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

**Aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial e seus efeitos
nos perfis de distribuição iônica e atributos físicos e químicos de
um Nitossolo**

João Alberto Lelis Neto

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

**Piracicaba
2012**

João Alberto Lelis Neto
Engenheiro Agrônomo

Aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial e seus efeitos nos perfis de distribuição iônica e atributos físicos e químicos de um Nitossolo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

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

**Piracicaba
2012**

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

Lelis Neto, João Alberto

Aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial e seus efeitos nos perfis de distribuição iônica e atributos físicos e químicos de um Nitossolo / João Alberto Lelis Neto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

138 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Cana-de-açúcar 2. Fertilização 3. Gotejamento subsuperficial 4. Lixiviação do solo 5. Nitossolos - Propriedades físico-químicas 6. Vinhaça I. Título

CDD 631.8
L541a

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

Dedico

Aos meus pais,

José Junqueira Lelis e Maria Alice Conte Maluf, pois sempre me deram força para continuar meus estudos, apesar das dificuldades, e me ensinaram além de tudo a ser uma pessoa honesta.

Aos meus irmãos,

Haysar Alfredo Conte Maluf Lelis e José Renato Maluf Lelis, que nos momentos difíceis sempre me ajudaram, e me deram apoio e conselhos importantes. Amo vocês!!!

À minha noiva

Patrícia Maria Pinto, que além de ser minha companheira em todos os dias, sempre acreditou em mim. Todos os obstáculos encontrados, juntos conseguimos ultrapassá-los. Obrigado pelo apoio, compreensão, paciência, amor, amizade e carinho... EU TE AMO!!!!

Aos seus pais e irmãs, que me aceitaram na família com muito amor e carinho. Obrigado!!!

Aos meus avós,

João Alberto Lelis e Haysar Maluf (em memória) e Jovina Junqueira Lelis e Arayde Conte, que mesmo distante, nunca deixaram de me apoiar.

Aos meus avós elegidos

Sr. Luiz Sacchetto (em memória), por ter tido a oportunidade de passar alguns momentos jamais esquecidos, como nossas pescarias, Sr. Pedro Altino da Silva (em memória) pelos conselhos e por sempre acreditar no meu potencial. Os senhores se foram, porém, sempre estarão guardados na minha memória pelos momentos incríveis que passamos juntos.

Sra. Orphélia Domenichelli da Silva, por ser uma pessoa de coração e alma puríssima. Alguém que eu não poderia deixar de conhecer e ter o prazer de conviver.

Ao meu tio,

Ricardo Junqueira Lelis, pelos conselhos dados. Jamais esquecerei disso! Obrigado, meu tio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso pai;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Biosistemas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade e suporte concedidos;

Ao CNPq, pela concessão da bolsa;

À FAPESP pelo auxílio financeiro dado ao projeto;

Ao Prof. Jarbas Honorio de Miranda, pelo apoio, pela amizade, orientação no decorrer do curso e pela confiança na realização da pesquisa;

Aos Professores Marcos Vinícius Folegatti e Rubens Duarte Coelho, pela oportunidade de trabalharmos juntos e a todos os professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas, pelos conhecimentos fornecidos;

Ao Prof. Marcos Yassuo Kamogawa, pela grande ajuda na parte química da pesquisa;

Aos funcionários do Departamento: 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, pela recepção, auxílio na realização do trabalho e principalmente pela amizade;

Aos amigos Cícero Rêne A. B. Júnior, pelos momentos de descontração a respeito de nossa criação de pássaros, e ao Roque Emmanuel da Costa Pinho, que acreditou no experimento e deu sequência fazendo um trabalho extraordinário.

Em especial, ao amigo Fábio Jordão Rocha, que desde o início lutou comigo no nosso experimento enfrentando dias bons e ruins. Valeu, meu filho! E aos meus estagiários Pedro Henrique Chinelato, Luciano Alves de Oliveira e Lucas Marin Viani (*in memoriam*).

Aos colegas e amigos que tive o prazer de conhecer e conviver e que tornaram o doutorado mais agradável; e

Àquelas pessoas que de alguma forma direta ou indireta me ajudaram na conclusão dessa pesquisa.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importa quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

(Dalai-Lama)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	21
1 INTRODUÇÃO.....	25
2 OBJETIVOS.....	29
2.1 Principais.....	29
2.2 Específicos	29
3 DESENVOLVIMENTO	31
3.1 Cultura da cana-de-açúcar	31
3.2 Características da vinhaça e sua aplicação	32
3.3 Tecnologia para aplicação da vinhaça	36
3.4 Irrigação por gotejamento subsuperficial.....	38
3.5 Monitoramento da dinâmica de solutos por extratores de solução.....	41
3.6 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça.....	42
3.7 Alterações nas características físicas do solo mediante adição de vinhaça.....	45
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
4.1 Localização e caracterização experimental.....	47
4.2 Instalação do experimento	48
4.3 Tratamentos e delineamento experimental	51
4.4 Plantio da cana-de-açúcar.....	52
4.5 Instalação dos tensiômetros e extratores de solução.....	53
4.6 Instalação e manejo da irrigação por gotejamento subsuperficial	55
4.7 Aquisição e aplicação da vinhaça.....	57
4.8 Monitoramento dos componentes químicos da solução do solo	59
4.9 Monitoramento da vazão dos gotejadores quanto ao entupimento	60
4.10 Monitoramento das características físicas do solo	62
4.11 Colheita da cana-de-açúcar	67
4.12 Análise estatística dos dados	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
5.1 Balanço hídrico e Condições climáticas	71

5.2	Monitoramento da umidade do Solo	73
5.3	Distribuição do íon nitrato no solo	77
5.4	Distribuição do íon potássio no solo	85
5.5	Distribuição dos íons cálcio, sódio e enxofre no solo.....	91
5.6	Distribuição do pH e da condutividade elétrica no solo.....	106
5.7	Avaliação das características físicas do solo	117
5.7.1	Granulometria.....	117
5.7.2	Condutividade Hidráulica e Umidade na Capacidade de Campo.....	122
5.8	Entupimento dos gotejadores	124
5.9	Produtividade da cana-de-açúcar	126
6	CONCLUSÕES	127
	REFERÊNCIAS	129

RESUMO

Aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial e seus efeitos nos perfis de distribuição iônica e atributos físicos e químicos de um Nitossolo

O aumento da produção de cana-de-açúcar no Brasil é de grande relevância para o cenário agroindustrial atual do país. Entretanto, acarreta a um aumento na geração de subprodutos do setor de usinas sucro-alcooleira. Dentre esses subprodutos destaca-se a vinhaça, pois possui uma série de nutrientes em sua composição. Diante do grande volume de vinhaça obtido e de sua aplicação em áreas de cana-de-açúcar, sugerem-se pesquisas em relação à sua aplicação e ao deslocamento de seus principais componentes químicos no perfil do solo, com a intenção de prever e evitar a contaminação de águas subterrâneas. Portanto, durante o primeiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, os objetivos dessa pesquisa foram: avaliar a distribuição de alguns componentes químicos da vinhaça (nitrato, potássio, cálcio, enxofre e sódio), avaliar a variação de alguns atributos químicos do solo (pH e condutividade elétrica), verificar a ocorrência de variações em algumas propriedades físico-químicas de um Nitossolo (granulometria, condutividade hidráulica e umidade do solo na capacidade de campo), bem como, avaliar o entupimento de gotejadores e a produtividade da cana-de-açúcar, diante da aplicação de vinhaça, via gotejamento subsuperficial. A pesquisa foi conduzida na área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, diante de um delineamento estatístico inteiramente casualizado com 6 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos implantados foram: T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb ($176 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), T4: Fertirrigada com dose Cetesb ($352 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb ($704 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb ($1056 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). A aplicação de vinhaça foi feita aos tratamentos em um intervalo de tempo quinzenal. As avaliações foram feitas no início e ao final do ciclo da cultura nas camadas de 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m. Diante dos resultados obtidos pôde-se concluir que a distribuição dos íons está diretamente relacionada com o volume de aplicação da vinhaça e de uma maneira geral 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. As características físicas do solo não apresentaram variações significativas diante da aplicação de vinhaça, mesmo com altos valores de concentração, durante o primeiro ano de avaliação, porém, sugere-se também um maior intervalo de tempo de aplicação e avaliação. O gotejador independente do tratamento não apresentou nenhum tipo de entupimento diante da aplicação de vinhaça e notou-se um aumento da produtividade de cana-de-açúcar diante da aplicação de vinhaça, via gotejamento subsuperficial.

Palavras-chave: Fertirrigação; Vinhaça; Cana-de-açúcar; Lixiviação; Gotejamento subsuperficial

ABSTRACT

The effect of vinasse application by subsurface drip irrigation on ion distribution profile and physical and chemical attributes in nitosol soil

The increase in sugarcane production in Brazil shows a great relevance to the current agribusiness scenario of the country. However, it may also result in an increase of the by-product generation from sugar mills. Among these by-products, the vinasse stands out because of its diverse nutrient composition and its use in the sugarcane production as a fertilizer. Given the large volume of vinasse produced and their application in sugarcane fields, there is a need to study fate and transport of different chemical constituents of vinasse through the soil profile to prevent groundwater contamination. The objectives of this study are to evaluate the distribution of important chemical components of vinasse (nitrate, potassium, calcium, sulfur and sodium), to evaluate the variation of soil chemical properties (pH and electric conductivity (EC)), to verify the occurrence of physico-chemical property (grain size, hydraulic conductivity and soil moisture at field capacity) variation in Nitosol soil, as well to evaluate the clogging in drip irrigation system and sugarcane yield under vinasse application by subsurface drip irrigation during first sugarcane cycle. The research was carried out at the experimental site of the Department of Biosystems Engineering (ESALQ/USP), in completely randomized experimental design with six treatments and four replications. The treatments deployed were: T1: no irrigation with conventional fertilization, T2: fertigated without vinasse, T3: fertigated with $\frac{1}{2}$ Cetesb dose ($176 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), T4: fertigated Cetesb dose ($352 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), T5: fertigated with 2x Cetesb dose ($704 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), and T6: fertigated with 3x dose Cetesb ($1056 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). The vinasse treatment were applied on a biweekly basis. Chemical transport and soil sample analysis were done at the beginning and the end of the cycle in four layers, each with thickness of 0.2 m. Based on these results, it is concluded that the ions distribution is directly related to the application volume of vinasse and in general, there was an increase in pH and EC in the soil, in relation to the increase in the applied volume. Since the duration of this study was one year, the experiments with larger time interval might show a distinct relationship between variation in soil chemical properties and the volume of vinasse applied. However, the analysis did not show significant variation in soil physical characteristics before and after the application of vinasse, even with high concentration values during the first year of the study. This indicates a need for a longer time of application and evaluation. The drip irrigation system used for vinasse application did not show any kind of clogging during the study period and the sugarcane yield increased with vinasse application by subsurface drip irrigation.

Keywords: Fertigation; Sugarcane; Soil leaching; Subsurface drip irrigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista aérea da área do Departamento de Engenharia de Biossistemas (ESALQ/USP) na Fazenda Areão (Piracicaba-SP) e da área experimental. ...	47
Figura 2 - Valores médios mensais registrados durante a condução do experimento (abril de 2010 a fevereiro de 2011) referentes à: temperatura média do ar e radiação global (A), precipitação (B), umidade relativa do ar (C), velocidade do vento (D).	48
Figura 3 - Preparo do solo (A), Plantio a lanço da crotalária (B), Vista da germinação da crotalária (C) e Altura da crotalária (D).....	50
Figura 4 - Crotalária (A) e Incorporação da crotalária (B).....	50
Figura 5 - Distribuição dos tratamentos, sendo T (tratamento) e R(repetição).	51
Figura 6 - Esquema do sistema combinado ou abacaxi.	52
Figura 7 - Preparo das mudas e etapas do plantio da cana, variedade CTC 12.....	53
Figura 8 - Abertura dos orifícios com trado de rosca (A), vista dos orifícios para instalação dos extratores e tensiômetros (B), manuseio da cápsula para auxiliar no contato solo-cápsula (C), e tensiômetros instalados (D).	54
Figura 9 - Abertura da valeta para enterrar a linha principal (A), Instalação dos conectores iniciais (B), vista do início da linha instalado (C) e vista dos cavaletes (D).	55
Figura 10 - Manejo da irrigação utilizando o tensiômetro (A) e manejo utilizando a sonda Diviner 2000 (B).	56
Figura 11 - Caixas reservatório utilizadas para armazenar e posteriormente distribuir para o sistema de gotejamento subsuperficial a aplicação de vinhaça e fertirrigação (A) e entrega da vinhaça pelo caminhão (B).	59
Figura 12 - Bomba de vácuo (A) e detalhe da aplicação do vácuo (B).	59

Figura 13 - 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).	61
Figura 14 - Trados: Holandês (A); Uhland (B) e Trado para amostras indeformadas (C).	63
Figura 15 - Etapas da análise granulométrica: Mesa agitadora horizontal (A); Agitação da amostra (B); Leitura com o densímetro de Bouyoucos (C) e Detalhe da leitura (D).....	64
Figura 16 - Triângulo de classificação textural de solos segundo Santos et al. (2005).	65
Figura 17 - Módulo do permeâmetro de carga constante.	66
Figura 18 - Vista aérea e frontal da área experimental, respectivamente, após o vento (A) e (B).	68
Figura 19 - Pesagem dos colmos (A) e Pesagem da massa verde (B).	68
Figura 20 - Extrato do balanço hídrico mensal durante o ciclo da cana planta	71
Figura 21 - Distribuição da umidade do solo, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011.....	75
Figura 22 - Distribuição da umidade do solo, 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.....	76
Figura 23 - Distribuição do íon nitrato, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011.....	80

- Figura 24 - Distribuição do íon nitrato, 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. 81
- Figura 25 - Distribuição do íon potássio, 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..... 87
- Figura 26 - Distribuição do íon potássio, 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. 88
- Figura 27 - Distribuição do íon cálcio, 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..... 93
- Figura 28 - Distribuição do íon cálcio, 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. 94
- Figura 29 - Distribuição do íon sódio, 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..... 95
- Figura 30 - Distribuição do íon sódio, 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. 96

- Figura 31 - Distribuição do íon enxofre, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011..... 97
- Figura 32 - Distribuição do íon enxofre, 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. 98
- Figura 33 - Distribuição do pH, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011. 108
- Figura 34 - 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. 109
- Figura 35 - Distribuição da condutividade elétrica, nos tratamentos 1, 2 e 3 (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb), às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, Piracicaba, SP, 2011..... 110
- Figura 36 - 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..... 111
- Figura 37 - Distribuição da argila, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb, 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. 118

- Figura 38 - Distribuição do silte, nos diferentes tratamentos ((T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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. 119
- Figura 39 - Distribuição da areia, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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. 119
- Figura 40 - Distribuição da argila dispersa em água, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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. 120
- Figura 41 - Distribuição do grau de floculação, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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. 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (PRADA et al., 1998).....	35
Tabela 2 - Análise química do Nitossolo.	49
Tabela 3 - Análise física do Nitossolo.	49
Tabela 4 - Descrição dos tratamentos.	51
Tabela 5 - Esquema da análise de variância.	51
Tabela 6 - 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 no início do experimento, Piracicaba, SP, 2010	57
Tabela 7 - Valores obtidos nas análises químicas da vinhaça.	57
Tabela 8 - Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar da estação de 12 meses.....	58
Tabela 9 - Variáveis e respectivos equipamentos utilizados para a sua determinação nas amostras.	60
Tabela 10 - Valores médios mensais de dados meteorológicos (Piracicaba, SP).	72
Tabela 11 - Valores médios de nitrato nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	83
Tabela 12 - Valores médios de nitrato nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	84
Tabela 13 - Valores médios de potássio nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	89

Tabela 14 - Valores médios de potássio nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	90
Tabela 15 - Valores médios do cálcio nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	100
Tabela 16 - Valores médios do cálcio nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	101
Tabela 17 - Valores médios do sódio nas profundidades de 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	102
Tabela 18 - Valores médios do sódio nas profundidades de 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	103
Tabela 19 - Valores médios do enxofre nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	104
Tabela 20 - Valores médios do enxofre nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	105
Tabela 21 - Valores médios do pH nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	112
Tabela 22 - Valores médios do pH nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	113
Tabela 23 - Valores médios da condutividade elétrica nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	115
Tabela 24 - Valores médios da condutividade elétrica nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	116
Tabela 25 - Valores médios das características físicas do solo nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	122

Tabela 26 - Valores médios da condutividade hidráulica nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	123
Tabela 27 - Valores médios da umidade do solo na capacidade de campo nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012 ¹	124
Tabela 28 - Valores calculados para o teste de uniformidade de distribuição do sistema de irrigação	125
Tabela 29 - Valores de vazão média, desvio padrão e coeficiente de variação, para os tratamentos (T2 a T6) (T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb)	125
Tabela 30 - Produtividade de colmos de cana-de-açúcar	126
Tabela 31 - Massa verde das ponteiros de cana-de-açúcar.....	126

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem grande importância no cenário sócio-econômico brasileiro, pois é responsável por aproximadamente 2% do produto interno bruto brasileiro e possibilita o uso de fonte de energia renovável, o que gera divisas como a exportação de açúcar e álcool, além de ser uma atividade de criação de 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos (ProCana Brasil, 2011).

Com o advento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na década de 70, a cultura da cana-de-açúcar estendeu-se para diversas áreas do país. Atualmente, a área cultivada no Brasil com cana-de-açúcar é da ordem de 8,5 milhões de hectares representando 3,8% da área agricultável do país, sendo que o Estado de São Paulo possui a maior participação, ficando em torno de 4 milhões de ha; seguido por Minas Gerais (649 mil ha); Goiás (599 mil ha); Paraná (582 mil ha); Alagoas (438 mil ha); Mato Grosso do Sul (396 mil ha) e Pernambuco (346 mil ha), representando 3,5% da área agricultável do país (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011).

A produção total de cana que foi moída na safra 2010/11 é de 625 milhões de toneladas, com incremento de 3,40% em relação à safra 2009/10, o que significa que haverá aproximadamente 21 mil toneladas a mais para moagem nesta safra, porém a produtividade média brasileira foi estimada em 78 ton ha^{-1} , com rendimento de 4,6% menor em comparação com a safra 2009/10, principalmente devido à ocorrência de condições climáticas adversas (CONAB, 2011).

Do total da produção de cana-de-açúcar, 336 mil toneladas (53,8%) serão destinadas à produção de etanol, gerando um volume total de 27 milhões de litros e, conseqüentemente, aumentará a produção do seu principal subproduto, a vinhaça, podendo alcançar o volume de 332 milhões de litros (aproximadamente 1 L de etanol gera 13 L de vinhaça).

Nesse sentido, nos últimos anos, o emprego da vinhaça como fertirrigação na cana-de-açúcar vem merecendo papel de destaque principalmente quando se pensa na produção de efluentes do setor agroindustrial, uma vez que a vinhaça constitui-se em um efluente com elevada quantidade de elementos químicos além de uma elevada carga orgânica.

O Brasil conta com 653 mil ha fertirrigados, correspondendo a 12,44% da área cultivada, podendo atingir, dentro de um uso racional de aplicação de vinhaça, cerca de 34,4% da área cultivada. Para o Estado de São Paulo estima-se em 79,5% da área potencial para aplicação de vinhaça, sendo que sua aplicação no campo, pode ser feita por diferentes métodos de irrigação, lembrando que, segundo Mاتيoli e Menezes (1984), todos os sistemas de aplicação apresentam limitações, que resultam em desperdício de vinhaça e prejuízos no custo global de produção do açúcar e do álcool.

De certa forma, a experiência do setor sucroalcooleiro também tem influenciado os fabricantes de equipamentos de irrigação, que estão apresentando novas tecnologias, tais como a rede adutora móvel, a barra irrigadora, o pivô central rebocável, e mais recentemente o gotejamento subsuperficial. A irrigação localizada e o uso do gotejamento enterrado, prática que visa à aplicação da água diretamente no sistema radicular, em pequena intensidade e alta frequência possibilita manter o solo próximo à capacidade de campo, tornando esse sistema cada vez mais atrativo, principalmente com o destaque no aumento da produtividade, aumento da longevidade dos canaviais e a possibilidade do parcelamento da adubação.

Dessa forma, a vinhaça quando depositada no solo, pode promover melhoria em sua fertilidade; todavia, as quantidades não devem ultrapassar sua capacidade de retenção de íons, ou seja, as dosagens devem ser mensuradas de acordo com as características de cada solo e para as diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Estudos desde 1952 comprovam que a vinhaça já provocava nos órgãos de controle do ambiente e, particularmente na comunidade científica, alguma preocupação quanto a seus impactos sobre a qualidade dos recursos naturais (por muito tempo a vinhaça foi simplesmente jogada nos rios, poluindo-os). Dessa forma, a vinhaça foi proibida por lei de ser lançada nos rios, lagoas e baixios no Decreto-Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967. Atualmente a dosagem máxima por hectare de vinhaça a ser aplicada no Estado de São Paulo é regulamentada pela Normativa P4.231, 2005 da CETESB, variando normalmente entre 250 a 450 m³ ha⁻¹, dependendo do tipo de solo.

Porém, a movimentação dos componentes químicos da vinhaça varia de acordo com o tipo de solo, podendo causar desequilíbrio de nutrientes, além de induzir a uma saturação do solo, ocasionando problemas de lixiviação de seus constituintes para águas subterrâneas. Portanto, o conhecimento da composição da

vinhaça e dos mecanismos de deslocamento dos seus componentes químicos no solo é de fundamental importância, principalmente para orientação quanto às dosagens a serem aplicadas a campo.

