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

**Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento
subsuperficial: dinâmica de íons e balanço de água**

Roque Emmanuel da Costa de Pinho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2013**

Roque Emmanuel da Costa de Pinho
Engenheiro Agrônomo

**Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento subsuperficial:
dinâmica de íons e balanço de água**

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: Física do
Ambiente Agrícola

Piracicaba
2013

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

Pinho, Roque Emmanuel da Costa de

Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento subsuperficial: dinâmica de íons e balanço de água / Roque Emmanuel da Costa de Pinho. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
96 p: il.

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

1. Vinhaça 2. Balanço de água 3. Cana 4. Fertirrigação I. Título

CDD 633.61
P652a

DEDICATÓRIA

A todos os meus familiares, especialmente aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram, e a todos os meus amigos que transformaram esse período em um tempo de diversão e, sobretudo, de amadurecimento.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional, mesmo com a distância física e as poucas visitas anuais;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de pós-graduação;

Ao CNPq, pela concessão da Bolsa de Estudos;

À FAPESP, através do Projeto nº: 10/00787-2, por possibilitar a realização desse trabalho;

A todos os professores da ESALQ com os quais tive contato desde o mestrado, pelo conhecimento transmitido. Em especial, aos professores que fizeram parte da minha rotina, Jarbas Honorio de Miranda, pela paciência e compromisso na orientação, Quirijn De Jong van Lier, pelos ensinamentos e por todos os momentos de diversão compartilhados, Paulo Leonel Libardi, pelos ensinamentos e pela companhia diária, e Sergio Oliveira Moraes, por todo o conhecimento físico, filosófico e poético compartilhado;

A todos os funcionários dos Departamentos de Física do Ambiente Agrícola e Engenharia de Biossistemas. Em especial, a Angela Márcia Derigi Silva, Luiz Fernando Novello, Gilmar Batista Grigolon, Paula Bonassa e Francisco Bernardo Dias, pela amizade e prestatividade ao longo de todo este tempo;

Aos colegas João Alberto Lelis Neto e Fábio Jordão Rocha, pela amizade e ajuda em campo;

Ao amigo Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela companhia, ajuda e prontidão em todos os momentos, e por toda a contribuição científica dada desde o início; e

A todos os amigos que aqui reconheci, professores e alunos, por compartilharem esse tempo de forma tão prazerosa. Em especial, aos colegas de sala (Angelica,

Valéria, Susan, Marcos, André e João Batista), de corredor/departamento (Pablo Javier, Alex, Jaedson, Mônica, Adriano, Fernando, Verena, Christiane, Dirceu, Marcelo, Luciano, Ismael, Luís Fernando, Marinaldo, Dinara), moradia (Lucas Vellame, Josenita Barreto, Luzimario, Alcione, Anderson, Carlos Augusto, Helon, Renan, Marival e Carlos Antônio).

EPÍGRAFE

“Somewhere, something incredible is waiting to be known”

Carl Sagan

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Cana-de-açúcar.....	21
2.2 Irrigação localizada	22
2.3 Aplicação de vinhaça	23
2.4 Dinâmica de íons no solo	25
2.5 Balanço de água no solo	27
2.6 Análise Multivariada	29
2.7 Material e Métodos.....	31
2.7.1 Descrição da área experimental.....	31
2.7.2 Tratamentos e delineamento experimental	33
2.7.3 Adubação e Fertirrigação	34
2.7.4 Aquisição e aplicação de vinhaça	35
2.7.5 Atributos químicos da solução do solo	36
2.7.6 Balanço de água no solo	36
2.7.7 Produtividade e Características tecnológicas da cana-de-açúcar	40
2.7.8 Análises estatísticas	41
2.8 Resultados e Discussão.....	42
2.8.1 Condições climáticas.....	42
2.8.2 Atributos químicos do solo	44
2.8.2.1 Análise multivariada	44
2.8.3 Atributos químicos da solução do solo	49
2.8.3.1 Análise exploratória	49
2.8.3.2 Análise multivariada	60
2.8.4 Balanço de água no solo	64
2.8.5 Produtividade	76
2.8.6 Características tecnológicas.....	76
3 CONCLUSÕES	81

REFERÊNCIAS	83
ANEXOS.....	91

RESUMO

Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento subsuperficial: dinâmica de íons e balanço de água

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com produção de 734 milhões de toneladas em 2011 (41% da produção mundial), sendo apontado como líder no setor de bioenergia. A aplicação de vinhaça, resíduo da fabricação do álcool, como fertilizante na cultura da cana-de-açúcar tem se tornado frequente, aumentando também a preocupação com seu potencial poluente. Estudos sobre o tema culminaram em uma instrução normativa (P4.231) da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), cuja dose recomendada baseia-se nas concentrações de K^+ no solo e na vinhaça. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a percolação da vinhaça no solo aplicada via gotejamento subsuperficial em um Nitossolo Vermelho Eutrófico, considerando-se a hipótese de que a dose recomendada depende também da dinâmica de água e íons no solo. Para tanto, foram aplicados seis tratamentos: T1 (Sem irrigação + adubação convencional); T2 (Fertirrigação + sem vinhaça); T3 (Fertirrigação + 1/2 dose CETESB); T4 (Fertirrigação + 1 dose CETESB); T5 (Fertirrigação + 2 doses CETESB) e T6 (Fertirrigação + 3 doses CETESB). As variáveis condutividade elétrica, pH e as concentrações dos íons K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , SO_4^- e NO_3^- , na solução do solo, foram analisadas por meio de análises multivariadas; enquanto variáveis de produção (colmos e ponteiros) e características tecnológicas (Brix, Pol, Açúcares Redutores, Pureza, Fibra, Açúcares redutores totais, Açúcar total recuperável e Cinzas) foram analisadas pela estatística convencional. Um balanço de água foi realizado na área experimental, considerando a camada de 0 a 0,8 m de solo. A partir dos resultados obtidos neste experimento, concluiu-se que a quantidade de vinhaça aplicada ao solo depende não somente dos teores de potássio no solo e na vinhaça, mas também da dinâmica da água e de íons na solução. Em função da aplicação, houve aumento para todas as variáveis analisadas da solução do solo, com exceção para o íon nitrato. Há risco de enriquecimento do lençol freático, se este estiver presente e ascender até próximo de 0,8 m da superfície do solo, independente das doses aplicadas. As variáveis de produção e tecnológicas, com exceção para teor de cinzas, não foram afetadas pelas aplicações.

