DAP

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
1	4,71a	8,33a	111,15a	172,30a	22,33a
2	4,73a	11,55a	103,13a	160,75a	22,40a
3	7,76a	6,90a	119,45a	133,68a	22,60a
4	5,32a	7,10a	113,63a	172,45a	22,70a
5	6,32a	6,98a	122,05a	211,05a	22,58a
6	7,21a	9,13a	114,38a	209,65a	22,28a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 30 - Classificação dos teores de nutrientes em relação à faixa adequada – 180 DAP

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
Margem adequada	18-25	1,5-3	10-16	2-8	1-3	1,5-3
T1	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.
T2	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.
T3	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.
T4	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.
T5	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.
T6	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	sup	adeq.

adeq – adequado, inf. - inferior

Tabela 31 - Classificação dos teores de nutrientes em relação a faixa adequada – 180 DAP

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
Margem adequada	10-30	6-15	40-250	25-250	10-50
1	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
2	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
3	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
4	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
5	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
6	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.

adeq – adequado, inf. - inferior

Tabela 32 - Classificação dos teores de nutrientes em relação à faixa adequada – 300 DAP

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
Margem adequada	18-25	1,5-3	10-16	2-8	1-3	1,5-3
T1	adeq.	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	adeq.
T2	adeq.	adeq.	inf.	adeq.	adeq.	adeq.
T3	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
T4	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
T5	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
T6	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.

adeq – adequado, inf. - inferior

Tabela 33 - Classificação dos teores de nutrientes em relação a faixa adequada – 300 DAP

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
Margem adequada	10-30	6-15	40-250	25-250	10-50
1	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
2	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
3	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
4	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
5	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.
6	inf.	adeq.	adeq.	adeq.	adeq.

adeq – adequado, inf. - inferior

As Figuras de Figura 22Figura 24 apresentam os dados de teor clorofila a (TCA), teor de clorofila b (TCB) e o teor de clorofila total (TCT) nas folhas +3, respectivamente. Os dados não tiveram uma correlação entre as diferentes doses de vinhaça; talvez fosse necessário aumentar o número de medidas por folha com intuito de diminuir o coeficiente de variação.

Em relação ao tratamento não irrigado os valores se mostraram inferiores a todos os irrigados. A degradação dos pigmentos clorofilianos está relacionada com a diminuição da síntese ou da degradação dos carotenóides, pois os carotenóides são pigmentos acessórios na absorção e transferência de energia radiante, e protetores da clorofila no processo de foto-oxidação. O estresse hídrico induz a degradação de β-caroteno e a redução na formação de zeaxantina, produzindo diminuição no teor de carotenóides, pigmentos aparentemente envolvidos na proteção contra a fotoinibição (PEREIRA et al., 2008).

Pode-se observar também que a área foliar e altura de planta do tratamento 11 foi inferior, e sendo assim as folhas dessas plantas estão menos sombreadas. Segundo Kramer e

Kozlowski (1979) a clorofila é constantemente sintetizada e destruída (foto-oxidação) em presença de luz, mas sob intensidades luminosas muito altas a velocidade de decomposição é maior, sendo o equilíbrio estabelecido a uma concentração mais baixa. Por isto Boardman (1977) salienta que as folhas de sombra apresentam maior concentração de clorofila do que folhas de sol. Uma maior proporção relativa de clorofila b em plantas sombreadas é uma característica importante, pois possibilita a captação de energia de outros comprimentos de onda e transferência para uma molécula específica de clorofila a, que efetivamente toma parte das reações fotoquímicas da fotossíntese (WHATLEY; WHATLEY, 1982).

Figura 22 - Teor de clorofila *a* na folha

Figura 23 - Teor de clorofila *b* na folha

Figura 24 - Teor de clorofila *total* na folha

4.5 Características tecnológicas e produtividade agrícola e industrial

Os parâmetros tecnológicos encontrados estão apresentados na Tabela 34 e Tabela 35 para o primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Para o primeiro ciclo os valores encontrados são diferentes dos valores padrões para industrialização da matéria prima para produção de açúcar e álcool devido à colheita precoce da cana-de-açúcar. Já para o segundo corte os parâmetros foram condizentes com os exigidos para industrialização. Para ambos os ciclos os dados de °Brix, Pol, %P, %F, AR, ART e ATR não apresentaram diferença significativa, apenas o %C foi influenciado pela aplicação de vinhaça.

Para caracterização do grau de maturação da cana-de-açúcar adota-se o valor de °Brix de 18 (MARQUES et al., 2001), observa-se que para cana planta os valores °Brix variaram entre 10,35 (T6) e 12,43 (T3), evidenciando a não maturação das plantas. Para primeira soca apenas o tratamento 2 apresentou valor inferior a 18 °Brix, enquanto os outros valores variaram entre 18,5 (T3) e 19,4 (T4).

Outro parâmetro analisado foi a Pol (teor aparente de sacarose) que define o Período Útil de Industrialização (PUI), sendo necessário valores superiores a 13%. Para cana planta os valores variaram entre 6,72 (T4) e 8,45% (T1) indicando que a cana não apresentava condições econômicas de industrialização, segundo as normas da CONSECANA (1998). No segundo corte os valores variaram entre 16,3 (T3 e T6) e 17,6 (T2), próximos ao valor de

16,8% (média de cinco cortes em 27 localidades e 50 experimentos) apresentado pelo Centro de Tecnologia Canavieira na caracterização da variedade CTC 12.