Portanto, diante do exposto anteriormente, este trabalho tem como hipótese se as condições de aplicação de vinhaça podem influenciar no deslocamento dos componentes químicos da vinhaça e se a aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial pode causar alterações nas características físicas (em termos de retenção de água) de um Nitossolo. E teve como objetivos principais e específicos, o que se segue:

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

Os objetivos principais da pesquisa foram: avaliar a distribuição dos componentes químicos da vinhaça e seus efeitos nas características físicas do solo (no sentido da capacidade de retenção de água no solo), bem como, avaliar o desempenho do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial (em termos de variações de vazão) diante da aplicação de vinhaça.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa, diante da aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial, foram:

- ✓ Monitorar em um Nitosolo, por extratores de solução, a distribuição dos íons nitrato (NO_3^-), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), enxofre (SO_4^{4-}), sódio (Na^+) e atributos químicos do solo (pH e condutividade elétrica (CE));
- ✓ Verificar as alterações na condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) e valores da umidade do solo (capacidade de campo) devido à aplicação de vinhaça;
- ✓ Verificar a eficiência do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, ao longo do primeiro ano da cultura; e
- ✓ Verificar a resposta da cana-de-açúcar em termos de produtividade quando submetida a diferentes tratamentos de aplicação de vinhaça.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Cultura da cana-de-açúcar

Atualmente, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, não só pelo seu elevado destaque no contexto doméstico e internacional, mas também pela dinâmica apresentada nos últimos anos e pelas perspectivas de crescimento (RODRIGUES, 2006).

A cana-de-açúcar está diretamente ligada à história brasileira. Desde o século XVI, quando nossas terras foram descobertas por espanhóis e portugueses, o açúcar já começava a ser produzido e a cultura desenvolveu-se no nordeste por meio de engenhos, que já exportavam para países da Europa, embora em pequena escala.

No Brasil, seu cultivo teve começo logo no início da colonização, onde os primeiros relatos dessa cultura datam de 1532 em São Vicente-SP, mas foi nos estados da região Nordeste que a cultura fixou-se inicialmente. No final do século XVI, os estados de Pernambuco e Bahia já possuíam uma centena de engenhos (FIGUEIREDO, 2008) e em meados da década de 1970, com a crise do petróleo, o Brasil se tornou o maior produtor mundial de etanol (MOZAMBANI et al., 2006).

Com a criação do Plano Nacional de Produção de Álcool (Proalcool) em 1975, houve uma grande expansão do setor sucroalcooleiro, principalmente no interior paulista, colocando o Brasil como um país de destaque na produção de energias renováveis (MOZAMBANI et al., 2006).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2011), diante de dados da safra 2010/2011, estima-se que a produção de cana-de-açúcar no Brasil, para todos os usos, será em torno de 625 milhões de toneladas, representando um incremento de 3,4% referente ao ano passado, porém, a produtividade caiu cerca de 4,6% referente à safra 2009/2010, principalmente devido a algumas condições climáticas adversas.

Com a expansão da área cultivada de cana-de-açúcar, para áreas antes consideradas marginais, principalmente por deficiência hídrica, houve um aumento da necessidade de uso da irrigação, não apenas para a disposição de vinhaça, mas

para atender à demanda evaporativa das novas regiões, tornando-se uma tecnologia fundamental para se obter produtividades adequadas e competitivas.

A produtividade da cana-de-açúcar fica entre 70 a 120 t ha⁻¹, em condições climáticas adequadas, cujo valor pode ser considerado como sendo um bom rendimento para o cultivo em condições de sequeiro. Mas, na maioria das nossas regiões a produtividade da cana sob o cultivo de sequeiro está bem abaixo desses valores e em condições de cana irrigada, é comum ultrapassar 100 t ha⁻¹.

Segundo Veiga et al. (2006) a produtividade da cana-de-açúcar no Brasil no período de 1970 a 2004, aumentou de forma significativa, variando de 46,23 t ha⁻¹ (na safra 1970/71) a 73,88 t ha⁻¹ (na safra 2004/05), podendo alcançar produtividades maiores com o uso da técnica de irrigação.

Entretanto, dentre as mais de 200 variedades de cana-de-açúcar existentes e dos diversos trabalhos que evidenciam o efeito da irrigação na produtividade da cana-de-açúcar, o desenvolvimento de variedades que respondem à irrigação ainda é pouco, sendo necessário buscar variedades que respondam à irrigação, mesmo sendo desenvolvidas muitas vezes para resistir a condições extremas, como por exemplo a verânicos.

3.2 Características da vinhaça e sua aplicação

A vinhaça, também conhecida como vinhoto ou restilo, é o principal resíduo do processo de fabricação de álcool. Trata-se de um resíduo líquido, apesar de sua classificação ser de um “resíduo sólido”, pela falta de tratamento e sendo disposto diretamente no solo (VOLL, 2005).

Quando lançada ao rio, possui alto poder poluidor (cerca de cem vezes maior que o esgoto doméstico, decorrente do alto teor de matéria orgânica, baixo pH e elevada corrosividade), sendo altamente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora (SILVA, 2007) e também possui elevado valor como fertilizante.

Dependendo da sua composição, a vinhaça pode substituir parcial ou totalmente a adubação mineral da cana, especialmente em solos que não respondem ao nitrogênio. Mesmo que esta substituição seja parcial, a economia de adubos é importante (MELO, 2010). Além disso, o uso da vinhaça como adubo traz alguns benefícios ao solo, tais como, o aumento da matéria orgânica, do pH, da

disponibilidade de nutrientes, da retenção de cátions e da atividade microbiana, além de melhorar a estrutura física do solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983).

A aplicação de vinhaça na lavoura, bem como a fertirrigação, são práticas adotadas por todas as usinas, sendo tecnologias conhecidas e bem definidas com inúmeros ensaios que comprovam os resultados positivos obtidos na produtividade agrícola, associados à economia dos adubos minerais (PENATTI et al., 1988). Segundo a Usina Jalles Machado, em entrevista ao Jornal Cana (2007), a fertirrigação possibilita um aumento aproximado de 10 toneladas de cana por hectare na produtividade agrícola.

Há também economia com despesas de fertilizantes, pois a vinhaça, além de atender à necessidade de potássio do canavial, possui micronutrientes e matéria orgânica. Assim sendo, a grande vantagem do emprego da vinhaça é que ela pode substituir, em grande parte, os nutrientes da adubação mineral, proporcionando um aumento na produtividade da cana-de-açúcar devido à sua aplicação (AGUJARO, 1979). No entanto, apesar dos efeitos benéficos da vinhaça no solo, Centurión et al. (1989) alertam que, quando aplicada em altas taxas, conduz a efeitos indesejáveis, como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, poluição do lençol freático e, até, salinização do solo.

Para controlar a quantidade de vinhaça aplicada pelas usinas, minimizando o risco da contaminação do lençol freático, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005) mediante diversos estudos, propôs uma equação para efetuar a quantidade máxima de vinhaça a ser aplicada aos solos agrícolas sem que seja prejudicial, contendo características do solo e concentrações de potássio (Equação 1):

$$VV = \frac{[(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185]}{kvi} \quad (1)$$

onde:

VV - volume de vinhaça a ser aplicado, m³ ha⁻¹;

0,05 - 5% da Capacidade de Troca Catiônica (CTC);

CTC - capacidade de troca catiônica, expressa em cmolc dm⁻³ a pH 7,0;

ks - concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm⁻³, à profundidade de 0,0 a 0,80 m;

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

185 - quantidade de “kg” de K_2O extraído pela cultura por ha, por corte; e

kvi - concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O m}^{-3}$, apresentada em boletim de resultado analítico.

A CETESB, órgão fiscalizador do meio ambiente no Estado de São Paulo, baseia-se no teor de potássio na vinhaça para o estudo de sua aplicação no solo. O potássio em excesso pode deixar a cana-de-açúcar com aspectos de queimaduras, seca, e a percolação do potássio no solo pode atingir e contaminar o lençol freático. Embora, segundo Silva (2007), o teor de potássio retido no solo a 0,5 m de profundidade não é relevante, uma vez que o líquido acompanha a drenagem interna do perfil do solo, não havendo a percolação até o lençol freático.

Segundo Glória (1983), a composição química da vinhaça é bastante variável e depende, principalmente, de fatores como a natureza e a composição da matéria prima, do sistema usado no preparo do mosto, do método de fermentação adotado, do sistema de condução da fermentação alcoólica, do tipo de levedura utilizada, do tipo de aparelho destilatório empregado, da maneira de destilação e do tipo de flegma separado (Tabela 1).

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

Esses resultados mostram que a vinhaça é um adubo orgânico muito rico em potássio, portanto, sua utilização e viabilidade em lavouras com fertirrigação já foram exaustivamente comprovadas no que tange ao seu efeito benéfico no aumento da produtividade agrícola e na longevidade da cana.

A vinhaça é aplicada em grande parte *in natura*, porém estudos com concentração da vinhaça vem mostrando o destino mais viável para esta vinhaça concentrada, uma vez que o seu investimento para concentração e novas tecnologias de aplicação tem que ser levado em conta (GONÇALVES, 2000).

A utilização desta vinhaça concentrada na lavoura só é possível até uma determinada concentração de sólidos solúveis (°Brix), isto se houver interesse em continuar com o sistema de dispersão já existente, tais como moto-bombas, canais de distribuição, tanques de armazenamento, etc. E a continuação da utilização do sistema adotado é a escolha mais economicamente vantajosa.

Em uma usina típica, o investimento inicial no transporte da vinhaça para a fertirrigação em uma única safra, podem ultrapassar R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais). Isto representa um gasto aproximado de R\$ 110,00 por tonelada de cana moída somente em vinhaça. Este gasto não inclui a vinhaça transportada por sistema de tubulações, que representa cerca de 5 % do volume total de vinhaça

produzido. Estes dados são referentes a uma usina com capacidade de moagem de 900.000 toneladas de cana-de-açúcar, produção de 600.000 litros de álcool e geração de um volume de vinhaça de $9.000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Cabe ressaltar que os custos apresentados dependem diretamente da infra-estrutura que a usina possui, podendo variar de uma indústria para outra (PEREIRA, 2009).

3.3 Tecnologia para aplicação da vinhaça

Inicialmente, a vinhaça era transportada e aplicada por caminhões tanques. Atualmente, existem também outras duas situações: aplicação da vinhaça *in natura* ou diluída com água e outros efluentes das usinas (águas de lavagem da cana, água de condensação, água de colunas barométricas, água de lavagem de pisos etc., conhecidas como águas residuárias).

Dentre as várias alternativas apresentadas para o uso da vinhaça, a que se mostrou mais econômica e eficiente do ponto de vista agrícola, e que, portanto, passou a ser difundida e adotada pela maioria das usinas, foi o seu uso como fertirrigação dos canaviais. O termo fertirrigação embora muito utilizado no setor, não é bem empregado, por não se tratar exatamente de uma irrigação no sentido do controle sobre as lâminas de água e na frequência que seria necessária. No caso da vinhaça, refere-se à aplicação do resíduo líquido que também causa o molhamento do solo (FREIRE; CORTEZ, 2000).

As inovações tecnológicas para aplicação da vinhaça modificaram os sistemas rudimentares de aplicação por inundação e por sulcos de infiltração. Uma adutora principal transportava a vinhaça para canais principais e estes chegavam aos sulcos de plantio por inundação ou por tubos de PVC com saídas para cada sulco, sendo que era necessária a declividade de 0,2 a 0,5%. Os sulcos eram abertos nas entrelinhas da cana (ROSSETTO, 1987). Esse sistema mostrava-se difícil e ineficiente, uma vez que a aplicação da vinhaça era muito irregular. Posteriormente, no final dos anos 70, passou-se a sistemas de aspersão com equipamentos semifixos, onde a vinhaça era bombeada dos canais principais por motobombas, que alimentavam tubulações laterais onde eram acoplados os aspersores. Esse sistema já permitia maior controle das doses de vinhaça aplicadas. Nos anos 80, a vinhaça passou a ser aplicada por aspersão com canhão hidráulico

que se deslocava em pequenos carregadores ao lado dos canais que traziam a vinhaça.

Posteriormente, a introdução do carretel enrolador foi um avanço tecnológico para a aplicação da vinhaça. A aspersão é realizada por um equipamento autopropelido com tubulação de polietileno de média densidade, que permitiu maior automação, maior rendimento operacional, maior eficiência, menor uso de mão-de-obra e menor número de mudanças e transporte de equipamentos (LEME et al., 1987).

Contudo, inovações tecnológicas ainda estão em andamento diante de testes com uma barra irrigadora de 36 a 54 m de largura com aspersores *spray* para vazão de 25 a 150 m³ h⁻¹. A barra é adaptada na extremidade da mangueira do carretel enrolador e permite redução na pressão de aplicação, melhorando a uniformidade. Equipamentos de pivôs centrais rebocáveis também estão sendo testados para a aplicação de vinhaça (LUZ, 2005).

O sistema de aplicação por aspersão com carretel enrolador, embora represente um menor investimento inicial frente a outros sistemas de irrigação, é o que apresenta o maior custo operacional para seu funcionamento (HERNANDEZ, 2006).

Em uma pesquisa realizada em 54 usinas do Brasil (25 no Estado de São Paulo), representando 22,5% da cana moída no Brasil, Nunes Jr. et al. (2004) verificaram que atualmente a vinhaça é distribuída preferencialmente por canais e aplicada por aspersão pelo sistema de carretel – rolão.

Por outro lado, existe a preocupação ambiental quanto à escassez de água e daí surge dentre os sistemas de irrigação, uma nova modalidade de irrigação localizada que é o uso do gotejamento subsuperficial, cuja prática visa a aplicação de água próxima ao sistema radicular, em pequena intensidade e alta frequência, o que possibilita manter o solo próximo da capacidade de campo, buscando aumentar a eficiência do uso da água, mediante a diminuição de perdas por evaporação e escoamento superficial, e consequentemente maior economia no uso desse recurso.

A experiência do setor sucroalcooleiro também tem influenciado os fabricantes de equipamentos de irrigação, que estão apresentando novos equipamentos e tecnologias. Com a implantação da legislação ambiental para utilização da vinhaça, certamente haverá o incremento da demanda por novas

tecnologias e equipamentos no sentido de otimizar a aplicação de vinhaça dentro de um contexto técnico econômico respeitando o meio ambiente (LUZ, 2005).

O gotejamento, por si só, pode ser mais uma alternativa para aplicação de vinhaça, principalmente nas áreas de expansão onde há necessidade de irrigação. Atualmente há mais de 7 mil hectares irrigados por gotejamento no Brasil (COELHO, et al., 2009). Sabe-se que o gotejamento já vem sendo utilizado em larga escala em outras culturas e que a irrigação localizada é a mais apropriada para a fertirrigação, pois permite manter, na zona limitada do solo disponível às raízes, umidade satisfatória e concentração ótima de nutrientes para o desenvolvimento da cultura (VILLAS BÔAS et al., 2002), satisfazendo pontualmente suas necessidades, conforme seu estágio de desenvolvimento (LI et al., 2003).

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

3.4 Irrigação por gotejamento subsuperficial

A eficiência na produção da cana-de-açúcar tem evoluído nos últimos anos de acordo com os ambientes produtivos encontrados. Estes ganhos na eficiência são resultados de melhorias nas práticas de manejo e tecnologia aplicada nos canaviais.

Com exceção da fase de maturação da cana-de-açúcar antes da colheita, a planta necessita de boa umidade no solo para uma melhor produtividade. Com a expansão dos plantios de cana-de-açúcar em regiões mais áridas e com solos menos férteis, a solução para esta expansão de forma segura é a irrigação.

A irrigação já exerce um papel fundamental como sendo um dos principais instrumentos para a modernização da agricultura brasileira, permitindo enormes benefícios ao cultivo da cana-de-açúcar.

O aumento da eficiência do uso da água e da produção de cana-de-açúcar pode ser alcançado pela irrigação localizada por gotejamento, o que possibilita o plantio em qualquer época do ano, acelerando o crescimento vegetativo,

proporcionando suprimento dos nutrientes conforme sua necessidade nutricional e aplicação controlada da vinhaça.

Na cana-de-açúcar o gotejamento vem sendo utilizado há décadas no Havaí e África do Sul. No Brasil, Vieira et al. (1983) já verificaram a viabilidade da técnica do gotejo comparado à rega por sulcos na cana-de-açúcar em ensaio conduzido na Escola de Engenharia de Piracicaba-SP. A tecnologia de irrigação por gotejamento vem passo a passo sendo incorporada na produção de mudas em usinas de açúcar, porém com necessidade de adaptação da agricultura de sequeiro para a irrigação.

Um aprimoramento na irrigação localizada via gotejamento foi a sua utilização enterrada, onde ela 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; LAMM et al., 2007). Portanto, estudos com problemas de intrusão radicular vêm buscando soluções como gotejadores especiais e aplicação de produtos químicos, aliados ao uso de filtros automáticos e mais eficientes tornaram possível a aplicação de água diretamente nas raízes.

Algumas vantagens relevantes no sistema de gotejamento enterrado é a razão de não possuir mais molhamento da superfície do solo, com isso a perda direta de água por evaporação do solo é reduzida ao mínimo, com acréscimo na eficiência do uso da água e redução no consumo de energia, pois o sistema opera com menor pressão do que outros sistemas pressurizados (NEUFELD, 2001; LAMM et al., 2007). Além de possibilitar a aplicação da água diretamente no sistema radicular, em pequena intensidade e alta frequência, possibilita manter o solo mais próximo à capacidade de campo, aumentando a eficiência do uso da água e diminuindo o escoamento superficial.

No cultivo de cana-de-açúcar, o parcelamento da adubação ao longo do ciclo da cultura é praticamente inviável, em razão do porte da cultura. Com o uso da irrigação é possível o parcelamento, e com o gotejo enterrado, tem-se uma melhor perspectiva no uso dos fertilizantes minerais e também da vinhaça.

A aplicação de fertilizantes via água de irrigação, onde pequenas doses de fertilizantes são aplicadas com maior frequência, dispõe para a planta a quantidade adequada de nutrientes para cada fase do seu desenvolvimento, reduzindo as perdas no solo, como a lixiviação, e aumentando a eficiência na aplicação dos fertilizantes para as plantas.

A vinhaça pode substituir parte dos nutrientes da adubação mineral. Sua utilização *in natura* via fertirrigação apresenta efeitos positivos sobre a produtividade agrícola (elevação da produtividade e prolongamento do ciclo da cana) devido ao incremento na produção de açúcar por hectare, sendo mais acentuado à medida em que se aumenta o número de cortes (CÓ JÚNIOR, 2008).

No sistema de manejo com vinhaça aplicam-se anualmente $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça diluída por ciclo da cultura, sendo a aplicação feita por aspersor com vazão de $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (SILVA, 2006).

Tasso Júnior (2007), estudando diferentes tipos de resíduo e doses de lodo de esgoto + KCl e vinhaça + uréia quanto a alterações nos valores de Açúcar Total Recuperável (ATR) em cana soca, verificou maiores teores de ATR nas parcelas que receberam os dois resíduos não associados quando comparados aos que receberam os dois resíduos associados. Reduções nos teores de POL cana e POL caldo podem ser observados em Camilotti et al. (2006) quando se aumentou em 100% a dose de N e K fornecidos via lodo de esgoto e via vinhaça, respectivamente, no 4º corte da cana-de-açúcar.

Do ponto de vista ambiental, a aplicação de resíduos no solo, em área total, contempla o efeito de diluição do mesmo, sugerindo essa forma de aplicação. Por outro lado, quando se considera o uso de resíduos na agricultura, o aproveitamento dos nutrientes e os efeitos benéficos que eventualmente tais produtos possam promover no solo são de interesse primordial. Assim, partindo-se desses princípios, pode-se afirmar que a aplicação localizada apresenta vantagens quanto à eficiência agrícola do resíduo como fertilizante (CÓ JÚNIOR, 2008).

Segundo Barbosa (2010), a fertirrigação com vinhaça em Nitossolo vermelho eutrófico, textura argilosa, ao longo dos quatro anos de cultivo proporcionou melhorias no sistema produtivo e promoveu um aumento na produção de colmos e no rendimento teórico de açúcar recuperável. Não ficou evidenciado qualquer tipo de redução na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar pela aplicação de vinhaça, além de ser possível o parcelamento da adubação ao longo do ciclo da cultura, atividade que hoje é praticamente inviável, em razão do porte da cultura. Com o uso da irrigação é possível o parcelamento, e com o gotejo enterrado, tem-se uma melhor perspectiva no uso dos fertilizantes minerais e também da vinhaça (BARBOSA, 2010).

3.5 Monitoramento da dinâmica de solutos por extratores de solução

A presença de nutrientes é fundamental para garantir a boa qualidade do solo e seu adequado funcionamento (GUILHERME, 2005). O seu monitoramento é fundamental para o sucesso da produção e quando ocorre escassez de nutrientes é necessária a aplicação de fertilizantes para que os níveis adequados, para o bom funcionamento dos cultivos, seja disponibilizado. Essa reposição de nutrientes pode ocorrer via adubação mineral e orgânica.

O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de adubos e fertilizantes, porém 50% dos adubos utilizados no País são importados, porém monitorar a distribuição dos nutrientes é essencial para um manejo adequado e minimizar o custo do produtor.