Palavras-chave: Vinhaça; Balanço de água; Cana; Fertirrigação

ABSTRACT

Vinasse application on sugarcane by subsurface drip irrigation: ion dynamics and water balance

Brazil is the world's largest sugarcane producer, with 734 millions of tons in 2011 (41% of the world's production), being considered a leader in the bioenergy sector. The application of vinasse, a byproduct in the ethanol production process, as a fertilizer on sugarcane has become frequent, increasing thus the concern with its polluting potential. Studies on this subject have culminated in a normative instruction (P4.231) of the Environmental Protection Agency of São Paulo State (CETESB), of which the recommended dose is based on the K^+ concentrations in both soil and vinasse. This study aimed to verify vinasse percolation in soil applied via subsurface drip irrigation in a Nitossolo considering the hypothesis that the recommended dose depends also upon the water and ion dynamics in soil. For that, six treatments were applied: T1 (No irrigation + conventional fertilization); T2 (Fertigation + no vinasse); T3 (Fertigation + 1/2 CETESB dose); T4 (Fertigation + 1 CETESB dose); T5 (Fertigation + 2 CETESB doses) e T6 (Fertigation + 3 CETESB doses). Multivariate statistical analysis was used to evaluate electrical conductivity, pH, and the concentrations of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} and NO_3^- in the soil solution; while conventional statistical analysis was used for sugarcane production (stalk and tops) and technological characteristics (Brix, Pol, Reducing sugar, Purity, Fiber, Total reducing sugar, Total recoverable sugar and Ash percentage). A water balance was performed in the experimental area, considering the soil layer of 0-0.8 m. From the obtained results, it was concluded that the amount of vinasse applied on soil depends not only on the potassium contents in the vinasse and soil, but also on water and ion dynamics. As a result of the application, there was an increase for all the variables analyzed in the soil solution, except for nitrate. There is risk of groundwater enrichment, if it is present and ascends to close to 0.8 m from the soil surface, regardless of the applied doses. Technological and yield variables, except for ash content, were not affected by the applications.

Keywords: Vinasse; Water balance; Sugarcane; Fertigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Vista aérea da área experimental, localizada na Fazenda Areão, Piracicaba, SP.....	31
Figura 2	- Área experimental plantada com cana-de-açúcar, variedade CTC 12, sob vista panorâmica (a) e terrestre (b)	32
Figura 3	- Disposição de parcelas (P), tratamentos (T) e repetições (R) na área experimental.....	34
Figura 4	- Colheita manual das parcelas experimentais (a) e detalhe do carregamento da caminhonete para pesagem (b).....	40
Figura 5	- Pesagem das parcelas experimentais (a) e detalhe dos colmos de uma das parcelas (b).....	41
Figura 6	- Diagrama de ordenação dos atributos químicos do solo e dos tratamentos em profundidades. As letras i e f junto à variável se referem ao início e final do experimento, respectivamente.....	47
Figura 7	- Dissimilaridade entre os grupos estabelecida pela distância euclidiana a partir dos atributos químicos do solo: pH, matéria orgânica, potássio, alumínio, cobre, ferro, zinco e manganês. As letras i e f junto à variável se referem ao início e final do experimento, respectivamente.....	48
Figura 8	- Diagrama de ordenação dos atributos químicos da solução do solo e dos tratamentos em profundidades.....	62
Figura 9	- Dissimilaridade entre os grupos estabelecida pela distância euclidiana a partir dos atributos químicos da solução do solo: pH, CE, potássio, sódio, nitrato, enxofre-SO ₄ ²⁻ , cálcio e magnésio.....	63
Figura 10	- Valores médios de umidade na profundidade de 20 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹ , respectivamente)	65
Figura 11	- Valores médios de umidade na profundidade de 40 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹ , respectivamente)	65

- Figura 12 - Valores médios de umidade na profundidade de 60 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹, respectivamente) 66
- Figura 13 - Valores médios de umidade na profundidade de 80 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹, respectivamente) 66
- Figura 14 - Variação diária de armazenagem de água no solo, com os respectivos desvios-padrão da média, em 17 períodos de monitoramento do segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (T1 = Sem irrigação, adubação convencional; T2 = Fertirrigado, sem vinhaça; T3 = Fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹; T4 = Fertirrigado, 352 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 704 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹) 68
- Figura 15 - Densidade de fluxo diária, com os respectivos desvios-padrão da média, em 17 períodos de monitoramento do segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (T1 = Sem irrigação, adubação convencional; T2 = Fertirrigado, sem vinhaça; T3 = Fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹; T4 = Fertirrigado, 352 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 704 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹) 69
- Figura 16 - Análise de regressão entre as variáveis lâmina de água aplicada e densidade de fluxo para 8 períodos de monitoramento no segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (P1, P4, P6, P7, P10, P11, P14, P6 e Ptotal correspondem, respectivamente, aos períodos de 06/07 a 27/07/2011, 10/08 a 13/08/2011, 19/08 a 28/08/2011, 29/08 a 12/09/2011, 23/09 a 27/09/2011, 28/09 a 22/10/2011, 31/10 a 08/11/2011, 18/11 a 18/12/2011 e 06/07/2011 a 12/01/2012. 71
- Figura 17 - Análise de regressão para o teor de cinzas em cana-de-açúcar, em função de doses de vinhaça, em Piracicaba-SP 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características granulométricas e classe textural de quatro camadas do Nitossolo Vermelho Eutrófico da área experimental.....	32
Tabela 2 - Análise química inicial para quatro camadas do Nitossolo Vermelho Eutrófico da área experimental.....	33
Tabela 3 - Descrição dos tratamentos aplicados à cana-de-açúcar.....	33
Tabela 4 - Atributos químicos das oito aplicações vinhaça, e média final, ao longo do 2º ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP	35
Tabela 5 - Valores médios de coeficientes de cultivo (kc) para as fases fenológicas da cana-soca.....	37
Tabela 6 - Informações meteorológicas correspondentes ao período do experimento	43
Tabela 7 - Autovalores e percentagem da variância dos atributos químicos do solo explicada por cada componente.....	45
Tabela 8 - Correlação dos atributos químicos do solo com os componentes principais CP1 e CP2	46
Tabela 9 - Análise exploratória dos dados de pH na solução do solo	51
Tabela 10 - Análise exploratória dos dados de condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) na solução do solo	53
Tabela 11 - Análise exploratória dos dados de potássio (mg L^{-1}) na solução do solo	54
Tabela 12 - Análise exploratória dos dados de sódio (mg L^{-1}) na solução do solo....	56
Tabela 13 - Análise exploratória dos dados de nitrato (mg L^{-1}) na solução do solo ..	57
Tabela 14 - Análise exploratória dos dados de enxofre- SO_4^{2-} (mg L^{-1}) na solução do solo.....	58
Tabela 15 - Análise exploratória dos dados de cálcio (mg L^{-1}) na solução do solo ...	59
Tabela 16 - Análise exploratória dos dados de magnésio (mg L^{-1}) na solução do solo	60
Tabela 17 - Autovalores e percentagem da variância de atributos químicos da solução do solo explicada por cada componente.....	61
Tabela 18 - Correlação dos atributos químicos da solução do solo com os componentes principais CP1 e CP2.....	61