Os valores de %P do caldo para o ciclo cana planta variaram entre 58,30 (T4) e 69,98% (T1) que são inferiores aos valores mínimos necessários para a industrialização que é entre 80 e 85% (MARQUES et al., 2001). Esses valores podem ser explicados pelo alto teor de AR, entre 1,93 (T5) e 2,10% (T2), que não devem ser superiores a 1% no transcorrer da safra para serem aptos a industrialização (MARQUES et al., 2001). O AR é a quantidade de glicose e frutose contida na cana e interferem negativamente na Pol, devido às atividades ópticas apresentadas por elas. Como a pureza é determinada pela relação $\text{Pol } ^\circ\text{Brix}^{-1} \times 100$, baixos valores de Pol implicam em um baixo valor de pureza. No segundo corte os valores de %P foram considerados satisfatórios, variando entre 87,3% (T1 e T6) e 89,3% (T4), enquanto os valores de AR variaram entre 0,5 (T4) e 0,6% (T1, T2, T3, T5 e T6). Os teores AR no caldo diminuem conforme a maturação das plantas de cana-de-açúcar que ocorre no sentido da base para o ápice fazendo com que os teores de AR sejam inferiores nos internódios mais próximos da base (LAVANHOLI, 2010). Para Fernandes (2000) os AR são precursores de cor, aumentando a cor do açúcar e depreciando comercialmente o açúcar produzido. Portanto, os valores de AR encontrados no primeiro corte, também evidenciam a não maturação das plantas.

Os teores de fibra no primeiro corte ficaram entre 6,46 (T4) e 9,24% (T2), segundo Meade (1963) valores que podem ser considerados normais estão entre 11 e 16%, já para Baikow (1982) esse valor é de 15%. O potássio interfere na relação fibra/polpa através do aumento de teor de umidade dos colmos, sendo que quanto menor o teor de fibras no colmo, maior é o teor de polpa, diminuindo assim o poder de combustão das plantas de cana-de-açúcar. Outro efeito do potássio na fisiologia da cana-de-açúcar é a diminuição do teor de lignina e consequentemente a diminuição no enrijecimento das fibras, o que pode ser relacionada ao acamamento da cultura (FREIRE; CORTEZ, 2000). No segundo corte os valores de fibra variaram entre 11,6 (T6) e 12,5% (T4), novamente valores próximos ao apresentado pelo CTC de 10,3% para a mesma variedade.

Souza et al. (2010) avaliaram diferentes doses de vinhaça (0; 40; 80; 160; 320 e 640 m³ ha⁻¹) aplicadas por aspersão nos parâmetros tecnológicos de uma variedade média tardia (RB92-579) que necessita entre 14 e 16 meses para completar a maturação e que foi colhida com 11 meses. Os autores não encontraram diferenças para $^\circ\text{Brix}$, Pol, teor de fibra, porcentagem bruta de açúcar e ATR, mas encontraram diferença para pureza do caldo e AR, sendo que os valores encontrados variaram entre 86,33 e 91,88% e entre 0,30 e 0,71% para

pureza do caldo e AR, respectivamente. Có-Junior et al. (2008) avaliaram o efeito residual de quatro aplicações anuais de vinhaça e lodo de esgoto, aplicadas na linha de plantio e em área total e duas doses distintas. Tanto a dose, o método de aplicação, o tipo de resíduo, quanto à interação entre eles, não promoveram alterações nas qualidades tecnológicas da cana-de-açúcar em relação à planta adubada com fertilizantes químicos, mostrando a possibilidade da substituição de fertilizantes minerais pela vinhaça.

Nota-se que o %C foi influenciado pela adição de vinhaça em ambos os ciclos. No primeiro corte os tratamentos 4, 5 e 6 diferenciaram significativamente dos tratamentos 1 e 2. No segundo corte ficou mais evidente o efeito das doses de vinhaça no teor de cinzas no caldo, onde o tratamento 6 apresentou maiores valores com diferença significativa em relação a todos os tratamentos. O teor de cinza no caldo apresenta correlação direta com o potássio (FREIRE; CORTEZ, 2000) que é o nutriente mais extraído pela cana-de-açúcar concentrando a maior parte nos colmos, em torno de 55% (ROSSETTO et al., 2010). Os resultados estão de acordo com diferentes autores que também verificaram o aumento do teor de cinzas no caldo da cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça (RODELLA; FERRARI, 1977; SILVA et al., 1976, 1978). O teor de cinzas no caldo é um fator importante no processo de industrialização pelos efeitos negativos na cristalização do açúcar, devido ao fator melassigênico e devido à formação de falsos núcleos, por outro lado o maior teor de cinzas favorece a produção de álcool devido à ação nutricional às leveduras.