Uma fertilização inadequada provoca um desequilíbrio dos nutrientes essenciais diante da falta ou excesso destes (principalmente nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio) e tem por consequência um aumento desnecessário no custo de produção do cultivo, devido a um excesso de elementos nutritivos, podendo acarretar ao aparecimento de doenças nas plantas e efeitos ecológicos indesejáveis. Dentre os malefícios causados ao cultivo estão os processos de desidratação por falta de oxigênio, limitações no crescimento da planta, asfixia das raízes, etc. Contaminação das águas subterrâneas e superficiais, alteração no pH e salinização do solo são alguns efeitos ecológicos causados pela fertilização incorreta (VILLALBI; VIDAL, 1988; DOMÉNECH, 1995).

Uma alternativa para solucionar os problemas provocados por um manejo inadequado do solo seria o estabelecimento de processos racionais e controlados que dependessem, a todo o momento, das condições e características do terreno, do cultivo e do rendimento da produção que se deseja. O desenho desse processo requer uma análise do solo mais contínua e específica, obtendo-se informações pontuais de diferentes localidades do campo, características de uma tendência atual na agricultura que se denomina agricultura de precisão. Engloba o uso de tecnologias atuais para o manejo do solo, insumos e culturas, de modo adequado.

O uso dessa metodologia apresenta resultados satisfatórios a custo relativamente baixo. Portanto, a instalação dos extratores tem que ser criteriosa para melhorar a precisão dos resultados. Silva (2002) concluiu que, com o auxílio dos extratores de solução providos de cápsulas de cerâmica, é possível determinar a

concentração de nitrato e potássio com excelente precisão na solução do solo e com menor precisão a concentração de cálcio e magnésio.

Outro aspecto a ser observado é que a utilização do método da medição da condutividade elétrica da solução obtida com extrator de cápsula porosa é bastante eficiente, devido à sua facilidade, versatilidade e praticidade, quando comparada com o da solução diluída 1:2, desde que sejam conhecidas a umidade da pasta e a umidade no momento da extração (SILVA et al., 1999).

Segundo Silva (2002), o monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo extraído por cápsulas porosas permite evitar possíveis processos de salinização e ou deficiência nutricional. De acordo com Dias (2004), é possível, com auxílio de extratores de solução por cápsulas porosas, monitorar a concentração total de íons na solução do solo e manter a salinidade em nível desejado, controlando a condutividade elétrica da solução extraída.

3.6 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça

A fertirrigação com vinhaça é bastante difundida nas regiões canavieiras com resultados satisfatórios em relação às alterações químicas no solo, como o aumento de matéria orgânica, pH, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis. Quando aplicada adequadamente, cerca de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça equivale a uma adubação de 61 kg ha^{-1} de nitrogênio, 343 kg ha^{-1} de K e 108 kg ha^{-1} de Ca (MEDEIROS et al., 2003).

Cunha et al. (1981) relatam que a dinâmica do nitrogênio no solo tratado com resíduos orgânicos, tal como a vinhaça, é complexa, devido às transformações bioquímicas. O nitrogênio está presente na vinhaça, predominantemente na forma orgânica, e a mineralização é a primeira transformação biológica que ocorre no solo. O nitrato, por ser um ânion, não é retido em solos cuja predominância de cargas seja negativa apresentando, por isso, grande potencial de lixiviação, o que pode causar sérios problemas de poluição às águas subterrâneas, movendo-se com outros sais solúveis na frente de molhamento (LELIS NETO, 2008).

Lyra et al. (2002) concordam com Madejón et al. (2001) ao sugerirem que se pode esperar uma elevação na concentração de sais no solo e potencial risco de salinização diante da aplicação de vinhaça ao longo dos anos, considerando-se uma taxa de absorção de potássio pela planta, sua concentração na vinhaça e a baixa

condutividade elétrica (CE) observada no lençol freático, o que é um indicativo de reduzida lixiviação.

O nitrogênio (N) é o nutriente exigido em maior quantidade pela maioria das espécies vegetais, podendo ser absorvido como cátion (NH_4^+) ou ânion (NO_3^-) e está sujeito a um grande número de reações no solo, sendo difícil de ser manejado eficientemente.

A movimentação de nitrato para camadas profundas é indesejável, pois, além de não ser mais absorvido pelas plantas, pode contaminar as águas subterrâneas (AULAKH et al., 2000; OTTMAN; POPE, 2000).

Madejón et al. (2001) observaram que, com a retirada da vegetação após cada colheita, os teores de nitrato se elevavam nos solos e concluíram que sua lixiviação abaixo da zona radicular pode ser desprezível quando esses compostos são aplicados em áreas vegetadas com emprego de práticas agrícolas adequadas, como a utilização de áreas afastadas de nascentes ou de regiões com lençol freático superficial.

Atualmente, a disposição da vinhaça no campo é predominantemente realizada via aspersão, utilizando o autopropelido ou carretel enrolador, caracterizando-se por uma grande versatilidade, alta pressão e baixa eficiência e uniformidade de aplicação, além do forte odor nauseabundo gerado devido às altas doses de vinhaça aplicada no campo (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A utilização do gotejamento subsuperficial juntamente com a aplicação de vinhaça, onde permite a aplicação da vinhaça diretamente no sistema radicular em doses pequenas mais frequentes, ponderando a fertirrigação com a necessidade da cultura, pode ser uma alternativa para a diminuição da percolação dos íons contidos na vinhaça, principalmente o nitrato, por possuir uma alta mobilidade no solo.

Cunha et al. (1981), estudando a utilização de vinhaça como fertilizante e condicionador de solos, observaram que a acumulação de potássio no perfil não foi grande, ficando este elemento retido na camada de 0,00-0,50 m de profundidade, sendo que sua lixiviação foi pequena, acompanhando a drenagem interna no perfil.

Canellas et al. (2003), trabalhando em um Cambissolo, não verificaram aumento de potássio nem cálcio em profundidade, tampouco da CTC ou nitrogênio; entretanto, observaram aumento nos teores de cobre e ferro na camada de 0,20-0,40 m de profundidade.

Ridersa (1994) observou que a aplicação de vinhaça deve estar centrada na hipótese do solo, em sua zona não saturada, se comportar como um verdadeiro sistema de tratamento, tendo grande capacidade de remoção dos componentes da vinhaça. Considerando a hipótese do solo servir como sistema de tratamento dos elementos da vinhaça considerados poluidores, experimento em colunas de solo, com doses crescentes de vinhaça, foi reproduzido, na época classificado como Areia Quartzosa Distrófica. O autor afirma que as lixiviações do Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e potássio (K) foram quase que em proporção direta às doses de vinhaça aplicadas, ou seja, o solo trabalhado, não teve capacidade de absorver os elementos em questão.

Portanto, Brito (2005), verificou que a aplicação inadequada de vinhaça pode contribuir para o aumento dos elementos químicos no solo, principalmente de K e sódio (Na) que influenciam o aumento da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo.

Ainda preocupando-se com a possibilidade de a vinhaça provocar contaminação dos cursos de água, Ludovice (1997) monitorou o efluente de canal não revestido para a condução de vinhaça, no qual utilizou como parâmetro de avaliação as análises de pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (SDT), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) entre outros, verificando que ao longo dos anos a taxa de remoção, ou seja, capacidade do solo em reter as várias substâncias presentes na vinhaça não foi eficiente, tendo no caso específico, efeito poluente sobre o lençol freático, concluindo que no seu estudo os solos sob os canais de escoamento de vinhaça são excessivamente suscetíveis a contaminação por percolação da ordem de 91,4%, colocando em risco a potabilidade dos lençóis freáticos.

Cruz et al. (1990), relatam os resultados de estudo de longa duração sobre a influência da vinhaça aplicada na dosagem de $300\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, nas propriedades do solo (até 1,5 m de profundidade). O experimento avaliou períodos de 0, 5, 10 e até 15 anos. Verificaram a melhoria da fertilidade do solo ao longo dos anos. O teor de matéria orgânica e de fósforo (P) aumentaram na camada superficial. Os teores de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) aumentaram não apenas na superfície como também nas camadas mais profundas.

É importante lembrar que a vinhaça é um material de origem orgânica, sem presença de metais pesados ou outros contaminantes que impeçam seu uso agrícola.

Vários autores observaram lixiviação de nutrientes quando a aplicação de vinhaça é feita por períodos longos, Bebé et al. (2007) aplicando taxas de vinhaça que variaram de 32,5 a 227,5 m³ ha⁻¹, verificou aumento linear na concentração de cálcio no lixiviado. Porém, Brito et al. (2003) aplicando doses mais elevadas 350 e 700 m³ ha⁻¹, verificaram redução nos teores de Ca, K, Mg e Na solo, indicando retenção dos cátions pelo mesmo.

Embora a bibliografia referente aos efeitos da vinhaça no solo e nas águas subterrâneas seja ainda bastante limitada, trabalhos com vinhaça de cana-de-açúcar, é possível verificar que os resultados são bastante variáveis em razão da grande diversidade de solos e composição das vinhaças.

Verificando unanimidade em relação à dosagem aplicada que apresentaria menores chances de contaminação de águas subterrâneas, devendo ser relacionada ao tipo e condições do solo local. Isto é, dosagem de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, classe textural, existência de vinhaça residual, uma vez que esses exercem influência sobre a CTC, capacidade de armazenamento e infiltração de água no solo, além da profundidade do lençol freático, proximidade de nascentes e intensidade de atividade vegetal na área.

3.7 Alterações nas características físicas do solo mediante adição de vinhaça

As alterações nas condições químicas de solos cultivados, tais como concentração e tipo de íons na solução do solo (RENGASAMY, 1983), variações do pH do solo e da concentração crítica de floculação das partículas, podem causar modificações na dispersão da fração argila, degradando a estrutura original do solo (BENITES; MENDONÇA, 1998).

O efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre, basicamente, pela interação eletroquímica existente entre os cátions presentes na solução e a fração argila. A característica principal deste efeito é a expansão da argila quando úmida e a sua contração quando seca, devido principalmente ao excesso de sódio trocável. Se esta expansão for exagerada, poderá ocorrer a fragmentação das partículas, causando a dispersão da argila e modificando a estrutura do solo.

Rengasamy (1983) verificou menor dispersão de argila em solos com maiores teores de cálcio e magnésio, enfatizando que cátions polivalentes formam pontes de cátions com partículas carregadas negativamente, aumentando a agregação do solo. As mudanças nas propriedades químicas do solo promovidas pela aplicação da vinhaça podem alterar as propriedades físicas, como estabilidade de agregados e dispersão de argila do solo. Apesar do aumento temporário do pH devido à aplicação deste resíduo ao solo, trabalhos mostram que sua aplicação no solo por longo tempo pode melhorar a sua estrutura, por seus efeitos na agregação do solo. Camargo et al. (1988) verificaram redução do teor de argila dispersa e aumento no diâmetro médio ponderado dos agregados em um Latossolo Vermelho Escuro que recebeu vinhaça ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por três anos, em relação ao solo testemunha. Segundo os autores, esses resultados estão relacionados à maior atividade microbiana no solo com vinhaça, consequentemente com maior produção de mucilagens, que atuam como agentes ligantes para formação e estabilização dos agregados do solo. Portanto, a vinhaça pode influenciar diretamente a condutividade hidráulica do solo, pois ela possui alta quantidade de íons que interferem na composição da solução do solo e no complexo de troca e na expansibilidade, além de influenciar na textura, densidade e estabilidade estrutural devido à grande presença de matéria orgânica. Pode até afetar a atividade microbiana devido à sua origem, tida como “extrato de levedura” diluído, que favorece o desenvolvimento de microorganismos. Porém, estes efeitos podem ser benéficos ou danosos.

Uyeda (2009), estudando influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial, não encontrou valores significativos nos solos estudados quanto às alterações da condutividade hidráulica, escoamento e percolação do potássio e de sólidos dissolvidos totais.

Silva et al. (2006) analisando o efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades físicas de um Argissolo, cultivado com cana-de-açúcar, constatou uma menor perda de Carbono Orgânico Total (COT) e maior concentração de Matéria Orgânica particulada no solo tratado com vinhaça, em relação aos tratamentos de sequeiro e irrigado. Os autores verificaram que as menores perdas do COT, nos solos tratados com vinhaça, ocasionaram um maior valor de limite de plasticidade nas camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m e maiores taxas de friabilidade na camada de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, em relação ao cultivo em sequeiro, e na camada de 0-0,2 m em relação ao cultivo irrigado, reduzindo assim o grau de compactação do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização experimental

A pesquisa foi conduzida na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP), Fazenda Areão, localizada no município de Piracicaba, SP (Figura 1).

Figura 1 - Vista aérea da área do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP) na Fazenda Areão (Piracicaba-SP) e da área experimental

Os dados climáticos referentes ao período do experimento, de abril de 2010 a fevereiro de 2011, foram coletados pela estação meteorológica automática do Departamento de Engenharia de Biosistemas, localizada a cerca de 100 metros de distância da área experimental.

As Figuras 2A, 2B, 2C e 2D mostram os valores médios respectivamente de temperatura do ar (T), radiação global (RG), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V).

Figura 2 - Valores médios mensais registrados durante a condução do experimento (abril de 2010 a fevereiro de 2011) referentes à: temperatura média do ar e radiação global (A), precipitação (B), umidade relativa do ar (C), velocidade do vento (D)

4.2 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido na Fazenda Areão cuja área experimental era de 1800 m² (100 metros de comprimento e 18 metros de largura), dividido em 24 parcelas. A área total de cada parcela foi de 51 m² (6 metros de comprimento e 8,5 de largura), contendo 5 linhas duplas, sendo 2 linhas como bordaduras. Para a coleta de dados utilizou-se somente as 3 linhas centrais e desconsiderando 1 metro de cada lado da parcela, totalizando uma área útil de 24 m². O solo é do tipo Nitossolo Vermelho eutrófico, classificado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

Antes do plantio, foram coletadas amostras compostas de solo da área total do experimento para o procedimento das análises químicas e físicas, sendo as análises químicas determinadas junto ao Laboratório de Ecologia Aplicada

pertencente ao Departamento de Ciências Florestais e as análises físicas do solo, realizadas no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia de Biosistemas (Tabelas 2 e 3). A partir das análises de solo realizadas no início do experimento, pôde-se avaliar a movimentação e adsorção dos nutrientes no solo, ao longo do tempo, auxiliar no manejo da irrigação e nos cálculos para a adubação.

Tabela 2 - Análise química do Nitossolo

Camada m	pH CaCl ₂	M.O g.dm ⁻³	P mg.dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V
						mmol _c dm ⁻³					%
0,00-0,20	5 M	27	8 B	2,5 M	30 A	15 MA	1 B	39	48	86	55
0,20-0,40	5,2 M	20	5 MB	1,7 M	28 A	14 MA	0 B	33	44	77	57
0,40-0,60	5,5 M	13	5 MB	0,6 MB	22 A	14 MA	0 B	25	37	62	60
0,60-0,80	5,7 M	9	4,2 MB	0,2 MB	17 M	12 MA	0 B	23	29	52	56
Camada m	Micronutrientes (mg dm ⁻³).....										
			S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn			
0,00-0,20			16 A	0 B	2 A	15 A	92 MA	3 A			
0,20-0,40			28 A	0 B	2 A	11 M	53 MA	1 M			
0,40-0,60			79 A	0 B	1 A	6 M	9 A	0 B			
0,60-0,80			80 A	0 B	1 A	4 B	5 A	0 B			

Legenda: MB = Muito Baixo; B = Baixo; M = Médio; A = Alto; MA = Muito Alto.

Tabela 3 - Análise física do Nitossolo

Camada m	Argila	Silte	Areia	Densidade do solo g cm ⁻³	Capacidade de campo cm ³ cm ⁻³	Ponto de murcha permanente cm ³ cm ⁻³	Capacidade de água disponível mm
	%	%	%				
0,00-0,20	44,73	26,35	28,92	1,29	0,27	0,21	15,48
0,20-0,40	55,85	23,53	20,62	1,49	0,35	0,24	32,78
0,40-0,60	65,41	13,67	20,92	1,36	0,38	0,30	21,76
0,60-0,80	65,91	12,54	21,55	1,40	0,34	0,30	11,20

Em 6 de janeiro de 2010, foi feita a subsolagem e gradagem para o preparo do solo. Antes do plantio do experimento, foi semeada a lanço, no dia 11 de janeiro de 2010, crotalaria (*Crotalaria juncea*) com uma densidade variando entre 55 a 60 sementes por m². Essa leguminosa foi escolhida por possuir crescimento muito rápido e vigoroso, apresentando bom controle de ervas daninhas e, também boa produção de massa verde e fixação de nitrogênio, sendo também má hospedeira de nematóides, o que contribui para a redução de sua população (Figuras 3A, 3B, 3C e 3D).

Figura 3 - Preparo do solo (A), Plantio a lanço da crotalária (B), Vista da germinação da crotalária (C) e Altura da crotalária (D)

Após 90 dias de plantio da crotalária, realizou-se a incorporação, a fim de aproveitá-la como adubação verde e preparar o solo para o plantio da cana-de-açúcar (Figuras 4A e 4B).

Figura 4 - Crotalária (A) e Incorporação da crotalária (B)

4.3 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com 6 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos estão descritos na Tabela 4 e o volume de vinhaça aplicado foi calculado segundo a equação proposta da normativa da CETESB (2005), igual a $352 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T4).

Tabela 4 - Descrição dos tratamentos

Tratamento	Descrição	Volume de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	Potássio (kg ha^{-1})
T1	Sem irrigação com adubação convencional	0	0
T2	Fertirrigada sem vinhaça	0	0
T3	Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb	176	563
T4	Fertirrigada com dose Cetesb	352	1126
T5	Fertirrigada com 2x dose Cetesb	704	2253
T6	Fertirrigada com 3x dose Cetesb	1056	3379

A Tabela 5 apresenta o esquema da análise de variância associado ao delineamento experimental empregado no experimento. A Figura 5 mostra o croqui do experimento com a disposição dos tratamentos.

Tabela 5 - Esquema da análise de variância

Causa da Variação (CV)	Grau de Liberdade (GL)
Tratamentos	5
Resíduo	18
Total	23

2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T3R3	T1R4	T6R4	T3R2	T1R2	T5R2	T6R1	T2R3	T2R2	T4R3	T6R3	T6R2
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
T1R3	T3R4	T2R4	T4R1	T4R4	T5R3	T3R1	T1R1	T5R1	T5R4	T4R2	T2R1

Figura 5 - Distribuição dos tratamentos, sendo T (tratamento) e R (repetição)

4.4 Plantio da cana-de-açúcar

O plantio foi realizado no dia 23 de abril de 2010, com a utilização de um sulcador duplo espaçado a 0,5 m. O sistema adotado para o plantio foi o combinado ou “abacaxi”, com dimensões de 1,5 m entre linhas por 0,5 m entre fileiras. O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial foi implantado juntamente com o plantio e enterrado a uma profundidade de 0,3 m (Figura 6).

Figura 6 - Esquema do sistema combinado ou abacaxi

As mudas de cana foram obtidas do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), localizado na região de Piracicaba/SP e a variedade escolhida foi a CTC 12, por ser super precoce para ambientes A a C (as áreas mapeadas são agrupadas em cinco ambientes de produção de cana-de-açúcar classificados de: A, B, C, D e E considerando-se o potencial de produção de cada uma deles, sendo definidos pela interação de fatores como: tipo de solo, disponibilidade de água, condições químicas do solo e produtividade das variedades de cana-de-açúcar (LANDELL et al., 2003), com destaque no ATR (maior de todas as demais variedades CTC), descasca facilmente, exigente em solos e umidade (CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA, 2011).

As mudas inteiras foram levadas a campo com palha, onde se realizou a despalha cuidadosamente, para não ferir as gemas. O plantio com palha é desaconselhável, pois pode prejudicar a emergência da cultura, por exercer obstrução mecânica à emergência dos brotos e raízes e impedir o perfeito contato das gemas, dificultando o aproveitamento da umidade do solo.

Os toletes inteiros foram distribuídos 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, e picados posteriormente. 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 linear de sulco. Logo após o corte dos colmos, os toletes foram cobertos manualmente com uma camada de terra de 0,07 m (Figuras 7A, 7B, 7C e 7D).

Figura 7 - Preparo das mudas e etapas do plantio da cana, variedade CTC 12

4.5 Instalação dos tensiômetros e extratores de solução

Em maio de 2010, foram instalados tensiômetros nas 24 parcelas para monitorar a umidade do solo, via tensiômetro de punção. As profundidades de instalação dos tensiômetros e dos extratores de solução foram: 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m tomando-se como base o centro da cápsula.

Para o monitoramento da solução do solo foram utilizados extratores de solução do solo de cápsula porosa. Estes extratores são equipamentos que consistem em uma cápsula de cerâmica porosa inserida na base de um tubo de PVC rígido de $\frac{1}{2}$ " e outro transparente de 12 mm, com sua extremidade superior hermeticamente fechada por uma borracha de vedação de silicone.

Os tensiômetros e extratores foram posicionados em linhas de plantas diferentes, porém na mesma posição. Antes da instalação, submergiram-se as cápsulas em um balde com água para saturação, garantindo assim, uma melhor aderência ao solo.

Foram adotadas as linhas centrais para sua instalação e para tal foi empregado um trado do mesmo diâmetro para garantir o máximo contato da cápsula com o solo. Essas profundidades foram escolhidas por causa da possibilidade de se monitorar toda a camada onde se encontra a maior concentração de raízes efetivas da cana-de-açúcar. O espaçamento entre eles foi de 0,20 m e 0,15 m do gotejador. Logo após a instalação, os extratores e tensiômetros foram preenchidos com água destilada para auxiliar o contato durante 30 dias. Somente após este período, a aplicação do vácuo nos extratores e as leituras nos tensiômetros foram realizadas, retirando-se a água do seu interior (Figura 8).