Tabela 19 - Componentes do balanço de água no solo em 17 períodos de monitoramento no segundo ciclo da cultura de cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP. (continua)	73
Tabela 20 - Produção de massa verde de ponteiros (PMVP) e de colmos (PC) por cana-de-açúcar em um Nitossolo Vermelho Eutrófico, em cultivo sem irrigação com adubação convencional e em função da fertirrigação com doses de vinhaça, em Piracicaba-SP	76
Tabela 21 - Qualidade tecnológica da cana, em cultivo sem irrigação com adubação convencional e em função da fertirrigação com doses de vinhaça, em Piracicaba-SP	78

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se como um país potencialmente capaz de assegurar parcela significativa da produção de alimentos para o mundo, tanto por possuir extensa área territorial agrícola, parte dela ainda não explorada, quanto por dominar tecnologias de ponta que garantem aumento da produção das culturas sem necessariamente expandir a fronteira agrícola.

A agricultura é um setor que historicamente tem se constituído em uma das bases sólidas da economia brasileira e, portanto, pela importância que representa, requer cuidados especiais no tocante ao manejo de todos os fatores de produção a ela atrelados. Neste contexto, a cultura da cana-de-açúcar, dentre inúmeras que são exploradas, tem despontado desde muito não apenas como fonte de alimento, mas também como componente da matriz energética nacional, o que tem atraído a atenção da pesquisa científica do setor agrícola para a busca da otimização de toda a cadeia produtiva relativa a esta cultura.

Neste aspecto, são inegáveis os avanços tecnológicos relativos ao desenvolvimento de maquinaria e implementos agrícolas, os quais têm agilizado muito sobre todas as etapas do processo produtivo, desde o preparo do solo até a colheita. Da mesma maneira, não se pode esquecer o quanto se avançou em termos de controle de pragas e doenças, domínio do processamento pós-colheita, minimização de custos de produção e, por fim, na logística, com o propósito de mostrar ao mundo o quanto o país é capaz de fornecer um produto agrícola de boa qualidade.

No entanto, mesmo com todos os avanços mencionados, ainda não está completamente compreendida a ocorrência de alguns processos importantes no solo e na planta ao longo de seu ciclo, por exemplo, a dinâmica da água, de íons, de gases, entre outros. É importante destacar que em um cultivo altamente demandante de insumos agrícolas, como é o caso da cana-de-açúcar, o conhecimento sobre a dinâmica desses processos é importante para que se tenha o controle e a garantia de que fontes utilizadas como fertilizantes para a cultura não se tornem também fontes de poluição para o ecossistema.

Uma das fontes utilizadas como fertilizante do solo na cultura da cana-de-açúcar é a vinhaça, que é um resíduo da destilação fracionada do caldo fermentado da própria cana-de-açúcar quando se obtém o álcool. Esse subproduto, até pouco

tempo atrás, constituía-se em um problema ao ambiente ao ser lançada em rios ou outros mananciais de água, por ser poluente. Entretanto, agora aplicado como fonte de potássio em cultivos de cana-de-açúcar, requer monitoramento permanente de seu comportamento para evitar a contaminação do solo e do lençol freático.

Desse modo, considerando a existência de alguns estudos sobre a vinhaça, que culminaram na publicação de uma instrução normativa da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) quanto à quantidade máxima de sua aplicação no solo, a P4.231 de dezembro de 2006, esta pesquisa teve o objetivo de testar a hipótese de que a quantidade máxima de vinhaça a ser aplicada ao solo não depende somente das concentrações de potássio no solo e no próprio resíduo, mas também da dinâmica da água e de íons no solo.

Para testar essa hipótese, buscou-se avaliar a percolação da vinhaça aplicada em doses via gotejamento subsuperficial em um Nitossolo Vermelho Eutrófico, cultivado com cana-de-açúcar (cana-soca) em Piracicaba-SP, cujo monitoramento se deu por meio de medidas de parâmetros químicos no solo e em sua solução.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com produção de 734 milhões de toneladas em 2011 (41% da produção mundial), seguido pela Índia e China com 342 e 115 milhões de toneladas, respectivamente (FAO, 2013). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2013 a produção de cana-de-açúcar deve ser de 738.376.461 toneladas, com um aumento de 9,4% em relação a 2012. Quanto ao rendimento médio, as projeções são de 75.213 kg ha⁻¹, 5% superior ao da safra do ano anterior (IBGE, 2013). Quanto à área cultivada, a estimativa é de que na safra 2012/2013 seja de 8.517.770 ha (ANUÁRIO BRASILEIRO DA CANA-DE-AÇÚCAR 2012, 2012).

No cenário atual, em que as discussões convergem para a busca de matrizes energéticas menos degradantes ao ambiente, o Brasil, por razões ambientais e tecnológicas, tem sido considerado na maioria dos estudos como o país que lidera o setor de bioenergia no mundo. Neste sentido, os esforços das pesquisas na busca de novas formas de energia alternativa têm sido orientados pelo aumento da demanda por biocombustíveis. Estes, dentre vários aspectos, apresentam benefícios para o setor agrícola por meio da implantação de projetos específicos para fins energéticos, objetivando promover o desenvolvimento regional sustentável, bem como a redução da emissão de gás carbônico que, além do benefício em si, se constitui em fonte de ganhos no mercado de carbono uma vez que a parcela de gases não emitida por um país pode ser comercializada na forma de créditos a outro participante interessado em não reduzir as suas emissões (MASIERO; LOPES, 2008).

Ao que tudo indica, segundo Libardi e Cardoso (2007), o álcool combustível assumirá grande importância na demanda mundial de combustíveis e, é provável, à semelhança da petroquímica, será a base para um novo complexo industrial, o álcool-químico, e o Brasil ocupará posição de destaque nesse cenário. Para Otto et al. (2010), os acordos internacionais para o uso de fontes renováveis de energia e diminuição das emissões de gases que provocam o efeito estufa tenderão a promover nos próximos anos um aumento significativo da área plantada com cana-de-açúcar no Brasil com vistas à produção de etanol.

2.2 Irrigação localizada

A irrigação consiste na aplicação de água ao solo em quantidade e momento definidos, de maneira a suprir a necessidade das culturas (LIBARDI; SAAD, 1994), uma vez que o déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semiáridas do mundo, pois, mesmo em regiões consideradas úmidas a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento das plantas (OMETTO, 1980). Dantas Neto et al. (2006), além de ressaltarem a importância da irrigação para manter sempre o solo com água disponível às culturas, afirmam que, desde que bem planejada, garante retorno econômico a quem faz uso dela em cultivo de cana-de-açúcar.