Tabela 34 - Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	°Brix	POL	Pureza	Fibra	AR	ART	ATR	ATR	Cinzas
		%	%	%	%	%	kg TC ⁻¹	t ha ⁻¹	
T1	11,80 a	8,60 a	73,09 a	7,51 a	2,12 a	12,46 a	92,34 a	13,38 a	0,47 b
T2	12,03 a	8,45 a	69,98 a	7,38 a	2,04 a	12,04 a	90,59 a	14,92 a	0,46 b
T3	12,43 a	8,02 a	64,46 a	9,24 a	2,10 a	13,11 a	84,46 a	15,63 a	0,54ab
T4	11,40 a	6,82 a	60,02 a	6,69 a	1,97 a	10,68 a	76,69 a	15,70 a	0,65 a
T5	11,95 a	6,72 a	58,30 a	6,46 a	2,01 a	11,07 a	76,41 a	15,51 a	0,67 a
T6	10,35 a	6,90 a	66,02 a	6,79 a	1,93 a	10,77 a	76,87 a	15,38 a	0,63 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si à nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey

Tabela 35 - Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar (cana primeira soca) (Piracicaba, SP)

Tratamento	°Brix	POL	Pureza	Fibra	AR	ART	ATR	ATR	Cinzas
		%	%	%	%	%	Kg TC ⁻¹	t ha ⁻¹	
T1	18,7 a	16,4 a	87,3 a	12,3 a	0,6 a	17,8 a	137.61 a	25,3	0,5 e
T2	17,5 a	17,6 a	89,4 a	12,4 a	0,6 a	19,1 a	147.20 a	29,0	0,6de
T3	18,5 a	16,3 a	87,8 a	11,6 a	0,6 a	17,7 a	138.44 a	26,8	0,6cd
T4	19,4 a	17,4 a	89,6 a	12,5 a	0,5 a	18,8 a	144.67 a	28,9	0,7bc
T5	19,0 a	16,9 a	88,9 a	12,0 a	0,6 a	18,3 a	142.24 a	29,3	0,8 b
T6	18,6 a	16,3 a	87,3 a	11,6 a	0,6 a	17,7 a	138.79 a	26,6	0,8 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si à nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey

Em relação à produtividade, os valores de biomassa total, colmos industrialmente utilizáveis e ponteiros apresentaram diferença significativa na primeira colheita (Tabela 36). Os valores de biomassa total dos tratamentos 4, 5 e 6 foram superiores aos tratamentos 1 e 2, sendo apenas o tratamento 5 superior ao tratamento 3. Para os valores de produtividade dos colmos industrialmente utilizáveis, os tratamentos 4 e 5 foram superiores aos tratamentos 1 e 2, e os tratamentos 4 e 6 foram superiores apenas ao tratamento 1. Em relação aos ponteiros, a produtividade aumentou conforme o aumento das doses de vinhaça, porém apenas os tratamentos T5 e T6 se diferenciaram significativamente com o tratamento T1. Os resultados vão de acordo com Medina et al. (2002) que estudando o efeito de diferentes doses na produtividade de colmos de cana-de-açúcar observaram que ocorreu um acréscimo significativo devido à adição de vinhaça na produtividade de colmos em relação ao tratamento sem vinhaça. Sendo que entre as diferentes doses de vinhaça não ocorreu diferença significativa.

Na segunda colheita é possível observar um pequeno aumento da produtividade de biomassa total e colmos industrialmente utilizáveis dos tratamentos irrigados em relação ao tratamento de sequeiro, porém não suficiente para causar uma diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Para a variável produção de ponteiros também não ocorreu diferença significativa no segundo corte da cana-de-açúcar. Barbosa (2010) não encontrou diferença de produtividade de colmos para diferentes doses de vinhaça, mas encontrou diferença entre os tratamentos irrigados com o tratamento de sequeiro para cana planta. Já na colheita da primeira soca, o autor não encontrou diferença significativa entre tratamentos irrigados com o de sequeiro, corroborando com os resultados aqui encontrados.

Tabela 36 - Produtividade de biomassa total, colmos industrialmente utilizáveis e ponteira (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	Biomassa total	Colmos industrialmente utilizáveis	Ponteira
			ton ha^{-1}	
T1	-	162,20 d	132,6 c	35,52 b
T2	0	194,93cd	151,39bc	43,55ab
T3	164	205,35bc	162,50ab	42,85ab
T4	328	238,26ab	187,50 a	50,76ab
T5	656	240,93 a	186,11 a	54,82 a
T6	984	237,44 ab	182,64 a	54,81 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 37 - Produtividade de biomassa total, colmos industrialmente utilizáveis e ponteira (primeira soca) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	Biomassa total	Colmos industrialmente utilizáveis	Ponteira
			ton ha^{-1}	
T1	-	212,4 a	183,9 a	28,5 a
T2	0	226,0 a	197,4 a	28,6 a
T3	164	219,6 a	194,7 a	24,9 a
T4	328	225,8 a	199,9 a	25,8 a
T5	656	229,7 a	205,1 a	24,6 a
T6	984	220,3 a	191,6 a	28,8 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

A vinhaça promove alterações nas características físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a fertilidade e contribuindo para melhor desenvolvimento e produtividade da cana de açúcar (GLORIA; ORLANDO FILHO, 1983). Nota-se que a produção do segundo ano foi superior ao primeiro, porém não é possível fazer a comparação entre os dois devido a primeira colheita ter sido realizada precocemente. Pode-se afirmar que para ambas as colheitas a produtividade alcançada é considerada alta, porém não somente a produção de biomassa é importante para cana-de-açúcar, visto que o pagamento da tonelada da cana é baseada na quantidade de açúcar total recuperável (ATR – kg TC^{-1}).