Figura 8 - Abertura dos orifícios com trado de rosca (A), vista dos orifícios para instalação dos extratores e tensiômetros (B), manuseio da cápsula para auxiliar no contato solo-cápsula (C), e tensiômetros instalados (D)

4.6 Instalação e manejo da irrigação por gotejamento subsuperficial

O sistema de irrigação instalado foi de irrigação localizada, via gotejamento subsuperficial. O tipo escolhido dos gotejadores foi o Hydrolite com vazão de 1 L h^{-1} , espaçados de 0,45 m um do outro, instalados com os seus orifícios voltados para cima, enterrados a 0,3 m e operados à pressão de serviço de 100 kPa. Para garantir uma boa uniformidade da irrigação realizaram-se testes de vazão no início, no meio e no fim do ciclo da cultura. O bombeamento de água para o sistema de irrigação foi efetuado por uma moto-bomba hidráulica centrífuga, de 5 cv de potência. Para o sistema de aplicação da vinhaça foi instalado outro conjunto moto-bomba de 1 cv de potência. Após o conjunto moto-bomba da vinhaça, instalou-se um filtro de disco de 120 mesh para conter as substâncias indesejáveis ao sistema. Para monitorar a pressão de operação do sistema foi instalado após o filtro de disco um manômetro, e um “timer” para automatizar a irrigação e a aplicação da vinhaça (Figuras 9A, 9B, 9C e 9D).

Figura 9 - Abertura da valeta para enterrar a linha principal (A), Instalação dos conectores iniciais (B), vista do início da linha instalado (C) e vista dos cavaletes (D)

Para o manejo da irrigação utilizou-se o tensiômetro de punção, com base em dados da umidade do solo, obtidos pela utilização dos tensiômetros e das curvas de retenção de água no solo, confeccionadas em laboratório, antes do início do ciclo da cultura.

Os tensiômetros foram instalados nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m e o tubo de acesso para a sonda Diviner 2000 foi instalado a uma profundidade de 0,80 m, sendo suas leituras a cada 0,10 m.

As Figuras 10A e 10B mostram os equipamentos instalados e os métodos utilizados para o manejo da irrigação no experimento.

Figura 10 - Manejo da irrigação utilizando o tensiômetro (A) e manejo utilizando a sonda Diviner 2000 (B)

Para obtenção das curvas de retenção da água no solo foram utilizadas as mesas de tensão de 0, 10, 20 e 40 cm de coluna d'água, e a câmara de Richards para as tensões de 100, 330, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 15.000 cm de coluna d'água. Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980) (Tabela 6), 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).

Tabela 6 - 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 no início do experimento, 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

A irrigação foi realizada com um intervalo médio de 3 dias, para garantir que o solo alcançasse a capacidade de campo, sendo o volume de água aplicado calculado a partir da média das leituras via tensiômetros e sonda Diviner, observadas nos diferentes tratamentos. As leituras foram realizadas a cada 3 dias.

4.7 Aquisição e aplicação da vinhaça

A vinhaça foi adquirida na Usina Capuava, localizada no município de Piracicaba/SP durante o ano de 2010. A vinhaça era transportada da usina para a área experimental via caminhão tanque quinzenalmente, sendo analisada em relação aos seus aspectos químicos (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores obtidos nas análises químicas da vinhaça

Coleta	pH	CE dS m ⁻¹	Potássio	Cálcio	Sódio	Nitrato	Enxofre
					mg L ⁻¹		
1	4,78	6,9	3305	770	50	203,5	1450,00
2	4,83	14,81	3745	280	54	720,60	240,30
3	4,85	10,56	3555	282	35	764,49	927,59
4	4,54	9,80	3635	410	60	102,42	984,59
5	4,40	8,86	3440	550	65	107,88	220,12
6	4,30	10,10	3345	785	90	780,37	1115,07
7	4,75	7,69	3355	845	80	130,53	1081,23
8	4,83	5,71	2500	484	55	750,56	765,51
9	4,76	7,06	2255	374	55	370,05	980,00
10	4,03	7,48	2817	448	42	329,51	1139,35
Média	4,60	8,27	3195	523	59	425,99	890,37

As adubações foram realizadas seguindo as recomendações de RAIJ et al. (1996) com base na fertilidade de solo e produtividade esperada. Nos tratamentos não irrigados, a adubação foi realizada junto ao plantio (plantio convencional), já nos tratamentos irrigados a fertirrigação com nitrogênio, fósforo e potássio foi parcelada em 10 aplicações ao longo do ano de 2010 baseando-se na marcha de absorção de nutrientes pela planta (Tabela 8).

Tabela 8 - Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar da estação de 12 meses

Dias após o Plantio	Nutrientes (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1 - 30	1,2	0,1	0,2
31 - 80	1,5	0,4	0,24
81 - 110	2,0	1,0	0,4
111 - 150	0,75	0,3	0,75
151 - 190	--	--	1,5

Fonte: Netafim (2011)

Como o solo do experimento possuía baixos valores de fósforo, parcelou-se a sua quantidade, sendo metade da sua quantidade aplicada no sulco de plantio e a outra metade dividida ao longo das aplicações. Após as 10 aplicações, continuou-se com apenas as irrigações.

O sistema de irrigação era sempre pressurizado antes da aplicação dos diferentes tratamentos, sendo estes controlados por registros.

As dosagens de vinhaça aplicada foram calculadas com base na vazão dos gotejadores de cada parcela, por meio do fechamento dos respectivos registros. Toda vez em que se aplicava a vinhaça, uma amostra era retirada e submetida à análise química para o acompanhamento das concentrações dos nutrientes em estudo.

A primeira aplicação da vinhaça foi realizada no dia 23 de junho de 2010, ou seja, 1 mês após a instalação dos extratores de solução do solo, visando garantir uma reestruturação do solo e um melhor contato cápsula/solo (Figura 11).

Figura 11 - Caixas reservatório utilizadas para armazenar e posteriormente distribuir para o sistema de gotejamento subsuperficial a aplicação de vinhaça e fertirrigação (A) e entrega da vinhaça pelo caminhão (B)

4.8 Monitoramento dos componentes químicos da solução do solo

A coleta da solução do solo foi realizada quinzenalmente, ao longo do ciclo da cana planta, utilizando-se extratores de solução iniciando em 25 de junho de 2010. Para extrair a solução do solo, criou-se um vácuo na câmara interna do extrator de aproximadamente -80 kPa ($\sim$ -600 mmHg) com auxílio de uma bomba de vácuo (Prismatec, Modelo 131), mantendo-o durante 1 minuto, 24 horas após a aplicação dos tratamentos. No momento da amostragem, verificou-se a umidade do solo por meio de tensiômetros em todos os tratamentos a fim de verificar a umidade de cada tratamento (Figura 12).

Figura 12 - Bomba de vácuo (A) e detalhe da aplicação do vácuo (B)

As soluções do solo foram retiradas das câmaras dos extratores 24 horas após a aplicação do vácuo, tempo necessário para se atingir um equilíbrio do solo com a cápsula do extrator de solução, sendo removidas com a utilização de uma seringa e depositadas em recipientes plásticos, devidamente identificados.

Para a determinação dos íons, foram realizadas análises em fotômetro de chama, espectrofotômetro de absorção atômica e o de ultravioleta. Para a determinação de pH e CE, foram utilizados um pHmetro e um condutivímetro de mesa (Digimed), respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9 - Variáveis e respectivos equipamentos utilizados para a sua determinação nas amostras

Elemento	Aparelho
pH, CE (condutividade elétrica)	pHmetro e condutivímetro de mesa digital
Potássio e Sódio	Fotômetro de chama
Nitrato e Enxofre	Espectrofotômetro de UV
Cálcio	Espectrofotômetro de absorção atômica

4.9 Monitoramento da vazão dos gotejadores quanto ao entupimento

A amostragem da vazão dos gotejadores foi realizada antes da primeira aplicação de vinhaça, depois da quinta aplicação e ao final de 10 aplicações, sendo que a pressão foi aferida com o auxílio de um manômetro de glicerina durante cada avaliação. As avaliações foram realizadas com água, utilizando uma balança de precisão certificada (marca OHAUS) com precisão de 0,01 g para pesagem de cada recipiente com água; descontando-se sua tara para a obtenção do volume.

Foram selecionados 3 gotejadores, como padrão, 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 13).

Figura 13 - 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 tabulados os dados, foi calculada a vazão média, o coeficiente de variação de vazão e a uniformidade de distribuição de água utilizando as equações 2 a 4.

$$q = \frac{M}{1000 t} 60 \quad (2)$$

onde:

q - vazão do gotejador, L.h⁻¹;

M - massa da água coletada, g; e

t - tempo de coleta, min.

$$CV_q = \frac{s}{q} 100 \quad (3)$$

onde:

CV_q - coeficiente de variação da vazão, %; e

s - desvio padrão da vazão dos gotejadores, $L.h^{-1}$.

$$UD = \frac{q_{25\%}}{q_{média}} 100 \quad (4)$$

onde:

UD - uniformidade de distribuição, %;

$q_{25\%}$ - vazão média de $\frac{1}{4}$ dos menores valores, $L.h^{-1}$; e

$q_{média}$ - vazão média, $L.h^{-1}$.

4.10 Monitoramento das características físicas do solo

Para o monitoramento das características físicas do solo, bem como, sua classificação, as amostras foram coletadas em cada horizonte do perfil do solo e em seguida acondicionadas em sacos plásticos. Posteriormente, foram transportadas para o Laboratório de Física de Solos, pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas. As amostras de solo com estrutura indeformada e deformada foram coletadas em março de 2011, após a colheita da cana-de-açúcar, nas camadas de 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m.

Para coleta das amostras deformadas utilizou-se o trado Holandês e para as amostras indeformadas utilizou-se o trado tipo Uhland (Figuras 14A e 14 B, respectivamente). Para a coleta de amostras para a confecção da curva de retenção, utilizou-se o trado para amostras indeformadas (Figura 14C).

Figura 14 - Trados: Holandês (A); Uhland (B) e Trado para amostras indeformadas (C)

As avaliações dos atributos físicos foram divididas em 4 etapas: a) granulometria (areia total, silte e argila total); b) argila dispersa em água e grau de floculação; c) condutividade hidráulica do solo saturado; e d) umidade na capacidade de campo e umidade no ponto de murcha permanente.

1ª. Etapa: Análise granulométrica

Para a realização da análise granulométrica (areia total, silte e argila total) utilizou-se o método de dispersão física lenta. Para tal, as amostras com estrutura deformada de cada parcela experimental foram secas, destorroadas e passadas através de uma peneira de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Para a determinação da composição granulométrica do solo, foram pesados 50 g de TFSA e acondicionou-se em um frasco de vidro de 500 mL, colocando-se 10 mL de NaOH a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e 250 mL de água destilada. Em seguida o frasco de vidro foi acondicionado, por 16 horas, em um agitador horizontal a 120 rpm (EMBRAPA, 1997, com modificações).

Decorrido o período de agitação, o conteúdo de cada recipiente foi colocado em uma proveta de 1 L, completando-se o volume com água destilada para 1 L e agitando-se por 1 minuto com um bastão. Aguardou-se 40 segundos para realizar a primeira leitura e 2 horas para realizar a segunda, com o auxílio do densímetro de Bouyoucos. Para a correção, em ambas as leituras foi medida a temperatura da solução (Figura 15).

As equações 5 a 7 mostram as sequências de cálculo para as respectivas frações do solo:

(5)

$$\% \text{ argila} = \frac{(2^{\text{a}} \text{ leitura corrigida} \times 50)}{\text{massa de TFSA}} \quad (6)$$

$$\% \text{ areia} = 100 - (\% \text{ silte} + \% \text{ argila}) \quad (7)$$

Figura 15 - Etapas da análise granulométrica: Mesa agitadora horizontal (A); Agitação da amostra (B); Leitura com o densímetro de Bouyoucos (C) e Detalhe da leitura (D)

A classificação textural do solo foi obtida segundo o triângulo textural, empregado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, descrita em Santos et al. (2005) (Figura 16).

3ª. Etapa: Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) é um parâmetro importante para análise da intensidade de deslocamento da água no solo. Para a sua determinação, utilizou-se o método do permeâmetro de carga constante (YOUNGS, 1991), conduzindo-se as amostras a um sistema montado em laboratório (Figura 17).

Figura 17 - Módulo do permeâmetro de carga constante

O método consistiu basicamente em manter uma carga hidráulica constante sobre as amostras, e por meio de um sistema de drenagem obtinha-se a vazão (Q). O teste era finalizado quando a massa de água coletada que atravessava a coluna de solo, após três medidas, apresentava um valor constante. Normalmente, o teste demorava em torno de 7 horas.

Após o término, utilizou-se a equação do permeâmetro de carga constante, para se obter a condutividade hidráulica do solo saturado:

$$K_o = \frac{60 \cdot vol \cdot L}{A \cdot T \cdot H}$$

onde:

K_o - condutividade hidráulica em cm h^{-1} ;

vol - volume coletado em cm^3 ;

L - altura da amostra em cm;

A - área da amostra em cm^2 ;

T - tempo em minutos; e

H - altura do anel + carga hidráulica em cm.

4ª. Etapa: Curva de retenção da água no solo

Para a confecção da curva de retenção de água no solo nas diferentes profundidades, foram utilizadas quatro repetições de cada ponto amostral. As amostras foram devidamente preparadas, com a retirada do excesso de solo dos anéis volumétricos e a utilização de um material 100% viscoso, tipo Perflex, com o mesmo diâmetro do anel volumétrico colado na extremidade do anel, para evitar perda de material. As amostras de solo com estrutura indeformada, depois de preparadas, foram colocadas em um recipiente plástico para a saturação, onde se colocou água deionizada, elevando-se o nível de água gradativamente até 2/3 da amostra, permanecendo lá por 24 horas. Após a saturação das amostras, foram levadas à mesa de tensão às tensões de até 4 kPa. Para as tensões acima de 4 kPa, utilizou-se a câmara de Richards: pontos de 10; 50; 70 e 1500 kPa. Portanto, as curvas de retenção foram confeccionadas até a tensão de 1500 kPa, contendo 10 pontos de medidas. A obtenção dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, foi feito por meio de ajuste numérico do modelo proposto por van Genuchten (1980), mediante a aplicação do software RETC (Van GENUCHTEN et al., 1991).

4.11 Colheita da cana-de-açúcar

Devido ao acamamento ocorrido no dia 12 de fevereiro de 2011, quando registrou-se na estação meteorológica um vento de aproximadamente 25 km h^{-1} , realizou-se a colheita da cana crua, de maneira manual, entre os dias 16 a 18 de fevereiro de 2011, quando a cana-de-açúcar apresentava 10 meses de plantio, (Figura 18).

Figura 18 - Vista aérea e frontal da área experimental, respectivamente, após o vento (A) e (B)

Na colheita as plantas foram separadas em colmo e ponteira, e pesadas separadamente, a fim de mensurar a produtividade e massa verde dos diferentes tratamentos, podendo assim verificar se houve correlação entre a produtividade e a massa verde diante da aplicação de diferentes doses de vinhaça (Figura 19).

Figura 19 - Pesagem dos colmos (A) e Pesagem da massa verde (B)

4.12 Análise estatística dos dados

O software “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 2001) foi utilizado para a análise estatística da pesquisa. A interpretação dos dados (tratamento e profundidade), seguiu-se de maneira individual, 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 da distribuição dos elementos químicos da vinhaça no perfil do solo, foi realizada a comparação entre as médias utilizando o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço hídrico e Condições climáticas

O balanço hídrico, expresso em valores mensais, foi elaborado para o período da cana-planta, ou seja, de abril de 2010 a fevereiro de 2011. Pôde-se observar que houve a necessidade de irrigação durante, praticamente, todo o ciclo da cultura, somente apresentando valores positivos entre meados de novembro de 2010 a início de fevereiro de 2011, período em que a cultura já se encontrava com 9 meses após o plantio, já finalizando o seu estágio de crescimento (Figura 20).

Figura 20 - Extrato do balanço hídrico mensal durante o ciclo da cana planta

Pela Tabela 10 podem ser conferidos os dados meteorológicos (mensais), durante o ciclo de cultivo referentes a: velocidade do vento, radiação global, temperatura média do ar, precipitação e umidade relativa do ar. Tais valores foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) e posteriormente para a elaboração do balanço hídrico realizado pelo método de Thornthwaite.

A temperatura média registrada na área experimental, durante o ciclo da cana planta foi de aproximadamente 22°C, sendo encontrado no ciclo de cultivo temperaturas mínimas de 5°C ocorrendo no mês de junho de 2010 e temperaturas máximas de 35°C ocorrendo em novembro de 2010. De uma maneira geral, o mês de dezembro apresentou os maiores valores médios de temperatura (25,7 °C e junho apresentou os menores valores médios de temperatura (16,9 °C).

Tabela 10 - Valores médios mensais de dados meteorológicos (Piracicaba, SP)

Meses	Vento	Radiação Global	T média	Precipitação	UR
Ano	m.s⁻¹	MJ.m⁻²d⁻¹	°C	mm	%
Abril/2010	1,4	15,7	23,2	32,2	66,4
Maio/2010	1,1	13,1	18,8	30,1	70,0
Junho/2010	1,3	13,2	16,9	18,3	67,4
Julho/2010	1,2	12,5	18,9	65,6	64,0
Agosto/2010	1,2	15,8	18,8	0,1	53,1
Setembro/2010	1,3	15,7	21,6	134,0	58,9
Outubro/2010	1,3	18,5	21,3	93,8	64,4
Novembro/2010	1,1	18,2	23,3	45,9	63,1
Dezembro/2010	1,3	19,8	25,7	42,7	67,0
Janeiro/2011	1,2	21,0	24,6	468,9	89,2
Fevereiro/2011	1,4	20,5	25,0	40,2	84,0

Na época do plantio, em abril de 2010, a temperatura do ar apresentou valores decrescentes e alcançou valores próximos a 23,2°C (Tabela 10). A redução observada na temperatura do ar é um fator prejudicial aos processos de emergência e brotação da cana-de-açúcar. Liu et al. (1998) relata que a temperatura do ar abaixo de 24°C, pode provocar algum efeito prejudicial ao processo de emergência e brotação, para Whitman et al. (1963) citado por Casagrande e Vasconcelos (2008) a brotação é significativamente reduzida quando a temperatura do ar está abaixo de 22°C. Segundo Sigh e Lal (1935), a temperatura de 30°C é ideal para o cultivo da cana-de-açúcar, bem como que a interação entre a temperatura média, fotoperíodo na produção de matéria seca e concentração máxima de sacarose no colmo, deve-se em valores de temperatura em torno de 30°C (ARGENTON, 2006).

Em termos de precipitação, pode-se dizer que a precipitação total durante o período do experimento foi de aproximadamente 972 mm, com picos acima de 100 mm nos meses de setembro de 2010 e janeiro de 2011. Nos meses de junho e agosto de 2010 ocorreram as menores precipitações na área experimental. Diante disso, cabe ressaltar a importância da irrigação para complementar a necessidade de água da cultura, pois Doorenbos e Kassam (1994) em seu trabalho de revisão sobre o consumo de água pelas culturas verificaram que o consumo de água pela cana-de-açúcar está em torno de 1500 a 2500 mm.

Os períodos de deficiência hídrica e excesso hídrico observados no balanço hídrico sequencial caracterizaram uma distribuição irregular das chuvas e a necessidade da utilização de algum tipo de sistemas de irrigação após o plantio ou colheita, para promover a boa brotação, etapa de desenvolvimento fortemente dependente de água no solo, segundo Singh e Srivastava (1973).

A reposição de água no solo, no ciclo da cana-planta, ocorreu no início de dezembro, sendo que a cultura plantada em abril teria todo o período de perfilhamento e parte do período de alongamento do colmo na condição de stress hídrico se não fosse utilizado a irrigação, fato que ocorre com a cana-de-açúcar plantada em sequeiro na região de Piracicaba, SP. Inman-Bamber (2004) verificou que déficit hídrico acima de 38 mm causou reduções no processo de alongamento do colmo e foliar. O déficit hídrico da cana já se encontrada neste valor de 38mm um mês após o plantio, praticamente o mesmo valor encontrado por Almeida et al. (2008) em experimento com cana-de-açúcar na região de Guaíra, SP.

5.2 Monitoramento da umidade do Solo

A irrigação foi realizada, em média, a cada 2 dias, com o objetivo de manter a umidade do solo, em todos os tratamentos irrigados, próxima a valores da capacidade de campo ($0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), com o intuito de favorecer ao melhor desenvolvimento da cultura, cujos valores de umidade do solo foram monitorados ao longo da pesquisa.

A adoção da irrigação ainda deve ser considerada como uma técnica que favorece a menor oscilação na produção anual, reduzindo a dependência das condições climáticas (MAGRO, 2000). Segundo Santana et al. (2007). Trata-se portanto de uma prática agrícola que visa principalmente proporcionar às culturas no momento oportuno, a quantidade de água necessária para seu ótimo crescimento e assim, evitar a diminuição de rendimentos, provocada pela falta de água durante as etapas de desenvolvimento sensíveis à escassez. Santana et al. (2007) observou também alguns benefícios da irrigação na cana-de-açúcar como maior crescimento, densidade de colmo, índice de área foliar e maiores valores de açúcar em comparação ao cultivo sem irrigação.

Barbosa (2010) em um experimento de quatro anos comparando o cultivo de cana-de-açúcar irrigada versus sequeiro concluiu que a técnica da irrigação pelo

método do gotejamento subsuperficial na produção da cana-de-açúcar, melhorou o desempenho da cultura, aumentando a sua produção de colmo e rendimento de açúcar teórico recuperável.