Usualmente, na maioria dos cultivos agrícolas, adota-se o sistema de irrigação por gotejamento em superfície, caracterizado por aplicar próximo ao colo da planta volumes de água conhecidos que podem variar durante o ciclo dependendo do estágio fenológico da cultura (MEDEIROS et al., 2005). Allen et al. (1998) ressaltam que o fato de a irrigação localizada molhar apenas uma fração da superfície do solo reduz consideravelmente as perdas de água por evaporação, principalmente nos primeiros estádios quando a cultura ainda não protege a superfície do solo contra a incidência direta da radiação solar.

Outro sistema em uso desde algum tempo é o de gotejamento em subsuperfície. Em uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial, Marques et al. (2006) informam que as primeiras experiências ocorreram em torno de 1960, em Israel, com alguns problemas relacionados ao entupimento dos gotejadores, especialmente pela penetração de raízes. Com o passar dos anos, a técnica foi aprimorada e tem-se com o seu uso, dentre outras vantagens, a redução da lâmina total de água requerida, maior eficiência de uso da água e dos fertilizantes, redução da evaporação, menor incidência de plantas daninhas, redução na drenagem interna abaixo da zona radicular e possibilidade da formação de um sistema radicular mais profundo. Uma das desvantagens é que o estabelecimento inicial da cultura é dificultado, uma vez que o sistema não possibilita condições ótimas de umidade do solo em sua camada mais próxima à superfície.

Gava et al. (2011) avaliaram a produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar em sistemas de sequeiro e irrigado por gotejamento, em Jaú-SP, e

concluíram que em sistema sob irrigação houve um incremento de 24% na produção de colmos e de 23% na produção de açúcar. Dalri et al. (2008), em Botucatu-SP, verificaram que a irrigação não alterou as características tecnológicas da cana-de-açúcar, e que em comparação a uma situação de sequeiro houve um aumento de 58,5% na produtividade de colmos e de 66,1% na produtividade de açúcar teórico recuperável.

O consumo de água pela cana-de-açúcar, aqui considerado como sendo a evapotranspiração, pode ser determinado por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos os que utilizam lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e método de entrada e saída de água em grandes áreas (GONÇALVES, 2010). Os métodos indiretos são aqueles que fazem a mensuração a partir do conhecimento de outras variáveis, as climatológicas, por exemplo (ALLEN et al., 1998). Para Toledo Filho (2001) a evapotranspiração é a variável mais importante a ser observada no planejamento e manejo dos recursos hídricos, como também para o monitoramento, desenvolvimento e planejamento de práticas de irrigação, com particular importância em regiões áridas e semiáridas que dependem dessa técnica para exploração das culturas agrícolas. Em regiões úmidas, a sua importância está relacionada ao fato da expansão da irrigação como prática complementar.

Alguns autores têm verificado que o consumo de água durante o ciclo da cana-de-açúcar é de 1105,77 mm em Ituiutaba-MG (ALVES et al., 2008); 1057,8 mm em Jaboticabal-SP (BRITO et al., 2009), 1067,1 mm em Pirassununga-SP (GHIBERTO, 2009) e 1074,1 mm em Paraipaba-CE (GONÇALVES, 2010).

2.3 Aplicação de vinhaça

A vinhaça é o principal resíduo gerado pelo setor sucroalcooleiro. É o líquido derivado da destilação do vinho, resultante da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou melaço (CETESB, 2006). É produzida em uma proporção de aproximadamente 13 litros para cada litro de álcool (BRITO; ROLIM, 2005).

Quando lançada ao solo, e atinge mananciais de água, causa sérios problemas ambientais, pois sua carga orgânica eleva a demanda bioquímica por oxigênio (DBO), causada principalmente pela proliferação de microrganismos, que esgotam o oxigênio dissolvido na água, destruindo a flora e a fauna aquáticas. Por

causa desses problemas há uma forte pressão para a reutilização dos resíduos gerados pelo setor, a fim de se ter uma cadeia produtiva limpa, sem prejuízo ao meio ambiente e às pessoas que vivem próximas às usinas (BARBOSA, 2010).

De acordo com Brito e Rolim (2005), a aplicação de vinhaça no solo teve sua disseminação após o surgimento do programa Pró-álcool (que objetivou a substituição dos derivados de petróleo por álcool), quando a produção de álcool se deu em larga escala e, por conseguinte, provocou o aparecimento de grandes quantidades do resíduo. Segundo Silva et al. (2007), a vinhaça aplicada ao solo promove a melhoria de fertilidade desde que quando utilizada para esta finalidade as quantidades não excedam à capacidade de retenção de íons pelo solo, isto é, as doses máximas devem ser calculadas segundo as características do solo, uma vez que cada solo apresenta quantidades não balanceadas de elementos minerais e orgânicos. Doses elevadas de vinhaça no solo podem provocar a lixiviação de íons, principalmente nitrato e potássio.

Um dos fatores que afetam a produtividade da cana-de-açúcar é a fertilização. No entanto, o uso de fertilizantes minerais onera sobremaneira os custos de produção, o que induz a se buscar fontes alternativas de suprimento menos onerosas (GÓMEZ; RODRIGUEZ, 2000). O fato de se resolver o problema ambiental da deposição da vinhaça, aliado a um menor custo em relação às outras fontes de fertilizantes, fez com que o uso da vinhaça tenha sido difundido tão largamente entre os produtores de cana-de-açúcar.

Para Wang et al. (2006), o uso da vinhaça como fertilizante para a cana-de-açúcar no Brasil tem uma história de séculos, e trouxe benefícios econômicos. Na China, um dos grandes produtores mundiais, poucos estudos têm sido feitos, o que indica que o Brasil também está à frente nesse aspecto da pesquisa científica, embora, segundo Silva et al. (2006), a literatura acerca dos efeitos da vinhaça no solo e em águas subterrâneas ainda seja bastante limitada e, por isso, os resultados encontrados são muito variáveis em função da grande diversidade de solos e composição das vinhaças. De qualquer modo, sabe-se que a ampla utilização da vinhaça em canaviais melhora o ambiente, reduz o custo de produção e, ainda, satisfaz as exigências da estratégia de desenvolvimento sustentável.

Segundo Gómez e Rodriguez (2000), a vinhaça contém níveis elevados de potássio, cálcio e matéria orgânica em sua composição química, bem como quantidades moderadas de nitrogênio e fósforo. Esses autores, estudando efeitos da

vinhaça sobre a produtividade de cana-de-açúcar, encontraram que a aplicação de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça pode substituir 55% do N, 72% do P_2O_5 e 100% do K_2O que tem de ser aplicado usando fertilizantes minerais.