Altas produtividades de biomassa implica em maiores custos de colheita, carregamento e transporte, o que requer uma quantidade de ATR por tonelada de cana-de-açúcar para compensar esses custos. Os dados do primeiro corte mostram que para o tratamento 1 a quantidade de ATR foi de $92,34 \text{ kg TC}^{-1}$ e no tratamento 5 de $76,41 \text{ kg TC}^{-1}$, que são valores inferiores aos valores encontrados nas estatísticas dos dados de produção de cana-de-açúcar, de $142,01 \text{ kg TC}^{-1}$ (valor referente a média brasileira na safra 2008/2009 – MAPA, 2009). Por outro lado, considerando o rendimento de ATR por hectare (ton ha^{-1}), através da multiplicação da produtividade de colmos (ton ha^{-1}) pela quantidade de ATR (kg TC^{-1}), os valores

encontrados para o tratamento 1 e 5 são de 13,38 e 15,70 ton ha⁻¹ de ATR, que são valores mais próximos aos encontrados nas áreas de cana-de-açúcar. Já na segunda colheita os valores de ATR variaram entre 137,61 (T1) e 147,2 kg TC⁻¹ (T2), e o rendimento bruto de ATR variou entre 25,3 (T1) e 29,3 ton ha⁻¹ (T5), sem diferença significativa entre os tratamentos.

O mesmo raciocínio pode ser feito para produção de etanol de primeira geração e açúcar, que dependem dos valores de ATR. A produção de açúcar branco na primeira colheita variou entre 72,07 (T4) e 87,99 kg TC⁻¹ (T1), o que pode ser considerado baixo quando comparado aos valores médios da produção brasileira, 140 kg TC⁻¹ (MAPA, 2009). Para o etanol anidro a produção variou entre 45,18 (T5) e 54,60 L TC⁻¹ (T1), sendo os valores médios no Brasil de 80 L TC⁻¹ (MAPA, 2009). Já o rendimento por hectare de açúcar e etanol foi compensado pela alta produtividade de colmos, onde a produção de açúcar branco variou entre 11,69 (T1) e 13,71 ton ha⁻¹ (T4), e a produção de álcool variou entre 7,25 (T1) e 8,51 m³ ha⁻¹ (T4). Nesse caso seria necessário uma análise econômica para encontrar a melhor combinação entre produção de biomassa e ATR. Leite (1999) comparando os custos de adubação na cana-de-açúcar com vinhaça e fertilizantes químicos mostrou que os custo por hectare usando vinhaça foi 12,83% superior aos custos com fertilizantes químicos. Contudo, o custo por tonelada de cana usando vinhaça foi 6,77% inferior a utilização de fertilizantes químicos, o que foi justificado pela melhor produtividade ocasionada pela aplicação de vinhaça. A produção de açúcar branco e etanol anidro na segunda colheita (Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância).

Tabela 39) também não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. Tanto a produção de açúcar (kg TC⁻¹) quanto a de etanol (L TC⁻¹) apresentaram valores condizentes com a média brasileira, sendo que a alta produtividade de colmos resultou em um alto rendimento de açúcar e etanol, que variaram entre 24,14 (T1) e 27,96 ton ha⁻¹ (T5), e 14,98 (T1) e 17,35 m³ ha⁻¹ (T5), respectivamente.

Barbosa (2010) avaliando diferentes doses de vinhaça encontrou altos valores de ATR (kg TC⁻¹) e também altos rendimentos de ATR (ton ha⁻¹) nos ciclos cana planta e cana soca. No primeiro ciclo o autor encontrou valores variando entre 122,6 e 129,3 kg TC⁻¹ e 21 e 21,4 ton ha⁻¹, porém sem diferença estatística entre os tratamentos. Já no segundo ciclo o tratamento que recebeu dose de vinhaça diferenciou significativamente do tratamento de sequeiro, produzindo 152,8 contra 143,4 kg TC⁻¹ e 34,1 contra 30,8 ton ha⁻¹. Dados que corroboram com os encontrados no presente trabalho.

Paulinio et al. (2002) estudando doses crescentes de vinhaça na produtividade industrial de cana-de-açúcar encontrou que as doses intermediárias entre 300 e 450 m³ ha⁻¹

proporcionaram melhores rendimentos na produção de açúcar e etanol. Os valores encontrados pelos autores foram próximos de 20 ton ha⁻¹ de açúcar e 15 m³ ha⁻¹ de etanol para as doses intermediárias, enquanto que a dose de 600 m³ ha⁻¹ apresentou os mesmos valores do tratamento sem vinhaça. Esses dados são referentes a terceira e quarta soca, sendo que as doses de vinhaça foram aplicadas anualmente desde o ciclo da primeira soca.