As Figuras 21 e 22 ilustram a umidade do solo nas diferentes profundidades e nos diferentes tratamentos. Pôde-se observar que em todos os tratamentos os valores da umidade do solo na camada superficial (20 a 40 cm) ficou entre 0,26 a 0,39 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, estando na capacidade de campo (0,34 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em todos os tratamentos.

Ao analisar as profundidades de 60 e 80 cm, os valores mantiveram-se em torno de 0,36 a 0,41 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, com uma ligeira superioridade para o tratamento fertirrigado sem vinhaça (T2). Isso pode ter ocorrido, devido a uma provável redistribuição de água no solo, mesmo no tratamento T1 (sequeiro), os valores ficaram próximos à capacidade de campo, ficando evidente que mesmo independente do tratamento avaliado, os valores da umidade do solo mantiveram-se constantes e próximos à capacidade de campo e em alguns determinados momentos, até superior.

Sing e Srivastava (1973) relataram a importância da boa disponibilidade hídrica do solo, na fase de germinação da cana-de-açúcar, pois a germinação foi máxima quando o solo encontrava-se na capacidade de campo, atingindo o valor de 86,7% de brotações e este processo foi mínimo quando o solo atingiu o potencial de 30 bar, sendo observado uma taxa de brotação de 14,30%. Quando o solo estava no ponto de murcha permanente (15 bar) a taxa de brotação foi de 65,5%.

Diante do exposto acima, pôde-se observar que a umidade do solo foi mantida de forma homogênea em todos os tratamentos de forma que não houvesse interferência na distribuição dos íons e nem no desenvolvimento da cultura.

Figura 21 - Distribuição da umidade do solo, 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 22 - Distribuição da umidade do solo, 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

5.3 Distribuição do íon nitrato no solo

Os valores das concentrações de nitrato (NO_3^-), em mg L^{-1} , foram obtidos mediante a coleta das soluções dos extratores de solução do solo, os quais foram instalados em diferentes profundidades, nos diferentes tratamentos e em cada período de observação (60, 75, 90, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255 e 270 dias após plantio, representadas como sendo as leituras de 1 a 14 respectivamente). Dessa forma, foi possível observar a distribuição do íon nitrato no perfil de solo (Figuras 23 e 24).

As concentrações de nitrato apresentaram variação no solo, sendo encontrados valores pontuais entre 0,12 a 289 mg L^{-1} , sendo que foi aplicado via vinhaça, em termos médios, 425,991 mg L^{-1} . No tratamento 1 onde a adubação foi via convencional, observou-se um acúmulo de nitrato nas camadas superiores do perfil de solo (20 a 40 cm), assim como o Tratamento 5 (com a aplicação de 2x a dose recomendada pela CETESB). De uma maneira geral, com excessão do T5, os tratamentos fertirrigados apresentaram baixos valores de nitrato no perfil. Observou-se também, que ao longo do tempo, os valores das concentrações de nitrato foram reduzindo, muito provavelmente associado à extração do nitrogênio devido ao desenvolvimento da cultura. Entretanto, deve-se observar que mesmo com o declínio do nitrato ao longo do perfil, os valores na solução do solo ficaram superiores a 10 mg L^{-1} , o qual é o valor máximo aceitável de nitrogênio na forma de nitrato para água potável, estabelecido pela Organização Mundial de Saúde, valor também adotado pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2004) e pela CETESB, para o Estado de São Paulo (CETESB, 2005). Deve-se constar, que para uma maior eficiência do aproveitamento do nitrato pela planta deve-se aumentar o número de aplicações, diminuindo a dosagem por aplicação, uma vez que o sistema por gotejamento permite tal atividade.

Resende et al. (2002), têm motivado, nos últimos anos, grande preocupação acerca dos efeitos, principalmente do nitrato, na saúde da população humana e animal. Stevenson (1986) afirma que o impacto de nitrato atinge não só a saúde humana e animal, bem como, o crescimento (diminuto ou excessivo) das plantas e a qualidade do ambiente (eutrofização).

Na Austrália, elevadas concentrações de nitrato em águas subterrâneas têm sido identificadas em todos os estados e territórios sob diferentes usos de solo (THORBURN et al., 2003). Esses autores também concluíram que ocorrem elevadas concentrações de nitrato na água subterrânea da costa noroeste da Austrália, além de salinidade acima do limite recomendável; contudo, verificaram que nesta região uma das maiores fontes de contaminação era a utilização de fertilizantes minerais e, em apenas oito de 1031 poços, a maior fonte de contaminação era de origem orgânica.

Pelas Figuras 23 e 24 observou-se que não ocorreu uma maior concentração de nitrato, no perfil de solo, com o aumento da dose de vinhaça e sim ocorreu o processo inverso, ou seja, quanto maior foi a dosagem de vinhaça menor foi a percolação de nitrato, isso muito devido à retenção exercida pelos outros íons (carga positiva: potássio) presentes no solo. Os mesmos resultados foram obtidos por Velloso et al. (1982), em estudo com colunas de solo de característica arenosa onde foram adicionadas doses crescentes de vinhaça (0, 50, 100, 150, 200 e 400 m³ ha⁻¹). Foi verificado que as concentrações de nitrato decresciam e as de amônio cresciam com o aumento das doses. Os autores atribuem o decréscimo de nitrato no lixiviado a perdas por desnitrificação, sendo desvantajoso do ponto de vista de nutrição de plantas e vantajoso do ponto de vista ambiental.

Analisando as concentrações nas diferentes profundidades, pela Figura 23 observou-se também que, no início das aplicações, os maiores valores de concentração de nitrato foram obtidos nos tratamentos 1 e 2 e ao longo do tempo os valores ficaram uniforme ao longo do perfil do solo, ficando entre 40 a 80 mg L⁻¹ em todos os tratamentos, diferenciando de Exner et al. (1991) quando verificaram movimento profundo de nitrato, em diferentes taxas de aplicação, sob condição de irrigação, cujos resultados indicaram que 95% do nitrato aplicado foram lixiviados para abaixo da zona radicular da cultura, sendo que as concentrações médias de nitrato no pulso variaram de 34 a 70 mg L⁻¹ de nitrato, ficando esses valores.

Comparando com o experimento realizado por Lelis Neto (2008), onde avaliou a percolação do íon nitrato ao longo do perfil de diferentes tipos de solo sob diferentes doses de vinhaça (100, 150, 200, 250 e 300 m³ ha⁻¹) em uma casa de vegetação, pode-se observar que os valores encontrados por Lelis Neto no

tratamento de $300\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e os valores encontrados no tratamento 4 ($352 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) obteve o mesmo comportamento e os valores ficaram bem próximos, em torno de 0 a 40 mg L^{-1} ao longo do tempo e ao longo de perfil do solo.

Lyra et al. (2003) observaram escoamento superficial da vinhaça aplicada aos diferentes tipos de solo avaliados e, ainda, que após fertirrigação os valores medidos de CE no lençol freático não indicaram variações significativas mas, sim, eficiência do sistema solo na retenção de íons contidos na vinhaça. Esses autores concluíram que, como a avaliação da qualidade da água engloba uma série de parâmetros a serem contemplados com as devidas concentrações permitidas pela legislação, o impacto sobre a qualidade da água do lençol foi consideravelmente minimizado, mas não o suficiente para garantir o atendimento de todas as exigências ambientais.

Figura 23 - Distribuição do íon nitrato, 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 24 - Distribuição do íon nitrato, 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

Pela Tabela 11, para as profundidades de 20 e 40 cm, pôde-se observar que os valores médios das leituras de nitrato entre os diferentes tratamentos, nessas profundidades, não apresentaram diferença significativa, porém apresentaram altos valores de concentração de nitrato, nas primeiras leituras apresentando aproximadamente 26% da concentração da vinhaça.

Tabela 11 - Valores médios de nitrato nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	119,61	A	97,25	A	103,65	A	109,81	A	123,20	A	127,40	A
2	106,57	A	82,72	A	92,70	A	85,74	A	136,14	A	82,35	A
3	124,23	A	57,34	A	82,42	A	124,23	A	73,26	A	50,97	A
4	n.d	-	87,06	A	46,09	A	n.d	-	n.d	-	61,45	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	61,45	*
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	17,24	*
7	161,87	A	37,86	A	129,23	A	99,21	A	149,68	A	107,04	A
8	110,83	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	107,04	A
9	n.d	-	n.d	-	0,60	B	n.d	-	n.d	-	107,04	A
10	9,41	A	9,57	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	8,05	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	1,13	A	5,26	A	13,19	A	8,76	A	25,71	A	3,51	A
13	1,27	A	0,76	A	3,05	A	1,65	A	20,99	A	2,04	A
14	10,66	B	12,28	B	25,83	AB	18,77	AB	19,77	AB	29,50	A
Profundidade de 40 cm												
1	132,68	A	101,65	A	46,28	A	40,00	A	53,12	A	42,08	A
2	83,84	A	92,70	A	48,62	A	64,96	A	34,75	A	45,90	A
3	86,01	A	63,31	A	39,42	A	63,71	A	27,47	A	16,72	A
4	n.d	-	61,45	A	46,09	A	53,77	A	47,80	A	27,31	A
5	n.d	-	n.d	-	51,24	A	10,79	A	53,94	A	40,46	A
6	n.d	-	10,97	A	3,40	A	3,92	A	3,48	A	2,79	A
7	132,28	A	44,38	A	19,15	A	82,24	A	39,16	A	52,22	A
8	181,35	A	n.d	-	n.d	-	20,15	B	36,94	AB	60,45	AB
9	n.d	-	2,39	A	n.d	-	n.d	-	0,60	A	0,60	A
10	9,41	A	9,41	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	23,54	A
11	n.d	-	8,05	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	9,76	A	1,00	A	5,13	A	3,88	A	9,64	A	2,25	A
13	0,64	A	0,25	A	0,85	A	0,64	A	6,23	A	1,19	A
14	4,98	A	3,94	A	8,96	A	17,26	A	16,45	A	15,60	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Pela Tabela 12, para as profundidades de 60 e 80 cm, pôde-se observar que os valores médios das concentrações de nitrato, entre os diferentes tratamentos, não apresentaram diferença significativa, sendo encontrados menos valores de

concentração de nitrato, ao longo da profundidade e ao longo do tempo, evidenciando o poder adsortivo do solo, bem como, uma possível denitrificação.

Tabela 12 - Valores médios de nitrato nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	78,32	A	92,78	A	77,98	A	102,35	A	85,24	A	86,34	A
2	83,50	A	117,59	A	45,38	A	95,29	A	75,46	A	15,04	A
3	62,12	A	88,39	A	21,50	A	58,53	A	46,19	A	11,95	A
4	133,15	A	60,17	A	22,19	A	70,42	A	46,09	A	52,92	A
5	n.d	-	n.d	-	48,55	A	55,74	A	n.d	-	48,55	A
6	n.d	-	9,40	A	1,57	A	2,61	A	7,84	A	6,27	A
7	66,57	A	48,30	A	61,35	A	23,50	A	54,83	A	133,15	A
8	53,73	A	n.d	-	n.d	-	10,08	A	25,19	A	95,71	A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	0,60	A	0,60	A	1,59	A
10	n.d	-	9,41	A	9,41	A	9,41	A	9,41	A	28,24	A
11	n.d	-	8,05	A	8,05	A	8,05	A	n.d	-	n.d	A
12	24,16	A	1,00	A	0,88	A	0,88	A	10,02	A	24,70	A
13	2,80	A	0,38	A	0,17	A	0,25	A	23,03	A	0,68	A
14	4,17	A	4,17	A	8,46	A	9,38	A	29,19	A	18,38	A
Profundidade de 80 cm												
1	144,65	A	118,00	A	141,25	A	133,75	A	132,80	A	123,78	A
2	95,94	A	172,44	A	61,58	A	117,34	A	46,03	A	19,45	A
3	57,34	A	132,59	A	33,45	A	84,81	A	20,31	A	11,95	A
4	71,70	A	113,94	A	61,45	A	83,22	A	8,96	A	48,65	A
5	n.d	-	53,94	A	55,74	A	93,50	A	71,92	A	115,08	A
6	n.d	-	n.d	-	4,53	A	5,75	A	4,70	A	10,45	A
7	50,91	A	61,35	A	11,75	A	23,50	A	45,25	A	73,10	A
8	35,26	A	55,41	A	10,08	A	25,19	A	50,38	A	40,30	A
9	0,60	A	n.d	-	n.d	-	0,60	A	0,60	A	2,99	A
10	n.d	-	9,41	A	28,24	A	25,11	A	18,83	A	18,83	A
11	n.d	-	8,05	A	8,05	A	8,05	A	8,05	A	289,81	A
12	2,17	B	0,75	B	2,25	B	4,88	AB	4,76	AB	21,53	A
13	5,73	A	0,25	A	0,34	A	0,13	A	3,82	A	10,69	A
14	4,98	B	1,97	B	6,72	B	9,04	B	23,86	AB	30,43	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

5.4 Distribuição do íon potássio no solo

Pelas Figuras 25 e 26 podem ser conferidas as concentrações de potássio (K^+) em $mg\ L^{-1}$, observadas nas soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, os quais foram instalados em diferentes profundidades (20, 40, 60 e 80 cm), nos diferentes tratamentos e em cada período de observação (60, 75, 90, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255 e 270 dias após plantio), representadas como sendo as leituras de 1 a 14, de forma a ser possível analisar a distribuição desse íon no solo.

O valor médio de K^+ na vinhaça, durante as 10 coletas, foi de $3195,2\ mg\ L^{-1}$, sendo apresentadas variações no solo, encontrando-se valores pontuais entre 0,3 a $388\ mg\ L^{-1}$. Os tratamentos 1, 2 e 3 não apresentaram um perfil de distribuição de potássio, ficando em torno de 0,3 a $78\ mg\ L^{-1}$, fato que pode ser explicado tanto pelo fato de que esses tratamentos receberam baixa quantidade de potássio, uma vez que o tratamento 1 foi o sequeiro recebendo somente no plantio, o tratamento 2 foi o fertirrigado e o tratamento 3 foi a meia dose calculado pela CETESB, mas também evidenciando o forte efeito adsorptivo do solo (argiloso) em relação ao íon potássio (que possui carga positiva). Já para os tratamentos 4, 5 e 6 já foi notado um perfil de distribuição de potássio ao longo de perfil e pode-se observar que quanto maior a dose de vinhaça aplicada maior foi a concentração de potássio encontrado na solução do solo, concordando com Brito (2003) que obteve um acréscimo considerável nas diversas camadas, com a profundidade e com a dose aplicada. Já Canellas (2003) trabalhando em Cambissolo, não verificou aumento de potássio em profundidade.

A vinhaça, por possuir excesso de potássio, poderia levar à lixiviação do potássio, porém Nunes et al. (1982), avaliando colunas de solo onde se adicionaram doses crescentes de vinhaça, estudaram a lixiviação de potássio, cálcio e magnésio. Os autores observaram que os incrementos das doses de vinhaça levaram a acréscimos dos teores de potássio, cálcio e magnésio nos efluentes, diferenciando de Brito et al. (2005), que doses crescentes de vinhaça e com um tempo de incubação da coluna por 40 dias houve aumento no teor de potássio no lixiviado, já os incubados por 60 dias os teores diminuíram com as doses de vinhaça.

Mesmo no tratamento 6 onde a dosagem aplicada foi de $1056 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ não apresentou valores altos de potássio no perfil do solo, obtendo valores em torno de 12% da concentração de potássio na vinhaça, evidenciando novamente o forte efeito adsorativo do solo (Figura 26).

Pelas Tabelas 13 e 14, pode-se observar os valores médios de cada leitura de potássio entre os diferentes tratamentos e nas diferentes profundidades. Pode-se notar que houve diferença significativa, apenas a partir da 6ª leitura para todas as profundidades. Demonstrando que o potássio começou a ficar evidente em maior quantidade na solução do solo a partir dessa etapa da pesquisa, provavelmente rompendo a CTC do solo, mas ainda demonstrando o forte efeito adsorativo, cabendo ressaltar que os valores encontrados não ultrapassaram a 10% da concentração inicial da vinhaça.

Figura 25 - Distribuição do íon potássio, 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 26 - Distribuição do íon potássio, 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

Tabela 13 - Valores médios de potássio nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	3,20	A	6,15	A	20,48	A	22,07	A	20,77	A	20,40	A
2	6,53	A	7,87	A	24,60	A	40,35	A	26,03	A	14,85	A
3	11,20	A	5,33	A	30,45	A	57,30	A	39,73	A	32,05	A
4	n.d	-	5,30	AB	18,70	AB	n.d	-	n.d	-	95,30	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	95,30	*
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	388,00	*
7	2,47	B	6,58	B	39,70	B	37,08	B	62,47	AB	248,00	A
8	1,70	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	215,00	A
9	n.d	-	n.d	-	78,00	AB	n.d	-	n.d	-	215,00	A
10	42,40	A	5,00	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	3,10	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	4,85	B	2,60	B	10,73	B	11,13	B	27,95	B	62,60	A
13	5,20	A	0,90	A	12,70	A	10,30	A	22,63	A	20,60	A
14	4,55	A	6,68	A	16,15	A	10,68	A	23,60	A	24,00	A
Profundidade de 40 cm												
1	2,23	A	2,95	A	9,43	A	16,75	A	8,08	A	10,53	A
2	3,55	A	4,65	A	11,43	A	23,68	A	17,67	A	12,80	A
3	1,30	A	4,18	A	12,90	A	21,47	A	23,18	A	34,50	A
4	n.d	-	1,90	A	25,70	A	31,90	A	59,47	A	29,10	A
5	n.d	-	n.d	-	54,90	A	11,90	A	79,50	A	45,30	A
6	n.d	-	1,70	B	58,10	A	137,85	A	111,00	A	82,80	A
7	3,73	B	2,48	B	38,60	A	77,33	A	156,68	A	69,25	A
8	1,80	B	n.d	-	n.d	-	122,00	A	255,33	A	104,10	A
9	n.d	-	2,60	B	n.d	-	n.d	-	236,00	A	152,00	A
10	7,30	A	2,20	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	180,00	A
11	n.d	-	2,80	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	2,28	B	1,65	B	12,15	B	19,15	B	83,98	AB	140,00	A
13	2,50	B	0,63	B	10,17	AB	28,25	AB	82,33	AB	84,40	A
14	2,00	C	1,33	C	11,07	BC	24,55	ABC	72,08	AB	70,50	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 14 - Valores médios de potássio nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	2,38	A	2,75	A	10,00	A	24,88	A	3,90	A	5,53	A
2	1,90	A	4,70	A	7,88	A	10,38	A	3,60	A	2,00	A
3	2,80	A	4,98	A	6,53	A	12,70	A	6,03	A	5,77	A
4	2,30	A	6,58	A	7,43	A	19,05	A	19,70	A	10,90	A
5	n.d	-	n.d	-	5,80	A	38,00	A	n.d	-	38,80	A
6	n.d	-	n.d	-	2,50	A	40,77	A	28,50	A	57,25	A
7	1,25	C	2,25	C	3,45	C	37,98	B	21,80	B	111,05	A
8	3,27	B	n.d	-	n.d	-	89,60	A	86,50	A	123,90	A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	22,00	B	130,00	A	126,00	A
10	n.d	-	4,00	B	24,40	B	102,55	A	22,60	B	202,00	A
11	n.d	-	2,53	A	7,35	A	16,40	A	n.d	-	n.d	-
12	1,33	B	1,60	B	7,73	B	14,70	AB	77,63	AB	60,40	A
13	0,50	A	0,98	A	9,60	A	13,80	A	30,23	A	16,60	A
14	0,55	A	1,45	A	10,85	A	12,60	A	31,85	A	13,30	A

Profundidades 80 cm												
1	2,18	A	2,20	A	15,45	A	38,28	A	2,43	A	2,23	A
2	1,38	A	1,48	A	10,80	A	44,20	A	1,67	A	1,90	A
3	1,80	A	1,40	A	11,58	A	45,63	A	3,68	A	14,50	A
4	3,13	A	2,23	A	33,90	A	36,33	A	5,07	A	5,95	A
5	n.d	-	9,40	A	22,20	A	30,27	A	16,60	A	46,55	A
6	n.d	-	n.d	-	18,17	B	193,23	A	25,07	B	125,60	A
7	1,00	C	0,98	C	13,28	BC	189,98	A	56,03	B	179,50	A
8	1,17	D	1,40	D	56,30	C	166,98	AB	111,70	BC	238,50	A
9	2,50	C	n.d	-	n.d	-	259,00	A	149,00	B	257,00	A
10	n.d	-	2,80	A	34,80	A	183,87	A	130,73	A	303,33	A
11	n.d	-	2,90	D	13,65	CD	130,50	BC	349,50	A	62,50	C
12	3,93	B	1,28	B	3,48	B	32,45	B	71,08	AB	150,00	A
13	0,40	B	0,48	B	2,77	B	29,98	AB	55,80	AB	114,80	A
14	0,33	B	0,98	B	2,88	B	21,38	B	51,30	AB	63,50	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

5.5 Distribuição dos íons cálcio, sódio e enxofre no solo

Pelas Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 podem ser conferidas as concentrações dos íons cálcio (Ca^{+2}) (mg L^{-1}), sódio (Na^{+}) (mg L^{-1}) e enxofre (S^{+}) (mg L^{-1}), observadas nas soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes tratamentos e em cada período de observação (60, 75, 90, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255 e 270 dias após plantio, representadas como leituras de 1 a 14 respectivamente).