Experimentos têm evidenciado que na maioria dos casos a aplicação de vinhaça melhora as qualidades do solo e, conseqüentemente, a produtividade da cana-de-açúcar. Comprovou-se a melhoria da fertilidade química do solo e do ambiente (ARAFAT; YASSEN, 2002; BRITO; ROLIM, 2005), o aumento da produtividade da cultura (GÓMEZ; RODRIGUES, 2000; WANG et al., 2006) e redução na taxa de infiltração da água no solo (DALRI et al., 2010). No aspecto físico do solo, em contraposição ao trabalho de Dalri et al. (2010), Camilotti et al. (2010) observaram que os atributos físicos do solo (grau de floculação e condutividade hidráulica) não foram alterados pela aplicação de vinhaça. Passarin et al. (2007) concluíram que doses de vinhaça não promoveram mudanças significativas nos diâmetros médios ponderado e geométrico e no índice de estabilidade de agregados de amostras das camadas de 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico de textura muito argilosa.

2.4 Dinâmica de íons no solo

A adubação da cana-de-açúcar varia de cana planta para cana-soca, uma vez que no plantio ocorre a associação de bactérias fixadoras de N_2 do ar por causa do açúcar contido no tolete. Portanto, na adubação de plantio, aplica-se uma pequena quantidade de nitrogênio e grandes quantidades de fósforo e potássio. Na condição de cana-soca, em que já não há mais a associação da bactéria com o sistema radicular da cultura, são requeridas altas doses de nitrogênio e, também, de potássio, porém menores quantidades de fósforo (VITTI et al., 2005).

Desse modo, o entendimento a respeito do comportamento dos íons no solo, principalmente os requeridos em maior quantidade pelas culturas, é fundamental para aumentar a eficiência agronômica dos fertilizantes, causando menores riscos de degradação do ambiente. Para ressaltar a importância sobre o conhecimento da dinâmica de íons, Nielsen e Biggar (1961) afirmam que ele não permite apenas a determinação de como os íons se deslocam no solo, mas, principalmente, possibilita a explicação física para os processos da lixiviação, da troca e da adsorção de íons à medida que se deslocam no solo.

Sabe-se que a mobilidade de um íon no solo depende, além de suas propriedades físicas e químicas, das propriedades inerentes à fração coloidal do solo (FERREIRA et al., 2006; RIVERA et al., 2008). Quanto ao nitrogênio, Cunha et al. (1987) ressaltam que a sua dinâmica em solos tratados com resíduos orgânicos, como é o caso da vinhaça, é complexa, principalmente por causa das transformações bioquímicas. Robinson et al. (2011), considerando a hipótese de que a cana prefere amônio a nitrato quando há elevada disponibilidade de nitrogênio no solo, e que essa não preferência ao nitrato contribui para o seu acúmulo no solo, concluíram que o fato de a cana acumular muito pouco deste íon na parte aérea faz com que solos fertilizados com nitrogênio nos primeiros três meses de crescimento da cultura sejam um ambiente vulnerável à sua perda.

Estudando fatores que afetam a lixiviação de potássio em diferentes solos, Alfaro et al. (2004) verificaram que as perdas eram dependentes dos teores do elemento disponível no solo e que a natureza química não era tão importante em controlar a dinâmica da mobilidade do potássio tanto quanto as propriedades hidráulicas. Já o fósforo, segundo Grant et al. (2001), é relativamente imóvel no solo e por isso permanece próximo ao local em que foi colocado o fertilizante. Sabe-se que os fosfatos procedentes do fertilizante reagem com o Ca^{2+} e o Mg^{2+} nos solos com pH elevado para formar compostos de baixa solubilidade, menos disponíveis para a planta que os adubos fosfatados, e tornam-se cada vez menos disponíveis com o tempo.

Ao estudarem o comportamento do nitrogênio e do potássio em solo fertirrigado com vinhaça, Cunha et al. (1987) concluíram que desde que o teor de íons lixiviados além de 1,2 m de profundidade seja baixo, o risco de contaminação do lençol freático com nitrato e potássio devido à aplicação de vinhaça é pequeno. É importante sempre ressaltar que a dinâmica de íons é dependente, em parte, da dinâmica da água no solo. Para corroborar essa assertiva vale recorrer aos trabalhos de Ghiberto et al. (2009, 2011). Em um experimento com cana-de-açúcar em Jaboticabal-SP, Ghiberto et al. (2009) encontraram perdas consideráveis de nitrogênio por lixiviação, mesmo havendo grande demanda do nutriente pela cultura, fato que associaram à ocorrência de chuvas atípicas que elevaram a umidade do solo para além da capacidade de campo. Quanto ao fósforo, as perdas foram muito baixas. Já em relação a potássio, cálcio e magnésio as perdas foram significativas, constituindo-se um fator a ser observado no manejo químico do solo para assegurar

o pleno desenvolvimento da cana-de-açúcar sem poluir os mananciais de água. Em outro experimento, também com cana-de-açúcar, em Pirassununga-SP, Ghiberto et al. (2011) não registraram perdas consideráveis de nitrogênio por lixiviação devido ao fato de o excedente de água no período de monitoramento ter sido menor que o esperado e pela elevada extração do nutriente pela cana-de-açúcar.

2.5 Balanço de água no solo

De acordo com Timm et al. (2002), existem vários métodos para estimar a demanda de água dos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas agrícolas, cada um deles com características específicas com relação aos parâmetros utilizados para a sua estimativa. Entre estes, o balanço hídrico das culturas realizado diretamente no campo permite o acompanhamento das relações hídricas durante o ciclo da cultura, sendo, portanto, muito importante para uma gestão racional dos recursos solo e água, e para a maximização da produtividade.

O balanço de água em um determinado volume de solo corresponde à diferença entre a quantidade de água que entra neste volume e a quantidade de água que sai dele, durante um determinado intervalo de tempo. Quando essas quantidades forem expressas em lâmina de água, o resultado do balanço corresponde à variação da armazenagem de água no volume, ocorrida no intervalo de tempo considerado (MOTA, 2010). Em caso de solo cultivado, o volume de controle é normalmente delimitado por duas superfícies: uma superior, coincidente com a superfície do solo, e uma inferior, de igual área e paralela à superior, coincidente com a profundidade do cultivo, igual à profundidade efetiva de raízes (HILLEL, 2004).