Tabela 38 - Produção e rendimento de açúcar branco e etanol anidro (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose	Açúcar branco		Etanol anidro	
	m ³ ha	kg TC ⁻¹	ton ha ⁻¹	L TC ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
1	-	87,99 a	11,69 a	54,60 a	7,25 a
2	0	86,31 a	13,04 a	53,56 a	8,09 a
3	164	80,48 a	13,10 a	49,94 a	8,13 a
4	328	73,07 a	13,71 a	45,34 a	8,51 a
5	656	72,80 a	13,55 a	45,18 a	8,41 a
6	984	73,24 a	13,43 a	45,45 a	8,33 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 39 - Produção e rendimento de açúcar branco e etanol anidro (primeira soca) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose	Açúcar branco		Etanol anidro	
	m ³ ha	kg TC ⁻¹	ton ha ⁻¹	L TC ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
1	-	131,64 a	24,14 a	81,36 a	14,98 a
2	0	140,82 a	27,66 a	87,03 a	17,17 a
3	164	132,44 a	25,57 a	81,85 a	15,87 a
4	328	138,40 a	27,58 a	85,54 a	17,12 a
5	656	136,07 a	27,96 a	84,10 a	17,35 a
6	984	132,78 a	25,36 a	82,06 a	15,74 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Considerando a produção de etanol de segunda geração, a biomassa total processado é composta por colmos industrialmente utilizáveis e 50% das ponteiros de cana, este montante foi adaptado a partir de um estudo da literatura que simulavam a produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço excedente e palhiço, com uma produção de 123 kg de material lignocelulósico (LM) hidrolisado por tonelada de cana e 158 L de etanol de segunda geração por tonelada de LM (DIAS et al., 2011), esses autores em seu estudo consideraram como teor de fibra da cana o valor de 13%, de acordo com Yotamo (2011) a quantidade de bagaço produzido depende da quantidade de cana moída e o teor de fibra na cana de açúcar e de bagaço, Como pode ser observado na Tabela 34 os valores de fibra deste trabalho variou entre 6,46% e 7,38%, sem diferença significativa, portanto em adicional ao valor de 123 kg TC⁻¹ de LM, usou-se também o valor de 61,5 kg TC⁻¹ de LM, devido aos baixos valores de teor de fibra encontrados na colheita da cana planta.

Dados biomassa total processada, material lignocelulósico hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total estão apresentados nas de Tabela 40 Tabela 42. Nota-se, como

discutido anteriormente a vinhaça provocou um aumento na biomassa no primeiro ciclo e consequentemente aumentou o LM e etanol de segunda geração sendo que os tratamentos 4, 5 e 6 foram superiores aos tratamentos 1 e 2. Quando somado o etanol de primeira geração com o de segunda geração, o etanol total produzido não apresenta diferença significativa entre os tratamentos em nenhuma das duas colheitas realizadas, mostrando que a vinhaça não influenciou na produção de etanol.

Tabela 40 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 123 kg TC⁻¹ de LM (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose	Biomassa total processada	LM	Etanol 2G	Etanol Total
	m ³ ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
T1	-	150,40 c	18,50 c	2,92 c	10,17 a
T2	0	173,16bc	21,30bc	3,37bc	11,45 a
T3	164	183,92ab	22,62ab	3,57ab	11,70 a
T4	328	212,88 a	26,18 a	4,14 a	12,65 a
T5	656	213,52 a	26,26 a	4,15 a	12,56 a
T6	984	210,04 a	25,83 a	4,08 a	12,42 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 41 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 123 kg TC⁻¹ de LM (cana primeira soca) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose	Biomassa total processada	LM	Etanol 2G	Etanol Total
	m ³ ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
1	-	198,16 a	198,16 a	3,85 a	18,83 a
2	0	211,67 a	211,67 a	4,11 a	21,28 a
3	164	207,15 a	207,15 a	4,03 a	19,89 a
4	328	212,85 a	212,85 a	4,14 a	21,25 a
5	656	217,43 a	217,43 a	4,23 a	21,57 a
6	984	205,97 a	205,97 a	4,00 a	19,74 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 42 - Biomassa total processada, material lignocelulósico (LM) hidrolisado, etanol de segunda geração e etanol total considerando 61,5 kg TC⁻¹ de LM (cana planta) (Piracicaba, SP)

Tratamento	Dose	Biomassa total processada	LM	Etanol 2G	Etanol Total
	m ³ ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	ton ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
1	-	150,50 c	9,25 c	1,46 c	8,71 a
2	0	173,16bc	10,65bc	1,68bc	9,77 a
3	164	183,92ab	11,31ab	1,79ab	9,92 a
4	328	212,88 a	13,09 a	2,07 a	10,58 a
5	656	213,52 a	13,13 a	2,07 a	10,48 a
6	984	210,04 a	12,92 a	2,04 a	10,38 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

4.6 Monitoramento do comportamento dos gotejadores quanto ao entupimento

As avaliações mostraram que não ocorreram problemas de entupimento nos gotejadores, e considerando todas as parcelas irrigadas o sistema apresentou uma uniformidade de distribuição de 94,02% e um coeficiente de variação de 6,29% (Tabela 43). Comparando entre os tratamentos, observa-se na

Tabela 44 que o tratamento T2 fertirrigado com adubos químicos apresentou menor vazão média, 0,98 L h⁻¹, e maior coeficiente de variação, 10,25%. Ribeiro et al. (2010) estudaram oito modelos de tubos gotejadores (não citados) com aplicação de cloreto de potássio vermelho e branco, e concluíram que os modelos apresentaram desempenhos variáveis em relação a suscetibilidade ao entupimento e ao coeficiente de variação de vazão.

Já os tratamentos com as diferentes doses de vinhaça apresentaram menores CV, entre 3,32 e 5,24%, resultados que vão de acordo com Lelis et al. (2010) que estudaram diferentes tipos de gotejadores, inclusive o mesmo utilizado nesse experimento, submetidos a aplicação de vinhaça, onde os valores de CV foram inferiores a 5% e uma vazão média de 1,05 L h⁻¹ no final do experimento.