No caso do íon cálcio, as concentrações variaram de 4 a 308 mg L^{-1} (Figuras 27 e 28). O valor médio de aplicação do íon cálcio, pela vinhaça, ficou em $522,8 \text{ mg L}^{-1}$, o que evidencia uma adsorção pelo solo em relação a esse íon. De uma maneira geral, em relação aos tratamentos 1, 2 e 3, observou-se apenas um ligeiro aumento em sua concentração no perfil do solo, no tratamento 3 na profundidade de 60 e 80 cm, encontrando-se valores pontuais de 51 a 68 mg L^{-1} (Figura 27). Já na Figura 28, observou-se em relação ao tratamento 6, uma grande variação em termos de concentração do íon cálcio, principalmente nas camadas mais profundas, evidenciando um deslocamento desse íon para camadas mais profundas, no momento em que se aplicou de 2 a 3 vezes a dose recomendada pela CETESB.

No caso do íon sódio as concentrações variaram de 1 a 33 mg L^{-1} (Figuras 29 e 30). O valor médio de aplicação do íon sódio, pela vinhaça, ficou em $58,6 \text{ mg L}^{-1}$, o que também evidenciou uma certa adsorção pelo solo em relação a esse íon. De uma maneira geral, em relação aos tratamentos 1, 2 e 3, observou-se uma melhor distribuição desse íon no perfil do solo em relação ao íon cálcio, principalmente quando aumentou-se sensivelmente a dose de aplicação de vinhaça. Em termos dos tratamentos 4, 5 e 6, pôde-se observar que à medida em que se aumentou a dose aplicada de vinhaça, aumentou-se também a sua variação de concentração ao longo do perfil de solo, da mesma maneira que o íon cálcio.

No caso do íon enxofre as concentrações variaram de 0,06 a 255 mg L^{-1} (Figuras 31 e 32). O valor médio de aplicação do íon enxofre, pela vinhaça, ficou em $890,376 \text{ mg L}^{-1}$, o que evidenciou uma maior adsorção pelo solo em relação a esse íon. Fato que pode ser explicado pelo excesso de cargas positivas, presentes no

solo devido aos íons Cálcio e sódio, e que de certa forma colaboraram em “reter” o íon enxofre no perfil do solo, assim como o nitrato.

De uma maneira geral, em relação aos tratamentos 1, 2 e 3, da mesma maneira que os íons cálcio e sódio, observou-se uma melhor distribuição desse íon no perfil do solo, principalmente quando aumentou-se sensivelmente a dose de aplicação de vinhaça. Em termos dos tratamentos 4, 5 e 6, pôde-se observar que à medida em que se aumentou a dose aplicada de vinhaça, aumentou-se também a sua variação de concentração ao longo do perfil de solo, porém, com valores coletados na solução do solo, bem menores que os dos íons anteriores. A porcentagem coletada dos íons cálcio, sódio e enxofre, na solução do solo, em relação aos valores médios aplicados pela vinhaça, ficaram respectivamente em: 58,91%, 56,31% e 28,63%. Ou seja, praticamente os íons cálcio e sódio apresentaram o mesmo comportamento de adsorção pelo solo, mas fato que influenciou bastante a retenção do íon enxofre pelo solo.

Cruz et al. (1990) relatam os resultados de estudo de longa duração sobre a influência da vinhaça aplicada na dosagem de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, nas propriedades do solo (até 1,5 m de profundidade). O experimento avaliou períodos de 0, 5, 10 e até 15 anos. Verificaram a melhoria da fertilidade do solo ao longo dos anos. O teor de matéria orgânica e de fósforo (P) aumentaram na camada superficial. Os teores de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) aumentaram não apenas na superfície como também nas camadas mais profundas.

Pôde-se verificar uma semelhança do comportamento do sódio e do potássio no solo nos diferentes tratamentos uma vez que a presença do Na^+ no solo, apresentou comportamento similar ao íon potássio e, nas soluções naturais, ocorre como cátion Na^+ trocável. Esse íon é facilmente removido do solo por lixiviação e, em geral, há menos sódio total que potássio em solos de climas úmidos (RAIJ, 1991). No entanto, solos sódicos ácidos, notadamente caracterizados pelo acúmulo de Na^+ , são encontrados em regiões de alta precipitação (precipitação anual de 550-750 mm) onde cátions básicos como Ca^{+2} e Mg^{+2} são lixiviados e suas concentrações são baixas. Estes solos são altamente intemperizados com CTC geralmente baixa (RENGASAMY; OLSSON, 1991).

Figura 27 - Distribuição do íon cálcio, 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 28 - Distribuição do íon cálcio, 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 29 - Distribuição do íon sódio, 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 30 - Distribuição do íon sódio, 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 31 - Distribuição do íon enxofre, 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 32 - Distribuição do íon enxofre, 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

Pôde-se observar que vários autores estudaram lixiviação de nutrientes quando a aplicação de vinhaça é feita por períodos longos, Bebé et al. (2007) aplicando taxas de vinhaça que variaram de 32,5 a 227,5 m³.ha⁻¹, verificou aumento linear na concentração de cálcio no lixiviado. Porém Brito et al. (2003) aplicando doses mais elevadas 350 e 700 m³.ha⁻¹, verificaram redução nos teores de Ca, K, Mg e Na solo, indicando retenção dos cátions pelo mesmo. Diante desses pontos podemos ressaltar a importância de cada vez mais estudar a dinâmica dos íons da vinhaça em diferentes tipos de solo.

Nas Tabelas 15, 16, 17, 18 e 19, podem ser conferidos os valores médios, de cada leitura para os íons cálcio, sódio e enxofre respectivamente, entre os diferentes tratamentos e nas diferentes profundidades.

Como foi discutido anteriormente, observou-se que os íons cálcio, sódio e enxofre apresentaram diferenças significativas em todos os tratamentos e em todas as profundidades. Este fato deve ter ocorrido possivelmente porque com o aumento do volume de vinhaça, aumentou-se a concentração dos íons, mas principalmente do potássio.

Como o potássio apresenta-se com uma maior concentração e por se tratar de um cátion, tal íon fica mais facilmente adsorvido pelos coloides do solo, favorecendo à lixiviação dos demais elementos, por isso pode-se observar uma correlação de distribuição entre os elementos cálcio, sódio e enxofre em profundidade, mesmo o cálcio sendo um elemento bivalente, onde possui uma força de adsorção maior que o potássio.

Nas Tabelas 17 e 18 pode-se observar a diferença estatística nas diferentes leituras e nas diferentes profundidades para o íon sódio. Observando que houve diferença estatística desde o início na profundidade de 20 cm, analisando as outras profundidades podemos encontrar diferença significativa à partir da 7 leitura, verificando que os tratamentos 4, 5 e 6 se diferem dos demais tratamentos.

Tabela 15 - Valores médios do cálcio nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	33,10	AB	17,48	B	21,30	B	17,70	B	33,30	AB	42,33	A
2	26,03	B	15,40	B	22,85	B	34,10	AB	39,23	AB	51,73	A
3	21,00	B	12,58	B	26,83	B	61,35	AB	38,43	B	105,33	A
4	n.d	-	23,40	A	41,40	A	n.d	-	n.d	-	76,30	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	76,30	*
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	139,35	*
7	25,47	B	17,00	B	28,80	B	28,05	B	36,83	AB	50,43	A
8	16,30	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	53,40	A
9	n.d	-	n.d	-	40,80	A	n.d	-	n.d	A	53,40	A
10	67,90	A	18,90	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	5,40	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	8,35	A	8,65	A	12,03	A	12,23	A	20,88	A	22,45	A
13	4,27	A	5,27	A	8,27	A	6,13	A	11,75	A	14,23	A
14	5,63	A	6,53	A	10,75	A	6,63	A	13,13	A	16,67	A
Profundidade 40 cm												
1	16,00	A	23,58	A	16,25	A	19,30	A	20,38	A	21,65	A
2	23,97	AB	18,53	B	23,30	AB	33,50	AB	31,37	AB	41,20	A
3	25,30	B	16,18	B	28,30	B	35,03	B	70,33	AB	100,00	A
4	n.d	-	18,35	D	34,00	CD	50,80	BC	65,93	B	104,93	A
5	n.d	-	n.d	-	62,35	A	85,90	A	82,20	A	125,30	A
6	n.d	-	29,00	A	46,65	A	75,20	A	85,15	A	132,80	A
7	24,60	CD	13,05	D	34,70	CD	46,20	BC	58,68	B	83,27	A
8	28,40	A	n.d	-	n.d	-	64,40	A	129,53	A	83,65	A
9	n.d	-	15,40	A	n.d	-	n.d	-	90,20	A	100,60	A
10	21,50	A	10,20	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	80,30	A
11	n.d	-	6,90	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	12,93	BC	9,35	C	18,75	ABC	18,98	ABC	30,70	AB	32,97	A
13	5,25	B	4,85	B	14,20	AB	19,10	AB	31,68	A	25,97	A
14	5,90	B	5,23	B	14,63	AB	16,98	AB	26,78	A	22,93	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 16 - Valores médios do cálcio nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm										
Leituras	Tratamentos									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6				
1	19,50 A	22,88 A	19,58 A	31,63 A	21,88 A	27,50 A				
2	20,33 A	23,08 A	22,20 A	33,48 A	33,63 A	34,27 A				
3	69,60 A	21,30 A	18,03 A	35,33 A	65,18 A	109,50 A				
4	30,40 A	18,05 A	20,47 A	45,25 A	65,90 A	102,95 A				
5	n.d -	n.d -	56,10 B	66,50 B	n.d -	205,00 A				
6	n.d -	23,80 C	49,60 BC	64,00 BC	152,00 AB	196,00 A				
7	20,65 B	14,05 B	29,85 B	54,53 B	91,08 B	163,57 A				
8	25,47 A	n.d -	n.d -	68,05 A	90,05 A	142,25 A				
9	n.d -	n.d -	n.d -	79,00 A	88,25 A	225,00 A				
10	n.d -	18,80 A	68,40 A	70,75 A	103,00 A	106,50 A				
11	n.d -	8,27 C	65,25 B	57,20 B	n.d -	230,00 A				
12	15,35 B	9,28 B	13,75 B	24,35 AB	26,43 AB	39,30 A				
13	10,35 B	7,83 B	10,77 B	22,10 AB	24,65 AB	33,27 A				
14	8,95 B	6,23 B	8,98 B	17,75 AB	23,38 AB	33,30 A				
Profundidade de 80 cm										
1	21,88 B	31,83 AB	30,43 AB	54,28 A	24,55 AB	33,35 A				
2	23,45 A	32,48 A	24,63 A	46,55 A	30,00 A	64,33 A				
3	12,07 A	26,90 A	23,15 A	68,18 A	89,55 A	148,50 A				
4	24,13 A	29,58 A	31,67 A	48,45 A	92,83 A	136,53 A				
5	n.d -	26,50 A	34,53 A	101,27 A	132,80 A	240,50 A				
6	n.d -	n.d -	35,70 B	109,03 B	143,40 AB	219,00 A				
7	16,88 B	18,23 B	40,38 B	111,15 AB	119,70 AB	199,77 A				
8	14,57 B	24,90 B	51,10 B	96,68 AB	101,35 AB	217,67 A				
9	14,10 B	n.d -	n.d -	85,35 B	204,90 AB	261,33 A				
10	n.d -	24,20 B	64,45 B	75,77 B	84,50 B	261,33 A				
11	n.d -	19,60 B	42,45 B	79,37 AB	102,20 AB	308,25 A				
12	17,13 B	12,20 B	15,83 B	21,65 B	40,43 A	45,07 A				
13	11,85 BC	10,70 C	15,13 BC	22,83 ABC	33,25 AB	37,50 A				
14	9,78 C	9,38 C	12,15 C	18,75 BC	28,45 AB	29,90 A				

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 17 - Valores médios do sódio nas profundidades de 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	3,40	A	2,37	A	2,17	A	2,30	A	2,03	A	2,96	A
2	2,20	B	1,73	B	3,03	B	3,23	AB	2,43	B	5,40	A
3	1,20	A	1,45	A	2,88	A	3,50	A	4,13	A	5,63	A
4	n.d	-	5,70	AB	4,0	B	n.d	-	n.d	-	7,20	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,05	*
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	16,60	*
7	1,80	B	2,10	B	3,53	AB	2,68	B	3,67	AB	6,43	A
8	1,20	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	6,50	A
9	n.d	-	n.d	-	8,00	B	n.d	-	n.d	-	6,50	A
10	17,20	A	7,20	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	2,30	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	1,43	B	1,80	B	2,47	B	1,85	B	2,55	B	6,10	A
13	1,00	A	0,90	A	1,83	A	0,80	A	1,38	A	2,60	A
14	0,95	A	1,35	A	1,78	A	0,95	A	1,30	A	2,47	A
Profundidade de 40 cm												
1	3,43	A	3,80	A	3,23	A	2,73	A	3,95	A	2,45	A
2	2,45	A	1,73	A	2,20	A	3,45	A	3,07	A	3,53	A
3	1,80	A	1,60	A	2,58	A	2,53	A	4,58	A	4,70	A
4	n.d	-	2,20	A	4,33	A	5,75	A	8,93	A	7,43	A
5	n.d	-	n.d	-	8,65	A	13,40	A	11,60	A	13,70	A
6	n.d	-	2,30	A	6,45	A	10,95	A	14,50	A	12,20	A
7	1,63	C	1,63	C	5,87	BC	6,60	ABC	12,50	AB	12,67	A
8	1,80	A	n.d	-	n.d	-	12,00	A	16,90	A	14,10	A
9	n.d	-	2,40	A	n.d	-	n.d	-	20,00	A	17,00	A
10	17,20	A	5,80	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	20,00	A
11	n.d	-	2,70	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	1,15	B	1,55	B	5,95	AB	4,65	AB	6,73	AB	7,53	A
13	0,60	B	1,23	AB	3,67	AB	4,28	AB	5,20	AB	4,00	A
14	0,53	B	1,25	AB	4,40	AB	2,98	AB	5,15	A	3,87	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 18 - Valores médios do sódio nas profundidades de 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm											
Leituras	Tratamentos										
	T1		T2		T3		T4		T5		T6
1	2,33	A	3,90	A	3,80	A	3,13	A	2,80	A	2,50 A
2	2,10	A	1,60	A	2,05	A	2,43	A	2,50	A	2,40 A
3	2,55	A	1,23	A	1,95	A	2,93	A	3,10	A	3,30 A
4	2,20	A	3,95	A	3,33	A	5,95	A	5,50	A	6,70 A
5	n.d	-	n.d	-	5,90	A	7,80	A	n.d	-	14,20 A
6	n.d	-	2,90	A	9,40	A	7,83	A	7,30	A	10,90 A
7	1,80	B	1,30	B	5,03	AB	6,98	AB	7,35	AB	12,00 A
8	1,97	A	n.d	-	n.d	-	11,00	A	11,95	A	13,40 A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	8,00	A	17,00	A	18,00 A
10	n.d	-	7,30	A	8,40	A	19,85	A	14,80	A	28,00 A
11	n.d	-	1,97	C	7,75	BC	14,80	AB	n.d	-	21,00 A
12	1,88	B	1,43	B	2,15	B	6,45	AB	6,30	AB	9,45 A
13	0,75	B	1,03	B	2,27	B	4,95	AB	4,05	AB	6,23 A
14	0,80	A	1,10	A	1,58	A	3,63	A	4,38	A	4,17 A
Profundidade de 80 cm											
1	2,85	A	4,80	A	4,23	A	4,18	A	3,43	A	3,05 A
2	2,08	A	2,30	A	2,20	A	4,63	A	2,10	A	4,20 A
3	2,02	A	1,75	A	1,95	A	3,55	A	3,45	A	4,90 A
4	3,33	A	2,35	A	4,20	A	5,48	A	4,40	A	9,03 A
5	n.d	-	2,90	A	4,40	A	9,27	A	7,37	A	15,00 A
6	n.d	-	n.d	-	4,00	A	12,23	A	12,47	A	14,07 A
7	1,78	B	1,60	B	4,15	AB	12,78	AB	12,20	AB	19,15 A
8	1,63	A	1,65	A	10,60	A	13,10	A	14,43	A	24,60 A
9	1,70	A	n.d	-	n.d	-	14,00	A	17,00	A	21,83 A
10	n.d	-	9,00	B	10,25	AB	16,03	AB	18,80	AB	26,13 A
11	n.d	-	3,60	A	8,65	A	12,93	A	22,10	A	32,50 A
12	2,08	B	2,15	B	3,45	AB	4,03	AB	6,50	AB	7,50 A
13	0,88	A	1,08	A	3,43	A	3,65	A	4,43	A	7,45 A
14	0,78	C	1,28	BC	2,85	ABC	3,20	ABC	4,48	A	3,73 AB

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 19 - Valores médios do enxofre nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	5,50	A	3,14	A	8,02	A	7,27	A	6,12	A	9,13	A
2	7,10	A	5,05	A	10,24	A	13,83	A	11,81	A	5,73	A
3	2,81	A	3,44	A	16,09	A	20,94	A	30,92	A	20,10	A
4	n.d	-	8,56	AB	3,42	B	n.d	-	n.d	-	25,69	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	25,69	*
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	199,84	*
7	4,21	B	14,04	AB	18,96	AB	18,96	AB	40,25	AB	153,06	A
8	0,88	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	3,53	A
9	n.d	-	n.d	-	3,22	A	n.d	-	n.d	-	3,53	A
10	52,08	A	47,74	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	5,63	A	n.d	-	n.d	-	5,00	A
12	3,91	A	6,39	A	12,79	A	8,88	A	15,98	A	n.d	-
13	9,20	A	6,81	A	14,08	A	11,92	A	18,06	A	10,90	A
14	6,34	A	1,71	A	9,02	A	5,44	A	8,12	A	3,90	A
Profundidade de 40 cm												
1	0,07	A	0,18	A	0,21	A	0,30	A	0,23	A	0,22	A
2	4,64	A	7,03	A	13,79	A	8,19	A	13,04	A	9,10	A
3	3,65	A	5,90	A	7,31	A	12,18	A	14,12	A	19,68	A
4	n.d	-	3,14	A	8,75	A	14,84	A	26,73	A	14,84	A
5	n.d	-	n.d	-	2,71	A	11,85	A	4,74	A	10,67	A
6	n.d	-	4,05	A	31,57	A	122,80	A	7,92	A	37,07	A
7	8,43	B	10,53	AB	40,25	AB	61,78	AB	130,59	A	70,21	AB
8	0,88	A	n.d	-	n.d	-	6,77	A	14,72	A	8,98	A
9	n.d	-	1,93	A	n.d	-	n.d	-	12,90	A	10,96	A
10	43,40	A	43,40	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	158,42	A
11	n.d	-	14,09	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	4,26	B	7,10	B	37,65	AB	41,56	AB	82,05	A	83,36	A
13	9,54	B	9,54	B	25,89	AB	47,02	AB	87,56	A	67,46	A
14	0,89	B	1,62	B	24,59	AB	30,87	AB	62,39	A	61,42	AB

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 20 - Valores médios do enxofre nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	0,20	A	0,21	A	0,27	A	0,29	A	0,28	A	0,26	A
2	4,73	A	7,58	A	8,12	A	17,41	A	10,31	A	8,83	A
3	5,62	A	6,39	A	10,75	A	16,65	A	9,98	A	11,34	A
4	4,28	A	6,14	A	12,37	A	18,12	A	11,99	A	13,22	A
5	n.d	-	n.d	-	1,69	A	3,84	A	n.d	-	2,03	A
6	n.d	-	2,32	A	25,20	A	58,51	A	27,23	A	32,73	A
7	10,30	A	11,94	A	43,53	A	49,85	A	42,13	A	82,85	A
8	0,98	A	n.d	-	n.d	-	4,56	A	5,30	A	4,27	A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	3,87	A	8,22	A	8,06	A
10	n.d	-	43,40	A	238,72	A	112,85	A	43,40	A	117,19	A
11	n.d	-	16,90	A	139,46	A	56,35	A	n.d	-	n.d	-
12	4,26	B	7,10	B	12,79	B	53,64	AB	72,94	AB	101,59	A
13	9,88	B	9,88	B	12,72	B	51,11	AB	53,15	A	42,25	AB
14	3,74	B	2,60	B	6,01	B	35,34	AB	52,89	AB	56,76	A
Profundidade de 80 cm												
1	0,22	A	0,23	A	0,72	A	0,25	A	0,34	A	0,29	A
2	5,26	A	9,49	A	15,84	A	12,29	A	13,56	A	11,47	A
3	6,47	A	8,78	A	19,54	A	43,22	A	11,95	A	17,43	A
4	5,71	A	8,35	A	17,79	A	40,38	A	14,70	A	29,40	A
5	n.d	A	3,39	A	2,26	A	8,47	A	2,93	A	7,11	A
6	n.d	A	n.d	A	19,60	A	44,89	A	85,05	A	194,05	A
7	11,02	A	14,04	A	21,06	A	91,27	A	112,34	A	192,38	A
8	1,18	A	0,74	A	3,53	A	5,89	A	8,93	A	16,34	A
9	0,97	A	n.d	A	n.d	A	8,38	A	11,12	A	11,07	A
10	n.d	A	43,40	A	69,45	A	133,11	A	166,38	A	254,64	A
11	n.d	A	8,45	A	70,43	A	120,20	A	200,00	A	225,38	A
12	6,04	B	9,24	B	20,96	AB	29,48	AB	84,19	AB	98,99	A
13	9,20	B	11,24	B	21,80	AB	32,03	AB	58,26	AB	71,77	A
14	2,84	B	5,20	B	19,82	AB	24,86	AB	56,30	A	49,39	AB

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

5.6 Distribuição do pH e da condutividade elétrica no solo

Pelas Figuras 33, 34, 35 e 36, podem ser observados os valores de pH e da condutividade elétrica (C.E) das soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes tratamentos e em cada período de observação (60, 75, 90, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255 e 270 dias após plantio, representadas como leituras de 1 a 14 respectivamente).