A água que entra pela superfície superior do volume de controle de solo, a partir da atmosfera, é oriunda principalmente da precipitação pluvial e/ou da irrigação, e a que sai do volume para a atmosfera, na forma de vapor, incluindo a que sai através da planta, é denominada de evapotranspiração. Dependendo do tipo de solo e do relevo do terreno, uma quantidade de água pode também sair do volume e/ou nele entrar lateralmente, por sobre a superfície do solo (deflúvio superficial) e por debaixo dela (deflúvio subsuperficial). A quantidade de água que sai através da superfície inferior do volume de controle e a que por ela nele entra é denominada de drenagem interna e ascensão capilar, respectivamente. Pode-se,

desse modo, escrever uma equação para o balanço em que a variação da armazenagem de água no volume de controle, em dado intervalo de tempo, é igual à soma algébrica das entradas (valores positivos) e saídas (valores negativos) de água que ocorrem no volume durante o intervalo, isto é, as entradas e as saídas de água constituem um membro da equação e a variação da armazenagem o outro membro (MOTA, 2010).

Os componentes do balanço de água que podem ser medidos com mais facilidade são as chuvas e irrigações. Em relação à armazenagem de água, pode-se dizer que é determinada pela integração dos perfis de umidade do solo. Já os fluxos de drenagem interna e ascensão capilar de água no solo são os componentes de maior complexidade nos procedimentos de cálculo de balanços hídricos. Para sua estimativa, um procedimento comum é o uso da equação de Darcy-Buckingham, que envolve a condutividade hidráulica do solo em função de conteúdo de água em volume, $K(\theta)$. Quanto à medida direta do deflúvio no campo, é trabalhosa e, portanto, em muitas situações, pode ser considerada como incógnita na equação do balanço de massas, desde que os demais componentes sejam conhecidos (vale salientar que pode ser desconsiderado, desde que a área apresente relevo plano). Por último, a evapotranspiração pode ser deixada como incógnita da equação quando todos os demais componentes forem conhecidos. Há também a possibilidade de ser estimada por algum método baseado em variáveis climatológicas e, então, entrar como um componente conhecido da equação quando se quer determinar um outro de maior complexidade (TIMM et al., 2002).

O balanço hídrico no solo, que recebe este nome por ser determinado a partir de medidas no solo, difere do chamado balanço hídrico climatológico sequencial porque este fornece uma estimativa, a partir de dados climatológicos, do que pode ocorrer em uma determinada área com relação à situação hídrica (REICHARDT, 1990). Em estudo comparativo do balanço hídrico obtido a partir de dados climatológicos com o balanço de água no solo, em que foram medidos a evapotranspiração, armazenagem de água no solo, capacidade de água disponível, deflúvio superficial e drenagem interna, por um período de dois anos para a cultura do café, Bruno et al. (2007) chegaram à conclusão de que o balanço hídrico climatológico sequencial pode substituir razoavelmente o balanço de água no solo, porém com subestimativa das variáveis mencionadas anteriormente.

De acordo com Brito et al. (2009), para a cultura da cana-de-açúcar ainda são poucos os estudos que buscam mensurar os processos envolvidos na equação do balanço de água no solo, principalmente quando a aplicação de algum fertilizante está envolvida. Nesse caso particular, quando se quer avaliar o potencial poluente de um fertilizante, por exemplo, uma das maneiras de fazer a quantificação é por meio da drenagem interna. Um trabalho recente que trata da lixiviação de vários nutrientes em um cultivo de cana-de-açúcar utilizando o balanço de água para estimar as perdas, no município de Jaboticabal-SP, é o de Ghiberto et al. (2009).

Tanto o balanço de água medido em campo quanto o obtido a partir de variáveis climáticas são importantes no contexto agrícola de uma região. Valnir Júnior et al. (2001) já haviam mencionado sobre a importância do balanço de água no solo, ao citar que a partir dele é possível obter informações sobre a lixiviação de elementos químicos no solo e poluição de águas subterrâneas. Para Gouvêa (2008), as informações oriundas do balanço hídrico climatológico sequencial são importantes para as tomadas de decisões, ao tempo em que permitem saber o que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica no solo, deficiência e excedentes hídricos em períodos específicos e, assim, identificar a variabilidade das variáveis que compõem o balanço.

2.6 Análise Multivariada

Os métodos estatísticos mais elementares são geralmente univariados, uma vez que abordam apenas a análise de variância em somente uma variável aleatória. No caso da análise multivariada, todas as variáveis relacionadas são consideradas ao mesmo tempo e, inicialmente, com a mesma importância (MANLY, 2008).

As informações extraídas com a aplicação de técnicas multivariadas tornam-se, segundo Valentin (2000), muito mais precisas quanto melhor o procedimento utilizado para o tratamento estatístico dos dados. Segundo o mesmo autor, os modelos estatísticos mais elementares são menos sensíveis em sistemas biológicos por não levarem em conta as particularidades próprias de cada situação, e por não considerarem o efeito conjunto de inúmeros fatores que interferem sobre o que está sendo avaliado. Já a análise multivariada identifica e descreve padrões estruturais, espaciais e temporais nas comunidades biológicas, possibilitando a formulação de hipóteses baseadas nos vários fatores bióticos e abióticos que interferem sobre as

características objeto de estudo. Em suma, a vantagem da análise multivariada é que ela apresenta uma abordagem holística das variáveis em questão.

Embora a análise multivariada de dados tenha surgido no início do século XX, somente recentemente é que tem sido possível utilizá-la em larga escala, graças aos recursos computacionais que fornecem em pouco tempo uma gama de resultados que permitem o entendimento das inter-relações entre as variáveis (VICINI, 2005; MANLY, 2008).

No campo das ciências agrárias, particularmente na vertente da exploração do ambiente para fins agrícolas, já se dispõe de informações na literatura indicando a aplicação de técnicas de estatística multivariada (análise de agrupamento hierárquico e análise fatorial/análise de componentes principais) para identificar grupos similares e fatores que são determinantes dentro do sistema de produção agrícola (VALLADARES et al., 2008; RUHOFF et al., 2009; ANDRADE et al., 2011; TEN CATEN et al., 2011; QUEIROZ et al., 2011; PAYE, 2012).

A análise de componentes principais, uma técnica matemática de análise multivariada, permite investigar um grande número de dados, ao tempo em que possibilita identificar as medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados sem perdas consideráveis das informações. Neste tipo de análise transforma-se um conjunto original de variáveis em outro conjunto – o de componentes principais (CP) de dimensões equivalentes. Essa transformação se dá com a menor perda possível de informação; de igual modo, nessa transformação se busca eliminar algumas variáveis originais que possuam pouca informação (VICINI, 2005). Esta análise tem sido utilizada em diversos estudos nas distintas subáreas das ciências agrárias (VENDRAME et al., 2007; CENCIANI et al., 2009; BELLINASSO et al., 2010; SILVA et al., 2010). Já a análise de agrupamentos, ainda de acordo com Vicini (2005), um método numérico multivariado, é aplicada com o objetivo de reconhecer grupos que apresentam homogeneidade de seus caracteres.