É importante enfatizar que nessa metodologia utilizada os gotejadores avaliados não estão em contato com o solo e não correm o risco de intrusão radicular. Portanto a interferência na uniformidade de distribuição refere-se à aplicação de vinhaça, à fertirrigação e à qualidade da água da irrigação, considerando que o projeto está dimensionado hidraulicamente correto.

Tabela 43 - Valores calculados para o teste de uniformidade de distribuição do sistema de irrigação

Cálculo	Valor
Média (L h ⁻¹)	1,02
Média 25%	0,96
Desvio padrão	0,06
Coeficiente de variação (%)	6,29
Uniformidade de distribuição (%)	94,02

Tabela 44 - Valores obtidos pela coleta de vazão separada por tratamento

Tratamento	Vazão média (L h⁻¹)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
T2	0,98	0,10	10,25
T3	1,01	0,03	3,32
T4	1,01	0,04	4,33
T5	1,08	0,06	5,24
T6	1,01	0,05	5,16

5 CONCLUSÃO

- a) Ocorreu aumento do pH devido à aplicação de vinhaça e que nesse caso, devido à presença de sais, a vinhaça apresentou elevados valores de CE;
- b) As doses de vinhaça influenciaram positivamente os valores de altura de planta e área foliar;
- c) Não houve influência dos tratamentos no estado nutricional das plantas medida através de análise foliar;
- d) O teor de cinzas no caldo foi influenciado pelas diferentes doses de vinhaça;
- e) A vinhaça contribui para o aumento de produtividade da cana-de-açúcar no primeiro corte;
- f) A produção de açúcar e etanol não foi influenciada pelas diferentes doses de vinhaça;
- g) A vinhaça promoveu o aumento do etanol de segunda geração no primeiro ciclo, por aumentar o total de biomassa produzido;
- h) O etanol total, primeira e segunda geração não foram influenciados pelas diferentes doses de vinhaça;
- i) A menor dose foi suficiente para substituir a parte da fertilização química da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ALBERT, R.S.; THORNBUR, J.P. water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 59, n. 35, p. 1-353, 1977.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; PAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA-FILHO, G.; FERREIRA-JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1441-1448, 2008.
- ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; LÖSCH, R. The interaction effects of potassium and drought in field-grown barley. I. yield, water-use efficiency and growth. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Uppsala, v. 42, p. 34-44, 1992.
- 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**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, set./out. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos: classificação**; NBR 10.004. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário estatístico**. São Paulo, 2012. 156 p.
- BACCARIN, J.G. **A desregulamentação e a dupla concentração sucroalcooleira**. Jaboticabal: UNESP, FCAV, 1994. 29 p.
- BAIKOW, V.E. **Manufacture and refining of raw cane sugar**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1982. 588 p.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. **Climatologia**. Araras, 1977. p. 1-22.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Viçosa: SBA, 1979. p. 192-197.
- BARBOSA, E.A.A. **Fertirrigação e aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial na produção de cana-de-açúcar**. 2010. 91 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produção Agrícola) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010.

BARBOSA, E.A.A.; PIRES, R.C.M.; SILVA, A.T.J.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E. Efeito da fertirrigação por gotejamento subsuperficial e do espaçamento na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro. **Anais...** Juazeiro: SBEA, 2009. 1 CD-ROM.

BARROS, G.S.C.; MORAES, M.A.F.D. A desregulamentação do setor sucroalcooleiro. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 86, abr./jun. 2002.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. **Alcoolbrás**, São Paulo, n. 106, p. 72-80, out. 2006

BOARDMAN, N.K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 28, p. 355-377, 1977.

BOYER, J.S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiology**, Rockville, v. 46, n. 2, p. 233-235, 1970.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Açúcar e álcool no Brasil**. Brasília, 2007. 21 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio 2012.

_____. **Anuário estatístico da agroenergia**. Brasília, 2009. 160 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio 2012.

BUDDADEE, B.; WIROJANAGUD, W.; WATTS, D.J.; PITAKASO, R. The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: a case study for Thailand. **Environmental Impact Assessment Review**, Amsterdam, v. 28, p. 380-391, 2008.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; BERTON, R.S.; TEÓFILO SOBRINHO, J.; MENK, J.R.F. **Alteração de características químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico pela aplicação de vinhaça**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 23 p. (IAC. Boletim, 9).

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**, Recife, v. 4, n. 1, p. 72-77. jan./mar. 2009.

CASTRO, P.R.C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Saccarum, 1999. p. 12-16

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M.O.; TASSO JUNIOR, L.C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 196-203, 2008.

COELHO, R.D.; LELIS NETO, J.A.; BARROS, A.C. Cana irrigada produz mais, mas custo de produção aumenta. In: FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2009**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2009. p. 240-242.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica**: P4.231. São Paulo, 2005. 17 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira:** cana-de-açúcar, terceiro levantamento, janeiro/201. Brasília, 2011. 19 p.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 4. ed. Piracicaba, 1998. 16 p.

_____. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006. 111 p.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário de resíduos sólidos na agroindústria sucroalcooleira**. Piracicaba, 1994. 23 p. (Relatório Técnico do Projeto nº 9.301.623).