Os valores tanto do pH quanto da C.E apresentaram variações no solo, tendo um intervalo para o pH de 6,01 a 7,99, com um valor médio da vinhaça em torno de 4,6 e a condutividade elétrica ficou em torno de 0,05 a 3,36 dS m⁻¹, com valor médio da vinhaça em torno de 8,3 dS m⁻¹. Ou seja, há uma tendência do solo ir se tornando mais alcalino e com a elevada presença de sais, aumenta-se o valor da condutividade elétrica (a própria vinhaça já apresentava um valor elevado de CE).

Pôde-se observar pelas Figuras 34 e 35 um aumento dos valores de pH ao longo das leituras do experimento (com o passar do tempo) e ao longo da profundidade no perfil de solo. Muito devidamente à presença do íon cálcio, tornando o solo mais alcalino, principalmente nos tratamentos 5 e 6. Maia e Ribeiro (2004) encontraram nas camadas mais profundas do solo maior acidez em relação às camadas superficiais, muito provavelmente devido à aplicação de corretivos (calcário) e adubações que favorecem ao aumento do pH do solo. Por outro lado, Nunes et al. (1981) relatam que o aumento do pH do solo é resultante do aumento de bases trocáveis, principalmente o K⁺, incorporadas pela aplicação de vinhaça que, em geral, ocorrem nas camadas mais superficiais. Já Brito et al. (2005) verificou aumento do pH em todos os solos estudados e com as doses de vinhaça de 350 e 700 m³ ha⁻¹. A fertirrigação com vinhaça ao longo dos anos não alterou o pH dos solos (BEBÉ et al., 2009).

Pelas Figuras 35 e 36, pode-se observar um aumento dos valores da CE, ao longo do tempo e ao longo do perfil de solo, cujo perfil acompanha e evidencia a movimentação dos sais (potássio e sódio), bem como aqueles já presentes na vinhaça.

Segundo Brito et al. (2005) a aplicação inadequada de vinhaça pode contribuir para o aumento dos elementos químicos no solo, principalmente de K e sódio (Na)

que influenciam em um aumento da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo.

Segundo Camargo (1987), de modo geral, o incremento de Ca, Mg e K, resulta em um aumento da CEes que representa a quantidade de cátions solúveis no extrato de saturação do solo.

Um ponto importante na aplicação da vinhaça quanto ao pH do solo, uma vez que o pH tem comportamento inverso do Al, é que vem ocorrendo a diminuição da concentração do Al no solo que recebe a aplicação de vinhaça. Esse efeito positivo do uso da vinhaça, aumentando os valores de pH, consegue-se reduzir ou até mesmo eliminar os efeitos tóxicos do Al trocável do solo. Por conseguinte, a acidez ativa e a saturação por alumínio também diminuem, uma vez que ambas estão relacionadas às concentrações de H^+ e Al^{3+} , devido a matéria orgânica contida na vinhaça quando incorporada ao solo, ela é colonizada por fungos, os quais a transformam em húmus, neutralizando a acidez do meio preparando, deste modo, o caminho para proliferação bacteriana; assim, quando adicionada como fertilizante, favorece também o desenvolvimento desses microrganismos os quais atuam na mineralização e imobilização do nitrogênio e na sua nitrificação, desnitrificação e fixação biológica, bem como de microrganismos participantes dos ciclos biogeoquímicos de outros elementos.

Figura 33 - 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 34 - 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 35 - 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 36 - 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

Nas Tabelas 21 e 22, observa-se que a variação do pH ficou 6,5 a 7,5, tornando o solo mais alcalino, encontrando alguns valores pontuais acima de 7,5. Ao verificar os dados, estatisticamente, verificou-se diferença significativa a partir de 40 cm, já ao final do experimento, e principalmente na profundidade de 80 cm.

Tabela 21 - Valores médios do pH nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	7,00	A	6,64	A	6,39	A	6,71	A	7,15	A	6,85	A
2	6,83	A	6,59	A	6,47	A	6,48	A	6,54	A	6,37	A
3	6,82	A	6,13	B	6,09	B	6,27	AB	6,41	AB	6,46	AB
4	n.d	-	n.d	-	7,00	A	n.d	-	n.d	-	6,39	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,18	*
7	6,78	A	6,71	A	6,55	A	6,93	A	6,60	A	6,60	A
8	7,11	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	6,84	A
9	n.d	-	n.d	-	7,40	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
10	7,94	A	7,61	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	6,68	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	6,78	A	6,80	A	6,53	A	6,85	A	6,90	A	6,50	A
13	7,27	A	7,21	A	7,22	A	7,33	A	7,33	A	7,40	A
14	6,69	A	6,50	A	6,56	A	6,41	A	6,60	A	6,62	A
Profundidade de 40 cm												
1	6,41	A	6,85	A	6,70	A	6,66	A	6,68	A	6,75	A
2	6,91	A	6,58	AB	6,37	B	6,43	B	6,26	B	6,33	B
3	6,43	A	6,22	A	6,11	A	6,26	A	6,07	A	6,14	A
4	n.d	-	6,79	A	6,59	A	6,45	A	6,41	A	6,49	A
5	n.d	-	n.d	-	6,58	A	6,60	A	6,99	A	6,76	A
6	n.d	-	6,81	A	7,10	A	6,74	A	n.d	-	7,11	A
7	6,77	A	6,67	A	6,43	A	6,53	A	6,60	A	6,67	A
8	6,86	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,67	A	6,86	A
9	n.d	-	7,37	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,41	A
10	7,76	A	7,39	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,41	A
11	n.d	-	7,02	A	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	6,73	A	6,78	A	6,48	A	6,40	A	6,60	A	6,80	A
13	7,47	A	7,21	A	7,27	A	7,32	A	7,55	A	7,52	A
14	6,62	AB	6,38	B	6,58	AB	6,46	AB	6,58	AB	6,76	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 22 - Valores médios do pH nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	6,53	A	6,90	A	6,58	A	6,40	A	6,50	A	6,53	A
2	6,91	A	6,60	AB	6,43	AB	6,44	AB	6,27	B	6,39	AB
3	6,44	A	6,24	AB	6,10	B	6,22	AB	6,01	B	6,16	B
4	7,05	A	6,83	A	6,46	A	6,53	A	6,56	A	6,58	A
5	n.d	-	n.d	-	6,38	A	6,63	A	n.d	-	6,55	A
6	n.d	-	7,10	A	6,65	A	7,08	A	7,34	A	7,35	A
7	6,73	A	6,70	A	6,38	A	6,60	A	6,49	A	6,70	A
8	7,34	A	n.d	-	n.d	-	6,92	A	6,49	A	6,68	A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	7,60	A	7,07	A	7,23	A
10	n.d	-	7,23	A	7,99	A	7,89	A	7,34	A	6,83	A
11	n.d	-	7,05	A	6,66	A	6,63	A	n.d	-	7,33	A
12	6,68	A	6,80	A	6,55	A	6,63	A	6,70	A	6,83	A
13	7,51	AB	7,23	B	7,47	AB	7,36	AB	7,36	AB	7,80	A
14	6,62	AB	6,41	B	6,47	B	6,51	B	6,54	AB	6,82	A
Profundidade de 80 cm												
1	6,54	A	6,67	A	6,46	A	6,45	A	6,63	A	6,70	A
2	6,78	A	6,60	AB	6,43	AB	6,53	AB	6,44	AB	6,36	B
3	6,34	AB	6,38	A	6,19	BC	6,26	AB	6,04	C	6,18	BC
4	6,72	ABC	6,87	A	6,55	BC	6,78	AB	6,56	BC	6,44	C
5	n.d	-	7,15	A	6,38	B	6,77	AB	6,68	AB	6,61	AB
6	n.d	-	n.d	-	7,15	A	7,07	A	7,07	A	7,08	A
7	6,78	A	6,77	A	6,36	B	6,62	AB	6,50	AB	6,62	AB
8	6,98	A	7,42	A	7,25	A	6,90	A	6,82	A	6,73	A
9	7,43	AB	n.d	-	n.d	-	7,94	A	6,72	B	7,08	AB
10	n.d	-	7,18	A	6,81	A	7,57	A	7,16	A	7,07	A
11	n.d	-	6,78	A	6,71	A	6,94	A	7,07	A	7,17	A
12	6,80	A	6,73	A	6,63	A	6,83	A	6,75	A	6,98	A
13	7,51	B	7,36	B	7,28	B	7,59	AB	7,47	AB	7,89	A
14	6,67	A	6,56	A	6,55	A	6,70	A	6,70	A	6,95	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Observou-se uma variação da CE entre 0,07 a 3,37, sendo o maior valor encontrado no tratamento 6 na profundidade de 80 cm.

Pelo teste de Tukey a 5% probabilidade, os tratamentos se diferenciaram entres si, principalmente os tratamentos que receberam vinhaça com os que não receberam vinhaça, conforme observado nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23 - Valores médios da condutividade elétrica nas profundidades 20 e 40 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 20 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	0,51	A	0,32	A	0,45	A	0,43	A	0,60	A	0,71	A
2	0,27	B	0,20	B	0,39	AB	0,47	AB	0,59	AB	0,96	A
3	0,28	AB	0,18	B	0,50	AB	0,80	AB	0,75	AB	1,25	A
4	n.d	-	n.d	-	0,53	B	n.d	-	n.d	-	1,17	A
5	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
6	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	3,03	*
7	0,29	B	0,14	B	0,42	B	0,39	B	0,58	AB	1,14	A
8	0,19	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-	1,02	A
9	n.d	-	n.d	-	0,69	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
10	0,85	A	0,26	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
11	n.d	-	n.d	-	0,10	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	0,10	A	0,08	A	0,15	A	0,52	A	0,31	A	0,55	A
13	0,08	A	0,05	A	0,14	A	0,11	A	0,19	A	0,27	A
14	0,10	A	0,09	A	0,17	A	0,11	A	0,21	A	0,26	A
Profundidade de 40 cm												
1	0,38	A	0,40	A	0,33	A	0,40	A	0,43	A	0,38	A
2	0,29	AB	0,23	B	0,33	AB	0,46	AB	0,53	A	0,49	A
3	0,32	B	0,21	B	0,40	B	0,51	AB	0,71	AB	0,97	A
4	n.d	-	0,20	A	0,31	A	0,73	A	1,13	A	1,18	A
5	n.d	-	n.d	-	0,87	A	1,84	A	1,21	A	2,31	A
6	n.d	-	0,41	A	0,97	A	2,79	A	n.d	-	2,97	A
7	0,27	C	0,14	C	0,57	BC	0,75	BC	1,36	AB	1,80	A
8	0,26	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	1,70	A	1,73	A
9	n.d	-	0,22	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	3,00	A
10	0,34	B	0,15	B	n.d	-	n.d	-	n.d	-	1,99	A
11	n.d	-	0,10	*	n.d	-	n.d	-	n.d	-	n.d	-
12	0,13	B	0,08	B	0,28	AB	0,33	AB	0,61	AB	1,05	A
13	0,10	B	0,07	B	0,22	AB	0,32	AB	0,60	A	0,68	A
14	0,09	BC	0,07	C	0,22	ABC	0,26	ABC	0,46	AB	0,55	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Tabela 24 - Valores médios da condutividade elétrica nas profundidades 60 e 80 cm em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Profundidade de 60 cm												
Leituras	Tratamentos											
	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
1	0,33	A	0,39	A	0,38	A	0,55	A	0,40	A	0,45	A
2	0,26	A	0,30	A	0,28	A	0,45	A	0,40	A	0,52	A
3	0,23	B	0,27	B	0,27	B	0,52	AB	0,57	AB	0,82	A
4	0,37	A	0,22	A	0,33	A	0,65	A	0,79	A	1,16	A
5	n.d	-	n.d	-	0,69	A	0,90	A	n.d	-	2,66	A
6	n.d	-	0,33	B	0,82	AB	1,21	A	1,37	A	3,17	A
7	0,21	B	0,14	B	0,44	B	0,75	AB	0,89	AB	2,05	A
8	0,23	B	n.d	-	n.d	-	0,67	AB	1,22	AB	2,00	A
9	n.d	-	n.d	-	n.d	-	0,58	A	2,14	A	2,99	A
10	n.d	-	0,25	B	1,40	AB	1,32	A	1,02	AB	3,00	A
11	n.d	-	0,11	B	0,95	B	0,85	B	n.d	-	3,34	A
12	0,18	B	0,09	B	0,17	B	0,45	AB	0,59	AB	0,95	A
13	0,12	B	0,08	B	0,15	B	0,37	AB	0,43	AB	0,77	A
14	0,11	B	0,08	B	0,13	B	0,28	AB	0,39	AB	0,58	A
Profundidade de 80 cm												
1	0,37	B	0,53	AB	0,60	AB	0,89	A	0,44	AB	0,43	AB
2	0,26	A	0,41	A	0,34	A	0,80	A	0,36	A	0,54	A
3	0,23	A	0,39	A	0,37	A	0,74	A	0,65	A	0,72	A
4	0,30	A	0,35	A	0,48	A	0,87	A	0,86	A	0,99	A
5	n.d	-	0,35	A	0,49	A	1,41	A	1,18	A	1,39	A
6	n.d	-	n.d	-	0,57	B	1,80	AB	1,76	AB	3,03	A
7	0,17	B	0,19	B	0,43	B	1,33	AB	1,40	AB	2,24	A
8	0,12	B	0,21	B	0,74	AB	1,18	AB	1,29	A	2,14	A
9	0,19	A	n.d	-	n.d	-	1,75	A	2,31	A	2,89	A
10	n.d	-	0,29	B	0,92	AB	1,46	AB	1,70	AB	2,77	A
11	n.d	-	0,20	B	0,74	B	1,27	AB	2,37	A	3,37	A
12	0,19	C	0,12	C	0,22	C	0,37	BC	0,76	AB	0,99	A
13	0,13	B	0,12	B	0,23	B	0,34	AB	0,59	AB	0,75	A
14	0,12	C	0,11	C	0,17	C	0,28	BC	0,46	AB	0,57	A

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

n.d - dados não disponíveis.

* - quando somente um tratamento teve dados coletados.

Notou-se que houve um incremento na condutividade elétrica do solo conforme o aumento da dosagem aplicada de vinhaça e do tempo de aplicação, o que já era esperado pela alta concentração de sais na vinhaça, principalmente do potássio.

5.7 Avaliação das características físicas do solo

5.7.1 Granulometria

Os atributos físicos do solo (% argila, %silte, %areia, %argila dispersa em água (ADA) e grau de flocculação) podem ser conferidos pelas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41, avaliados após a colheita da cana-de-açúcar. De uma maneira geral, não foi observada diferença, durante o período da pesquisa, entre os referidos tratamentos e entre as profundidades estudadas.

Em termos da fração argila (Figura 37), pôde-se observar que os maiores valores foram obtidos na camada de 60-80 cm, em todos os tratamentos. Em se tratando de Nitossolos, que são solos que em geral, apresentam uniformidade textural em profundidade, não se esperavam variações significativas da quantidade de argila em profundidade. As frações de silte e areia decaíram conforme o aumento da profundidade, isto já era esperado pelo tipo de solo encontrado no experimento (Figuras 38 e 39).

Em termos da argila dispersa em água, verificou-se um aumento dos valores da nas profundidades de 20 e 40 cm para o tratamento 2 (fertirrigado) em relação aos demais tratamentos (Figura 40). O solo sob condições do tratamento 2 apresentou os maiores valores de argila dispersa em água, possivelmente, ligado à fonte de potássio utilizada e à maior saturação por cloreto neste solo. Entre os tratamentos com aplicação de vinhaça apresentaram os menores valores de argila dispersa em água, principalmente no tratamento 4 (2x dose Cetesb), o que provavelmente está relacionado aos maiores teores de cátions considerados flocculantes, como cálcio e magnésio, nesses solos. Camargo et al. (1988) verificaram redução nos teores de argila dispersa em solos que receberam vinhaça, comentando que o aumento da concentração salina no solo promovida pela vinhaça, reduz a dupla camada difusa, com consequente aproximação das partículas do solo. A maior atividade microbiológica em solos que recebem vinhaça, como verificado por Lopes et al. (1986), pode também ter influência na redução da dispersão de argila, devido à produção de mucilagem, que favorece a agregação do solo.

O grau de floculação não foi influenciado pelas adições da vinhaça (Figura 41), mas aumentou em termos de profundidade. Prado e Centurion (2001) em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média cultivado com cana-de-açúcar encontraram valores 39,95, 33,44 e 31,49 % de grau de floculação nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm respectivamente.

A agregação do solo é influenciada por atributos químicos, como cátions trocáveis, óxidos e matéria orgânica do solo (MUNNER; OADES, 1989). A predominância do íon Ca no complexo de troca, além de proporcionar a floculação adequada das argilas, contribui para o aumento da atividade biológica, o que favorece a formação de agregados. Já a predominância de Na ou K no complexo de troca acarreta dispersão dos coloides e, conseqüentemente, redução da estabilidade dos agregados (MEURER et al., 2000). Segundo Camilotti (2010) os atributos físicos do solo não foram alterados pela aplicação de lodo de esgoto e/ou vinhaça com o objetivo de fornecer N e K para a nutrição da cana-de-açúcar.

Figura 37 - Distribuição da argila, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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 38 - Distribuição do silte, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb, 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 39 - Distribuição da areia, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com $\frac{1}{2}$ dose Cetesb, 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 40 - Distribuição da argila dispersa em água, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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 41 - Distribuição do grau de floculação, nos diferentes tratamentos (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, 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

A análise de variância efetuada para cada profundidade revelou que os atributos do solo, avaliados após a colheita da cana-de-açúcar, não foram afetados pela aplicação cumulativa de vinhaça desde o plantio da cultura (Tabela 18).

Na Tabela 25 são apresentados os valores médios de Argila, Silte, Areia, Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação, obtidos pelo teste de Tukey para o fator profundidade, em nível de 5% de probabilidade. Observou-se, tanto entre os tratamentos quanto nas profundidades, que as características analisadas não apresentaram diferença significativa em relação à profundidade e em relação aos diferentes tratamentos, durante o período da condução da pesquisa.

Tabela 25 - Valores médios das características físicas do solo nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Argila (%)											
Profundidade	Tratamentos										
(m)	T1		T2		T3		T4		T5		T6
0,20	55,33	Aa	55,94	Aa	53,30	Aa	54,96	Aa	52,72	Aa	54,94 Aa
0,40	60,17	Aa	65,11	Aa	64,97	Aa	58,84	Aa	53,55	Aa	60,17 Aa
0,60	72,00	Aa	70,92	Aa	72,45	Aa	68,26	Aa	63,55	Aa	71,05 Aa
0,80	72,55	Aa	70,10	Aa	71,62	Aa	68,84	Aa	64,38	Aa	71,04 Aa
Silte (%)											
0,20	19,55	Aa	20,74	Aa	21,73	Aa	21,03	Aa	21,48	Aa	22,69 Aa
0,40	14,53	Aa	15,71	Aa	15,07	Aa	18,26	Aa	21,48	Aa	17,69 Aa
0,60	11,22	Aa	12,43	Aa	13,64	Aa	12,17	Aa	16,48	Aa	12,71 Aa
0,80	11,78	Aa	13,25	Aa	13,41	Aa	13,83	Aa	15,65	Aa	12,71 Aa
Areia (%)											
0,20	25,12	Aa	23,32	Aa	24,97	Aa	24,01	Aa	25,80	Aa	22,37 Aa
0,40	22,90	Aa	19,18	Aa	19,96	Aa	22,89	Aa	24,97	Aa	19,58 Aa
0,60	16,78	Aa	16,65	Aa	14,97	Aa	19,57	Aa	19,97	Aa	16,24 Aa
0,80	15,67	Aa	16,65	Aa	14,97	Aa	17,33	Aa	19,88	Aa	16,24 Aa
Argila Dispersa em Água (%)											
0,20	39,88	ABa	40,22	Aa	40,01	ABa	39,65	Ba	40,02	ABa	39,95 ABa
0,40	39,89	Aa	40,32	Aa	39,99	Aa	39,92	Aa	39,98	Aa	40,06 Aa
0,60	39,87	Aa	40,10	Aa	40,14	Aa	39,76	Aa	40,00	Aa	40,05 Aa
0,80	39,91	Aa	40,08	Aa	40,04	Aa	39,81	Aa	39,94	Aa	40,02 Aa
Grau de Floculação (%)											
0,20	22,73	Aa	24,87	Aa	28,31	Aa	27,12	Aa	29,49	Aa	24,16 Aa
0,40	29,45	Aa	31,88	Aa	42,84	Aa	30,79	Aa	34,99	Aa	29,71 Aa
0,60	44,32	Aa	42,89	Aa	43,95	Aa	44,04	Aa	39,84	Aa	36,12 Aa
0,80	44,28	Aa	43,58	Aa	44,08	Aa	43,96	Aa	40,89	Aa	37,18 Aa

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

5.7.2 Condutividade hidráulica e umidade na capacidade de campo

Em relação aos valores obtidos de condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) e a umidade na capacidade de campo, pode-se observar que não houve um efeito significativo a 5% de probabilidade entre os tratamentos, não havendo efeito significativo para as doses aplicadas de vinhaça.