2.7 Material e Métodos

2.7.1 Descrição da área experimental

O trabalho, através do Projeto FAPESP nº: 10/00787-2, foi realizado na Fazenda Areão, na área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Piracicaba, SP (22,67° S, 47,64° W) (Figura 1).

Figura 1 - Vista aérea da área experimental, localizada na Fazenda Areão, Piracicaba, SP

A área experimental, de 112 m x 18,5 m, constou de 24 parcelas, cada uma com 8,0 m x 8,5 m (68 m²) e foi cultivada com cana-de-açúcar, variedade CTC 12, adquirida do Centro de Tecnologia Canaveieira, localizado em Piracicaba/SP (Figura 2). A cana foi implantada em 23 de abril de 2010. Entretanto, para esta pesquisa foi considerada a cultura em seu segundo ano, na condição de cana-soca, de Fevereiro de 2011 até Abril de 2012. No plantio, foi adotado o sistema combinado ou “abacaxi”, com um espaçamento de 0,5 m entre fileiras simples e 1,5 m entre fileiras duplas. A coleta de dados foi realizada nas 3 linhas centrais da parcela, em área útil de 36 m² (6,0 m x 6,0 m). Vale ressaltar que o manejo aplicado à cultura foi o

mesmo adotado nos cultivos de exploração comercial da região produtora de cana-de-açúcar no entorno de Piracicaba-SP.

Figura 2 - Área experimental plantada com cana-de-açúcar, variedade CTC 12, sob vista panorâmica (a) e terrestre (b)

O solo é classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA (2006), e as características granulométricas e classe textural de cada camada se encontram na Tabela 1. Por se tratar da continuação de um experimento, com o segundo ciclo da cana, as condições físicas e químicas iniciais são as mesmas constantes em Lelis Neto (2012) e Rocha (2012), conforme Tabela 2.

Tabela 1 - Características granulométricas e classe textural de quatro camadas do Nitossolo Vermelho Eutrófico da área experimental

Camada	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
m	----- g kg⁻¹ -----			
0,00-0,20	289	264	447	Argila
0,20-0,40	206	235	559	Argila
0,40-0,60	209	137	654	Muito Argilosa
0,60-0,80	216	125	659	Muito Argilosa

Tabela 2 - Análise química inicial para quatro camadas do Nitossolo Vermelho Eutrófico da área experimental

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

Camada	Micronutrientes (mg dm ⁻³).....						
m	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
0,00-0,20	16	0	2	15	92	3	
0,20-0,40	28	0	2	11	53	1	
0,40-0,60	79	0	1	6	9	0	
0,60-0,80	80	0	1	4	5	0	

2.7.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos aplicados foram níveis de vinhaça (Tabela 3), tomando-se como referência a dose, calculada por meio da Equação 1, proposta na instrução normativa da CETESB (CETESB, 2006).

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos aplicados à cana-de-açúcar

Tratamento	Descrição
T1	Sem irrigação + adubação convencional
T2	Fertirrigação sem vinhaça
T3	Fertirrigação + ½ dose CETESB
T4	Fertirrigação + 1 dose CETESB
T5	Fertirrigação + 2 doses CETESB
T6	Fertirrigação + 3 doses CETESB

$$m^3 \text{ vinhaça ha}^{-1} = \frac{[(0,05 \times CTC - Ks) \times 3744 \times 185]}{Kvi} \quad (1)$$

em que,

CTC - Capacidade de Troca Catiônica, expressa em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a pH 7,0, dada pela análise de fertilidade do solo realizada em laboratório de análise de solo, utilizando metodologia de Análise de Solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC);

Ks - concentração de potássio no solo, expressa em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, à profundidade de 0,80 m, dada pela análise de fertilidade do solo realizada em laboratório de análise de solo, utilizando metodologia de Análise de Solo do IAC;

3744 - constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em $[\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}]$ ou $[\text{meq } 100 \text{ cm}^{-3}]$, para kg de potássio por volume de solo, o qual corresponde a uma área de 1 ha multiplicada por 0,80 m de profundidade;

185 - 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.

O experimento foi instalado considerando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 6 tratamentos e 4 repetições, com parcelas dispostas conforme a Figura 3.

P2	P4	P6	P8	P10	P12	P14	P16	P18	P20	P22	P24
T3R1	T6R1	T1R2	T3R3	T5R1	T1R3	T6R2	T2R2	T2R3	T4R3	T6R3	T6R4
P1	P3	P5	P7	P9	P11	P13	P15	P17	P19	P21	P23
T1R1	T3R2	T2R1	T4R1	T4R2	T5R2	T3R4	T5R3	T1R4	T5R4	T4R4	T2R4

Figura 3 - Disposição de parcelas (P), tratamentos (T) e repetições (R) na área experimental

2.7.3 Adubação e Fertirrigação

As adubações foram realizadas com base na recomendação de Raij et al. (1996), de acordo com a fertilidade do solo e a produtividade esperada. Para a parcela não irrigada, a adubação foi realizada no plantio (primeiro ciclo) e após a rebrota (segundo ciclo); para as demais situações a adubação (via fertirrigação) foi dividida em 10 aplicações ao longo do ciclo seguindo a marcha de absorção de nutrientes da cultura.

Para os tratamentos em que foi necessária a aplicação de água por irrigação, esta foi feita de maneira localizada, via gotejamento subsuperficial, com os gotejadores instalados a 0,35 m de profundidade. O manejo da irrigação se deu com base na média do potencial mátrico da água no solo, obtida por tensiômetros instalados em distintas profundidades, associada ao conteúdo de água a partir da curva característica da água no solo.

Os tensiômetros foram instalados às profundidades de 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 m. As leituras dos tensiômetros foram feitas sempre pela manhã, para se diminuir a influência da temperatura sobre a medida do potencial mátrico da água no solo (BRITO et al., 2009). Os gotejadores, do tipo Hydrolite, espaçados de 0,45 m, tinham vazão nominal de 1 L h⁻¹ e operaram a uma pressão de serviço de 100 kPa.

2.7.4 Aquisição e aplicação de vinhaça

A vinhaça utilizada no experimento foi proveniente da usina Capuava e era transportada quinzenalmente até a área experimental, sendo armazenada em tanques até o momento de sua aplicação. Ao total, foram realizadas 8 aplicações de vinhaça ao longo do segundo ciclo da cana-de-açúcar, as quais tiveram início em Julho/2011 e foram até Novembro/2011.