_____. Disponível em: <www.copersucar.com.br>. Acesso em: 20 jul. 2012.

CORAZZA, R.I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. **Anais...** Brasília: SOBER, 2006.

DALRI, A.; 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. Disponível em: <<http://www.scielo.com.br>>. Acesso em: 10 out. 2009.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHASL. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2008.

DIAS, M.O.S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL, M.R.W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, Amsterdam, v. 87, p. 1206-1216, 2009.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; JESUS, C.D.F.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Improving second generation ethanol production through optimization of first generation production process from sugarcane. **Energy**, Oxford, v. 43, p. 246-252, 2012.

DIAS, M.O.S.; MODESTO, M.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C.E.V. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy**, Oxford, v. 36, p. 3691-3703, 2011.

DIAS, M.O.S.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; ROCHA, G.J.M.; PRADELLA, J.G.C.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 102, n. 19, p. 8964-8971, 2011.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 103, p. 152-161, 2012.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994. 127 p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. **Caracterização físicoquímica da vinhaça – Projeto nº9500278**: relatório técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia Canavieira. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 1995. 26 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; LOZANO, M.A.; SERRA, L.M. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 48, n. 11, p. 2978-2987, 2007.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em <<http://faostat.org>> Acesso em: 02 abr. 2012.

FERNANDES, A.C. **Cálculos da agroindústria canavieira**. Piracicaba: STAB, 2000. 193 p.

FERREIRA-JÚNIOR, R.A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar**. 2010. 68 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

FIGUEIREDO, P. Breve histórico da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. **Cana-de-açúcar**. 2. ed. Campinas: IAC, 2010. v. 1, p. 31-44.

FLEXOR, G. A conturbada trajetória do álcool combustível no Brasil e seus desafios atuais. **Observatório de Políticas Públicas para a Agricultura**, Rio de Janeiro, n. 2, p. 9-10, 2007.

FOLEGATTI, M.V. **Avaliação do desempenho de um “scheduler” na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) Irrigadas com diferentes lâminas**. 1988. 188 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

FOLEGATTI, M.V.; OLITTA, A.F.L.; COELHO, R.D. Determinação da temperatura da copa com termômetro infra-vermelho da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) irrigado com diferentes lâminas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 1990. p. 626.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico do Planalsucar**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 5-38, 1983.

_____. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash**. Piracicaba: Ed. PNUD; CTC, 2005. 217 p.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

KLEIN, F.B.; FONSECA FILHO, H.; ALMEIDA, P.S. Análise sobre o uso da Norma Técnica P4. 231 da CETESB como preventiva aos impactos ambientais causados pela vinhaça. In: CONGRESSO DE MEIO AMBIENTE DA AUGM, 6., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2009. p. 1-15.

KRAMER, T.; KOZLOWSKI, T. **Physiology of woody plants**. New York: Academic Press, 1979. 811 p.

KWONG, D.F.N.G.K.; PAUL, J.P.; DEVILLE, J. Drip-fertigation - a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 35, p. 31-37, 1999.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Fields Crop Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. v. 2, 882 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Trad. de C.H.B.A. Prado. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

LAVANHOLI, M.G.D. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. v. 1, p. 697-722.

LELIS NETO, J.A. **Aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial e seus efeitos nos perfis de distribuição iônica e atributos físicos e químicos de um Nitossolo**. 2012. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

LELIS NETO, J.A.; COELHO, R.D.; TEIXEIRA, M.B.; MIRANDA, J.H. Obstruction evaluation of drippers due to the application of vinasse. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2010, Pittsburgh. **Proceedings...** St. Joseph: ASABE, 2010. v. 1, p. 500-515.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MAGALHÃES, V.R. **Influência de doses de vinhaça nas características agronômicas de variedades de cana-de-açúcar, cana planta e atributos químicos do solo**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Montes Carlos, Janaúba, 2010.

MALAVOLTA, E. **Fertilizing for high yield sugarcane**. Basel: International Potash Institute, 1994. 104 p. (Bulletin, 14).

MARCOCCIA, R. **A participação do etanol brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética mundial.** 2007. 95 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrosática e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JÚNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar:** produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 166 p.

MEADE, G.P. **Sugarcane handbook.** New York: John Wiley, 1963. v. 9, 968 p.

MENEZES, T.J.B. **Etanol combustível do Brasil.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 229 p.

NASTARI, P.M. O cenário para o etanol. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 29, p. 36, jul./set. 2011.

NATALE NETTO, J. **A saga do álcool:** fatos e verdades sobre os 100 anos da história do álcool combustível em nosso país. Osasco: Novo Século, 2007. 343 p.

OHASHI, F.H. **O advento, crescimento, crise e abandono do Proálcool.** 2008. 46 p. Monografia (Trabalho de Graduação) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PAULINIO, A.F.; MEDINA, C.C.; ROBAINA, C.R.P.; LAURANI, R.A. Produções agrícolas e industriais de cana-de-açúcar submetidas a doses de vinhaça. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, n. 2, p. 145-150, jul./dez. 2002.