As mudanças nas propriedades químicas do solo promovidas pela aplicação da vinhaça podem ter alterado a estabilidade de agregados e a dispersão de argila

do solo, influenciando em sua compactação, cujas principais consequências desta compactação são: o aumento da densidade, a diminuição do tamanho dos poros e a redução da condutividade hidráulica (KLEIN; LIBARDI, 2002). Com a utilização do solo para as atividades agrícolas, é comum serem encontradas camadas mais compactadas na parte superior do seu perfil. Nessas áreas intensivamente utilizadas para a produção agrícola, os valores de densidade do solo são mais elevados, afetando negativamente a aeração e prejudicando a penetração e proliferação de raízes no solo (CORSINI, 1992; CORSINI; FERRAUDO, 1999).

A condutividade hidráulica não foi alterada diante da aplicação de vinhaça com a finalidade de fornecer todo o N e K para a cultura da cana-de-açúcar. A condutividade hidráulica do solo apresentou valores máximos de 4,89 cm h⁻¹ e 5,27 cm h⁻¹, respectivamente no início e ao fim do ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Na Tabela 26 estão as médias da condutividade hidráulica nas diferentes profundidades em função dos tratamentos no final do experimento, onde foi realizado o teste de Tukey a 5%,

Tabela 26 - Valores médios da condutividade hidráulica nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Condutividade Hidráulica (cm,h⁻¹)									
Profundidade		Tratamentos							
(m)		T1		T2		T3		T4	
0,20		4,89	Aa	3,78	Aa	2,40	Aa	5,27	Aa
0,40		0,25	Ab	0,04	Ab	0,50	Ab	0,10	Ab
0,60		0,10	Ab	0,00	Ab	0,00	Ab	0,00	Ab
0,80		0,00	Ab	0,00	Ab	0,00	Ab	0,00	Ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

Os valores da Tabela 26, evidenciam que a condutividade hidráulica não apresentou diferença significativa a nível de 0,05 de probabilidade, entre os tratamentos independente da profundidade, havendo somente diferença significativa entre a primeira profundidade de 0,20 cm com as demais. Isto se deve provavelmente à própria estrutura do solo do que pela adição de vinhaça, diferenciando de Lobato et al. (1998), em pesquisa realizada com colunas de solo, preenchidas com um Latossolo Roxo distrófico (36% de argila) e verificaram que em

condições de saturação, a condutividade hidráulica diminuiu com o aumento das dosagens de vinhaça, notadamente para os tratamentos com mais de 400 m³ ha⁻¹ e na condição de não saturação, a condutividade hidráulica aparentemente não sofreu qualquer interferência expressiva, quando se utilizou vinhaça na dosagem de 1.000 m³ ha⁻¹. O valor de 17,4 mm h⁻¹ de condutividade hidráulica, foi obtida por Lopes et al. (2003) em um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, cultivado com cana-de-açúcar, sem aplicações de resíduos,

Na Tabela 27 encontram-se os valores de umidade na capacidade de campo, para os diferentes tratamentos nas diferentes profundidades, ficando evidente que após um ano de aplicação de vinhaça não houve diferença estatística entre os tratamentos, conforme discutido anteriormente. Como a capacidade de retenção de água no solo é dependente das características físicas e como não houve variação dessas características, esperava-se que também não houvesse variação na capacidade máxima de retenção de água pelo solo.

Tabela 27 - Valores médios da umidade do solo na capacidade de campo nas diferentes profundidades em função dos tratamentos - Piracicaba, SP, 2012¹

Umidade da Capacidade de Campo (cm ³ cm ⁻³)										
Profundidade	Tratamentos									
(cm)	T1	T2	T3	T4	T5	T6				
0,20	0,29 A	0,25 A	0,31 A	0,27 A	0,27 A	0,26 A				
0,40	0,35 A	0,34 A	0,32 A	0,36 A	0,35 A	0,34 A				
0,60	0,38 A	0,40 A	0,40 A	0,37 A	0,39 A	0,38 A				
0,80	0,40 A	0,40 A	0,39 A	0,41 A	0,38 A	0,40 A				

¹ Médias seguidas pela, não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

5.8 Entupimento dos gotejadores

Durante a condução da pesquisa e das avaliações realizadas não ficou evidenciado que ocorreram problemas de entupimento nos gotejadores utilizados. Considerando todas as parcelas irrigadas o sistema apresentou uma uniformidade de distribuição de 94,02% e um coeficiente de variação de 6,29% (Tabela 28), Comparando entre os tratamentos, pôde-se observar pela Tabela 29 que o tratamento T2 (Fertirrigado com adubos químicos) apresentou o maior coeficiente de variação (10,25%) e o menor valor de vazão média (0,98 L h⁻¹). Já os tratamentos

com as diferentes doses de vinhaça (T3 a T6 fertirrigados com vinhaça), cujos volumes aplicados de vinhaça, são respectivamente de: 176 m³ ha⁻¹; 352 m³ ha⁻¹; 704 m³ ha⁻¹ e 1056 m³ ha⁻¹, apresentaram menores CV, entre 3,32 e 5,24%, resultados que vão de acordo com Lelis Neto et al. (2010) que estudaram diferentes tipos de gotejadores, inclusive os mesmos utilizados nessa pesquisa (modelo Hydrolite), submetidos à aplicação de vinhaça, onde os valores de CV foram inferiores a 5% e uma vazão média de 1,05 L h⁻¹ ao 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 deve-se somente à aplicação de vinhaça, à fertirrigação e à qualidade da água da irrigação, uma vez que o projeto está com as dimensões hidráulicas corretas.

Tabela 28 - Valores calculados para o teste de uniformidade de distribuição do sistema de irrigação

Índices de Avaliação	Valor
Média da Vazão (L h ⁻¹)	1,02
Desvio padrão	0,06
Coeficiente de variação (%)	6,29
Uniformidade de distribuição (%)	94,02

Tabela 29 - Valores de vazão média, desvio padrão e coeficiente de variação, para os tratamentos (T2 a T6) (T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb)

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

5.9 Produtividade da cana-de-açúcar

Em termos de produtividade de colmos de cana-de-açúcar, pôde-se observar que houve um aumento da produtividade devido à aplicação de vinhaça (T1: Sem irrigação com adubação convencional, T2: Fertirrigada sem vinhaça, T3: Fertirrigada com ½ dose Cetesb, T4: Fertirrigada com dose Cetesb, T5: Fertirrigada com 2x dose Cetesb e T6: Fertirrigada com 3x dose Cetesb). Os tratamentos de 3 a 6, fertirrigados com vinhaça, apresentaram os respectivos volumes aplicados de vinhaça: 176 m³ ha⁻¹; 352 m³ ha⁻¹; 704 m³ ha⁻¹ e 1056 m³ha⁻¹. Principalmente, os tratamentos T4, T5 e T6 diferenciariam significativamente dos tratamentos T1 e T2. Entre os tratamentos que receberam vinhaça não ocorreu diferença significativa entre eles. 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,

Foi mensurada a massa das ponteiros de cana-de-açúcar com intuito de verificar a influência das diferentes doses de vinhaça no aumento da vegetação das plantas, juntamente com os dados de biometria, Observa-se na Tabela 31 que a massa das ponteiros também aumentou conforme aumentaram-se as doses de vinhaça.

Tabela 30 - Produtividade de colmos de cana-de-açúcar

Tratamento	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Colmos (Mg ha⁻¹)	144,70 C	165,15 BC	184,85 AB	204,55 A	203,03 A	199,24 A

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

Tabela 31 - Massa verde das ponteiros de cana-de-açúcar

Tratamento	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Ponteira (Mg ha⁻¹)	38,75 B	47,51 AB	46,79 AB	54,59 AB	60,18 A	61,08 A

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

6 CONCLUSÕES

Durante o período conduzido pela pesquisa, em seu primeiro ano (cana planta), evidenciou-se que a aplicação de vinhaça causou uma dinâmica dos seus principais componentes químicos e que para verificar alterações físicas no solo, seria necessário um maior período de avaliação. Portanto, diante das condições experimentais e dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

a) Os íons potássio, cálcio, enxofre e sódio, apresentaram uma maior lixiviação em relação ao volume de vinhaça no solo estudado em função do volume aplicado, ou seja, quanto maior a quantidade de vinhaça aplicada, maior foi a concentração dos cátions encontrados na solução do solo em profundidade;

b) Para que se possa observar alguma alteração em termos de pH seria necessário de um maior intervalo de tempo maior para a percepção de suas diferenças, porém ficou evidente o aumento do pH devido à aplicação de vinhaça e que nesse caso, devido à presença de sais, a vinhaça apresentou elevados valores de CE;

c) As características físicas do solo evidenciaram positivamente que os efeitos da vinhaça mesmo em alta concentração no primeiro ano não influenciou nas características analisadas, sugerindo-se talvez um maior tempo de aplicação e avaliação;

d) Em termos da eficiência do gotejamento subsuperficial, com o uso do gotejador Hydrolite (regular), não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, nem tão pouco problemas de obstrução em se tratando da aplicação de vinhaça;

e) A produtividade e a massa verde da cana-de-açúcar corresponderam positivamente com o aumento do volume de vinhaça aplicado, apresentando um aumento conforme o aumento da dosagem aplicada de vinhaça, porém, é necessário observar a Norma da CETESB para evitar a lixiviação dos íons, para que não ocorra contaminação do lençol freático.

REFERÊNCIAS

AGUJARO, R. O uso da vinhaça na Usina Tamoio como fertilizante. **Saccharum**, São Paulo, v. 2, p. 4, mar. 1979.

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JUNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação a disponibilidade hídrica e unidade térmica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

ALMEIDA, J.R. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba: ESALQ, Instituto Zimotécnico, 1952. 24 p. (Boletim, 3).

ARGENTON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp), na região de Piracicaba**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; SINGH, K.; SINGH, B. Yields and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1867-1876, 2000.

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, ARAÚJO, 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.

BEBÉ, F.V. **Avaliação de solos sob diferentes períodos de fertirrigação com vinhaça e alterações na qualidade do efluente drenado**. 2007. 49 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007

BEBÉ, F.V.; ROLIM, M.R.; PEDROSA, E.M.R.; SILVA, G.B.; OLIVERIA, V.S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 781-787, 2009.

BENITES, V.M.; MENDONÇA, E.S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 215-221, 1998.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº. 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 26 mar. 2004. Seção 1, 266 p.

BRITO, F.L.; LYRA, M.R.C.; ROLIM, M.M. Efeito da aplicação de vinhaça em colunas de solo: avaliação do poder de remoção de alguns parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Resumos...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 52-56, 2005. Suplemento.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M.O.; TASSO JUNIOR, L.C.; SILVA, A.R. Grau de floculação e condutividade hidráulica de um solo tratado com lodo de esgoto e vinhaça. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 1, n. 1, p. 13-20, 2010.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M.O.; SILVA, A.R.; TASSO JUNIOR, L.C.; NOBILE, F.O.; NOGUEIRA, G.A.; PRATI, F. Produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar cultivada com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 24, n. 3, p. 32-35, 2006.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; BERTON, R.S.; TEÓFILO SOBRINHO, J. Características físicas de solo que recebeu vinhaça. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 15-18, 1988

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 Agrônomo, 1987. 23 p. (IAC. Boletim, 9).

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; ROUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação de palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CASAGRANDE, A.A.; VASCONCELOS, A.C. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 822.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIERIA. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/>>. Acesso em: 03 abr. 2011.

CENTURIÓN, R.E.B.; MORAES, V.A.; PERCEBON, C.M.; RUIZ, R.T. Destinação final da vinhaça produzida por destilarias autônomas e anexas, enquadradas no programa nacional do álcool. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11., 1989, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABES, 1989. p. 7.

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.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M.O.; TASSO JÚNIOR, 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, n. 1, p. 196-203, 2008

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

CORSINI, P.C. Problemas causados pela compactação dos solos. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 18, p. 8-12, 1992.

CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e na macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 289-298, 1999.

CRUZ, R.L.; RIGHETTO, A.M.; NOGUEIRA, M.A. Experimental investigation of soil and groundwater impacts caused by vinasse disposal. In: INTERNATIONAL SEMINAR OF POLLUTION, PROTECTION AND CONTROL OF GROUND WATER, 1990, Porto Alegre. p. 66-74.

CUNHA, R.C.A.; COSTA, A.C.S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D.C.P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, London, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981

DIAS, N.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**. 2004. 131 p. Tese (Doutorado Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

DOMÉNECH, X. **Química del suelo**. Madrid: Miraguano, 1995. 87 p.

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

EXNER, M.E.; BURBACH, M.E.; WATTS, D.G.; SHEARMAN, R.C.; SPALDING, R.F. Deep nitrate movement in the unsaturated zone of simulated urban lawn. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 20, p. 658-662, 1991.

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.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 24-32.

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

FNP CONSULTORIA & COMERCIO. Cana-de-açúcar. In: _____. **Agrianual 2008: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2008. p. 235-264.

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.

GONÇALVES, C.A.S. **Estudo do tratamento físico-químico da vinhaça utilizando a técnica do planejamento fatorial**. 2000. 257 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

GUILHERME, L.R.G. Causas da baixa fertilidade. **DBO Agrotecnologia**, São Paulo, v. 2, p. 6, 2005.

HERNANDEZ, F.B.T. Irrigação aumenta produtividade e qualidade da cana. **Revista Campo e Negócio**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 78-79, abr. 2006.

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

JORNAL CANA, Ribeirão Preto, jun. 2007. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/pdf/162/%5Ctecagric.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2011.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002.

LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618 p.

LANDELL, M.G.A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDOIA, M.A.P.; SILVA, M.A.; XAVIER, M.A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

LEAL, J. R.; AMARAL SOBRINHO, N.M.R.; VELLOSO, A.C.X.; ROSSIELLO, R.O.P. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 257-261, 1983

LELIS NETO, J.A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

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. St. Joseph: ASABE, 2010. v. 1, p. 500-515.

LEME, E.J.A.; SILVA, V.C.; HENRIQUE, J.L.P.; MICKLOS, J.E. **O uso do auto-propelido na aplicação de vinhaça por aspersão**: viabilidade tecno-econômica. Piracicaba: IAA, Planalsucar, 1987. 65 p. (Boletim)

LI, J.; ZHANK, J.; REN, L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, n. 1, p. 19-30, 2003.

LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T.A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 90, p. 119-139, 1998.

LOBATO, E.J.V.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Condutividade hidráulica de amostras remoldadas de um latossolo roxo distrófico tratado com água/vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 181-188, 1998.

LOPES, A.S.; VALPASSOS, M.A.R.; CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, I. Permeabilidade e agregação de um latossolo vermelho sob três sistemas de manejo no município de Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 504-510, 2003.

LOPES, E.S.; PERON, S.C.; PORTUGAL, E.P.; CAMARGO, O.A.; FREITAS, S.S. Atividade respiratória de solo tratado com vinhaça e herbicida. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 205-210. 1986.

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 117 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LUZ, P.H.C. Novas tecnologias no uso da vinhaça e alguns aspectos legais. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2., 2005, Botucatu. **Anais...**

LYRA, M.R.C.; ROLIM, M.M. **Topossequência de solos fertigados com vinhaça:** contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. 2002. 122 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2002.

LYRA, M.R.C.C.; ROLIM, M.M.; SILVA, J.A.A. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.

MADEJÓN, E.; LOPEZ, R.; MURILLO, J.M.; CABRERA, F. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 55-65, 2001

MAGRO, J.A. Irrigação em cana. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, n. 1, p. 44-46, 2000.

MAIA, J.L.T.; RIBEIRO, M.R. Cultivo contínuo da cana-de-açúcar e modificações químicas de um Argissolo Amarelo fragipânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1127-1132, 2004.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J.C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2000. 200 p.

MATIOLI, C.S.; MENEZES, J.A. Otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA, 1984, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Copersucar, 1984. p. 67-70.

MEDEIROS, S.C.L.; RIBEIRO, S.R.; CONEGLIAN, C.M.R.; BARROS, R.M.; BRITO, N.N.; DRAGONI SOBRINHO, G.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Impactos da agroindústria canavieira sobre o meio ambiente. In: FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3., 2003, Rio Claro. **Anais...** Rio Claro: UNICAMP, 2003. 1 CD-ROM.

MEDINA, C.C.; NEVES, C.F.V.J.; FONSECA, I.C.B.; TORRETI, A.F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, n. 2, p. 179-184, jul./dez. 2002.

MELO, A.S.S.A.; SILVA, M.P. **Estimando o valor da “externalidade positiva” do uso da vinhaça na produção de cana-de-açúcar:** um estudo de caso. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/pdf/e4_m4_a2.pdf>. Acesso em: 01 set. 2010.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP, 2006. p. 21-42.

MUNNER, M.; OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 29, p. 411-423, 1989.

NEUFELD, J. Water conservation with subsurface drip irrigation. In: SYMPOSIUM IN COLLEGE OF SOUTHERN, 2001, Idaho. **Proceedings...**

NUNES, M.R.; LEAL, J.R.; VELLOSO, A.C.X. Efeito da vinhaça na lixiviação de nutrientes do solo. III. Potássio, cálcio e magnésio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 3, p. 371-374, 1982.

NUNES, M.R.; VELLOSO, A.C.X.; LEAL, J.R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 2, p. 171-176, 1981.

NUNES Jr., D.; PINTO, R.S.A.; TRENTA FILHO, E.; ELIAS, A.I. **Indicadores Agrícolas do setor sucroalcooleiro safra 2003/2004**. Ribeirão Preto: Grupo IDEA, 2004. 111 p.

OTTMAN, M.J.; POPE, N.V. Nitrogen fertilizer movement in the soils as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1883-1892, 2000.

PENATTI, C.P.; ARAÚJO, J. V.; FORTI, J. A.; RIBEIRO, R. Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v. 44, p. 32-38, 1988.

PEREIRA, T.J. **Estudo da utilização de vinhaça no preparo da cuba e na fermentação alcoólica**. 2009. 126 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2009.

PHENE, C.J. Nitrate management of wastewater with subsurface drip irrigation. **Southern Water and Soil**, Tampa, v. 12, n. 1, p. 52-58, 2005.

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.

PROCANA. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/>>. Acesso em: 03 abr. 2011.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.

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 Agrônomo de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

REDE INTERINSTITUCIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUCROALCOOLEIRO. **Aspectos ambientais da aplicação da vinhaça no solo**. São Paulo: UFSCAR, 1994. 67 p.

RENGASAMY, P. Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialysed redbrown earths. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, n. 3, p. 723-732, 1983

RENGASAMY, P.; OLSSON, K.A. Sodicity and soil structure. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 29, p. 935-952, 1991

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2002. 338 p.

RODRIGUES, L.O. **Processo de terceirização e a presença de arranjos institucionais distintos na colheita da cana-de-açúcar**. 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

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.

SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; SOUZA, K.J.; SOUSA, A.M.G.; VASCONCELOS, C.L.; ANDRADE, L.A.B. Efeito 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. 3, p. 1470-1476, 2007.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide; version 8.2. Cary, 2001. 943 p.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedade física 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, 2006.

SILVA, A.J.N. da; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G. de; LIMA, J.F.W.F. 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, 2006.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 2002. 136 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; COELHO, R.D. Salinização dos solos cultivados sob ambiente protegidos no Estado de São Paulo. In: FOLEGATTI, M.V. (Ed.). **Fertirrigação**: citrus, flores e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 267-277.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p.108-114, 2007.

SIGH, B.N.; LAL, K.N. Investigation on the effect of age on the assimilation of leaves. **Annals of Botany**, Oxford, v. 49, p. 291–307, 1935.

SINGH, S.; SRIVASTAVA, K.K. Effects of soil-water potential on germination of sugarcane sets. **Indian Journal of Agricultural Science**, New Delhi, v. 44, p. 184-187, 1973.

STEVENSON, F.J. Cycles of sil-carbon. nitrogen. phosphorus. sulfur. micronutrientes. In: TAN, K.H. (Ed.). **Principles of soil chemistry**. 2nd ed. New York: Marcell Dekker, 1986. p. 57- 68.

TASSO JÚNIOR, L.C.; MARQUES, M.O.; FRANCO, A.; NOGUEIRA, G.A.; NOBILE, F.O. de; CAMILOTTI, F.; SILVA, A.R. da. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 276-283, 2007.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; WEIER, K.L.; KEATING, B.A. Nitrate in groundwater of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 49-58, 2003.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.

UYEDA, C.A. **Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial**. 2009. 66 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892 898, 1980.

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).

VEIGA, C.F.M.; VIEIRA, J.R.; MORGADO, I.V. **Diagnóstico da cadeia produtiva da cana- de- açúcar do estado do Rio de janeiro**: relatório de pesquisa. Rio de Janeiro: FAERJ; SEBRAE/RJ, 2006. 107 p.

VELLOSO, A.C.X.; NUNES, M.R.; LEAL, J.R. Efeito da vinhaça na lixiviação de nutrientes do solo. I. nitrato e amônio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 1, p. 17-51, 1982.

VIEIRA, S.R.; CAMARGO, A.P.; ARRUDA, F.B.; CIONE, J.; BOVI, V.
Comportamento da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento e sulcos de infiltração.
Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 7, p. 335-340, 1983.

VILLALBÍ, I.; VIDALI, M. **Análisis de suelos e foliares**: interpretación y fertilización.
Madrid: Fundación Caja de Pensiones, 1988. 82 p.

VILLAS BÔAS, R.L.; ZANINI, J.R.; DUENHAS, L.H. Uso e manejo de fertilizantes em fertirrigação. In: ZANINI, J.R.; VILLAS BÔAS, R.L.; FEITOSA FILHO, J.C. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 1-25.

VOLL, C.E. **Aplicação de vinhaça e do extrato de palhiço de cana-de-açúcar no controle de plantas daninhas**. 2005. 127 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

YOUNGS, E.G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed.). **Soil analysis**: physical methods. New York: Marcel Dekker, 1991. chap. 4, p. 161-207.