PEREIRA, B.W.F.; GRUBER, Y.B.G.; COELHO, R.D. Conteúdo relativo de água e comportamento dos pigmentos fotossintéticos em plantas de sorgo submetidas à deficiência hídrica. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PROGRESSO DA CIÊNCIA, 60., 2008, Campinas. **Anais...** Campinas: SBPC, 2008. 1 CD-ROM.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAMOS, P. **Agroindústria canavieira e propriedade fundiária no Brasil.** São Paulo: Hucitec, 1999. 243 p.

RIBEIRO, P.A.A.; COELHO, R.D.; TEIXEIRA, M.B. Entupimento de tubos gotejadores convencionais com aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via duas qualidades de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, p. 279-287, mar./abr. 2010.

RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C.C. Palhiço como fonte de energia. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar.** 2. ed. Campinas: IAC, 2010. v. 2, p. 791-806.

RODELLA, A.A.; FERRARI, S.E. A composição da vinhaça e efeitos de sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 7, p. 380-387, 1977.

- RODRIGUES, D.J. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p.
- ROSSEL, C.E.V. Álcool de celulose, por hidrólise ácida, com solvente orgânico. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 12, p. 11, abr./jun. 2007.
- ROSSETTO, A.J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.
- ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 80-85, 2004.
- _____. A cana-de-açúcar e a questão ambiental. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. 2. ed. Campinas: IAC, 2010a. v. 2, p. 869-882
- _____. Os avanços na tecnologia produção da cana: resíduos ou subprodutos? **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 24, p. 24-26, 2010b.
- ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.; TAVARES, S. Potássio. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. 2. ed. Campinas: IAC, 2010. v. 1, p. 289-311.
- SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; SOUZA, K.J.; SOUZA 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**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, set./out. 2007.
- SANTOS, M.B. **Proposta metodológica para o planejamento do uso agrícola da vinhaça, considerando os seus aspectos ambientais, por meio de sistema de informações geográficas**. 2000. 237 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- SCARPARI, M.S. **PREDPOL: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. 2007. 120 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 61, p. 486-491, 2004.
- SILVA, A.J.N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 76-83, jan./mar. 2006.
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, jul./set. 2006.
- SILVA, G.M.A. Efeitos da aplicação da vinhaça como fertilizante em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v. 7, p. 9-14, 1978.

SILVA, G.M.A.; CASTRO, L.J.P.; MAGRO, J.A. Comportamento agroindustrial da cana-de-açúcar em solo irrigado e não-irrigado com vinhaça. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, 4., 1976, Águas de Lindóia. **Anais...** São Paulo: Copersucar, 1976. p. 107-122.

SILVA, M.A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 655-661, 2008.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

SOUSA, A.L.B.; SILVA, L.C. Variáveis de acidez de latossolo ácido tratado com biossólido alcalinizado fosfatado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 1 CD-ROM.

SOUZA, R.N.; SOUZA, A.M.O.; CARVALHO, R.E.R.; SANTOS, R.L.; MEDEIROS, M.R.F.A.; SILVA, S.A.M.; BEBÉ, F.V. Avaliação da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 10., 2010, Recife. Recife: UFRPE, 2010. 1 CD-ROM.

SPADOTTO, C.A. **Gestão de resíduos:** realizações e desafios no setor sucroalcooleiro. 2008. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2008/gestao-de-residuos-realizacoes-e-desafios-no-setor-sucroalcooleiro>>. Acesso em: 22 jul. 2012.

SZMRECSÁYN, T. Tecnologia e degradação ambiental: o caso da agroindústria canavieira no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 24, n. 10, p. 72-74, out. 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Berkeley: The Benjamin/Cummings Publ., 1998. 559 p.

_____. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2002. 720 p.

TÁVORA, F.L. **História e economia dos biocombustíveis no Brasil**. Brasília: Senado Federal, 2011. 78 p. (Textos para Discussão, 89).

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Do álcool ao etanol:** trajetória única. 2008. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

_____. **Bioeletricidade:** a energia verde e inteligente do Brasil. 2011. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 22 jul. 2012.

UNICADATA. **Histórico de produção e moagem**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils:** version 1.0. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1991. 93 p. (EPA Report 600/2-91/065).

VILELA, E.F.; BÜLL, L.T. Avaliação do crescimento de plantas de milho em função de doses de potássio e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 281-289, 1999.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. Estimativa de graus-dia acumulado acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, v. 30, p. 1-7, 1972.

VITTI, G.C.; QUEIROZ, F.E.C.; OTTO, R.; QUINTINO, T.A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, 2005. 78 p. (Palestra apresentada à equipe técnica da STOLLER, Bebedouro, SP. 2005).

WALTER, A.; ENSINAS, A.V. Combined production of second – generation biofuels and electricity from sugar-cane residues. **Energy**, Oxford, v. 35, p. 874-879, 2010.

WALTER, A.; ROSILLO-CALLE, F.; DOLZAN, P.; PIACENTE, E.; BORGES, K.C. Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 32, p. 730, 2008.

WIENDENFELD, R. Effects of irrigation water salinity and electrostatic water treatment for sugarcane production. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 85-88, 2007.

YOTAMO, A.F.D. **Balanço energético das caldeiras e linhas de vapor**. 2011. 63 p. Monografia (Trabalho de licenciatura). Universidade Eduardo Mondlane. Moçambique. 2011.

ZVEIBIL, V.Z. Biocombustíveis: oportunidades e cuidados para o desenvolvimento sustentável. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 9, p. 8-10, jul./set. 2006.