Amostras de vinhaça de cada carregamento foram retiradas e analisadas em laboratório; seus atributos químicos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Atributos químicos das oito aplicações vinhaça, e média final, ao longo do 2º ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP

pH	CE	Potássio	Sódio	Nitrato	Enxofre	Cálcio	Magnésio
	S m ⁻¹	-----mg L ⁻¹ -----					
4,72	1,163	3980	2,9	161,4	908,5	1150	650
4,73	0,935	2965	-	115,4	794,7	100	225
4,77	1,161	4335	2,5	304,2	438,1	600	325
4,81	1,094	3990	155	108,9	832,3	550	300
4,65	0,912	2810	51,6	46,8	934,4	500	250
4,33	0,711	2420	40	0,0	1856,4	525	250
4,61	0,338	565	35	87,5	1008,5	50	25
4,68	0,817	2585	90	67,4	573,8	275	200
4,66	0,891	2956	53,9	111,4	918,3	468,7	278,1

2.7.5 Atributos químicos da solução do solo

Os atributos químicos da solução do solo (pH, CE, potássio, nitrato, sulfato, cálcio, magnésio e cloreto) foram monitorados quinzenalmente, ao longo do ciclo da cana, por meio do uso de extratores de solução a diferentes profundidades.

Os extratores de solução foram instalados, com a utilização de um trado, em todas as parcelas experimentais nas profundidades de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m, espaçados em 0,1 m, a uma distância de 0,1 m do gotejador. Os extratores são constituídos por um tubo de PVC rígido de ½” de diâmetro e outro transparente de 12 mm, com uma de suas extremidades (superior) hermeticamente fechada por uma borracha de vedação de silicone, e a outra extremidade (inferior) com uma cápsula porosa.

Para a extração da solução do solo, aplicou-se um vácuo de aproximadamente 80 kPa na câmara interna do extrator, 24 horas após a aplicação dos tratamentos, por meio de uma bomba de vácuo. As soluções do solo coletadas foram retiradas das câmaras dos extratores 24 horas após a aplicação do vácuo, tempo necessário para que se atingisse o equilíbrio entre o solo e a cápsula do extrator de solução. As soluções foram removidas com a utilização de uma seringa e depositadas em recipiente plástico, sendo devidamente identificadas e analisadas em laboratório quanto ao pH, condutividade elétrica, potássio, cálcio e sódio (espectrometria de emissão de chama), nitrato e enxofre (colorimetria com uso do espectrofotômetro UV).

2.7.6 Balanço de água no solo

O balanço de água foi feito com o objetivo de estimar os fluxos de água (drenagem ou ascensão capilar) ao longo do ciclo da cultura. Assumindo que o relevo da área experimental é plano, o balanço de água no solo, definido como a diferença entre a quantidade de água que entra no volume de controle de solo e a quantidade de água que sai dele em um determinado intervalo de tempo (LIBARDI, 2012), foi considerado conforme a equação

$$P + I + AC) - (D + ETc) = \Delta h_z, \quad (2)$$

sendo P a precipitação pluvial (mm), I a irrigação (mm), AC a ascensão capilar (mm), D a drenagem interna (mm), ET_c a evapotranspiração da cultura (mm) e Δh_z o balanço ou a variação da armazenagem de água no solo (mm) na camada de solo z . O volume de controle de solo considerado terá como limite superior a superfície do solo e como limite inferior a profundidade de 0,8 m, camada que compreende praticamente todo o sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar.

Com relação ao monitoramento dos processos no tempo, serão estabelecidos quatro períodos, correspondentes às fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar, associados ao grau de cobertura do solo pela planta, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores médios de coeficientes de cultivo (k_c) para as fases fenológicas da cana-soca

		Período	Duração	Kc
Fase Fenológica	Referência	Dias		
Inicial	Até 10% da cobertura do solo	0-30	30	0.40
Desenvolvimento	De 10% até 100% de solo coberto	31-80	50	0,82
Intermediária	De 100% de solo coberto à maturação	81-260	180	1.25
Final	Da maturação à colheita	261-320	60	0.75
Ciclo total	Do corte à colheita	0-320	320	0.80

Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998)

2.2.6.1 Precipitação pluvial (P)

As precipitações pluviais foram medidas com pluviômetro, a 1,5 m do solo, em nível, e livre de obstáculos, instalado na Estação Meteorológica, próxima à área experimental, considerando

$$P = \int_{t_i}^{t_f} p dt, \quad (3)$$

em que p é a precipitação pluvial, em mm dia⁻¹, integrada para cada período considerado.

2.2.6.2 Irrigação (I)

As lâminas de água aplicadas foram integradas para cada período do balanço de água, pela equação

$$I = \int_{t_i}^{t_f} i dt, \quad (4)$$

sendo i a irrigação em mm dia⁻¹.

2.2.6.3 Variação de armazenagem (Δh_z)

A armazenagem de água no solo foi determinada diariamente por meio da equação

$$h_z \int_0^{0,8} = \theta \cdot \Delta z \cdot 1000, \quad (5)$$

sendo h_z a armazenagem de água na camada de 0-0,8 m, em mm; θ o conteúdo médio de água na camada de 0-0,8 m (m³ m⁻³); Δz a distância entre os tensiômetros (0,2 m); 1000 a constante para converter de m para mm. O conteúdo de água θ foi obtido a partir das leituras dos tensiômetros às profundidades de 0,2, 0,4 0,6 e 0,8 m e suas respectivas curvas características de água no solo. A partir das armazenagens, foi calculada a variação diária de armazenagem (Δh_z) pela equação

$$\Delta h_{0-0,8m} = h_{final} - h_{inicial}, \quad (6)$$

em que $\Delta h_{0-0,8m}$ é a variação de armazenagem na camada de 0 a 0,8 m, h_{final} é a armazenagem na camada de 0 a 0,8 m no último dia do período e $h_{inicial}$ é a armazenagem na camada de 0 a 0,8 m no início do período.

2.2.6.4 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração da cultura foi obtida a partir da estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves (ALLEN et al., 1998), segundo a equação

$$ETp = 0,0023 \cdot Q_0 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} (17,8 + T_{med}) \quad (7)$$

em que: ETp é a evapotranspiração potencial, em mm dia⁻¹; Q_0 é a radiação solar extraterrestre, mm dia⁻¹; T_{max} , T_{min} e T_{med} são as temperaturas máxima, mínima e média, respectivamente, em °C. Essas informações foram obtidas na estação climatológica localizada próxima da área experimental.

A partir da ETp calculada diariamente pelo método de Hargreaves, e conhecendo o coeficiente de cultivo (kc) da cultura da cana-de-açúcar para os seus estádios fenológicos, foi possível estimar a evapotranspiração da cultura (ETc) pela equação

$$ETc = ETp \cdot kc \quad (8)$$

Desse modo, a evapotranspiração da cultura (ETc) foi integrada para os vários períodos, a partir a equação

$$ETc = \int_{t_i}^{t_f} ETc \, dt \quad (9)$$

sendo ETc a evapotranspiração da cultura, em mm dia⁻¹.

2.2.6.5 Drenagem interna (D) e Ascensão capilar (AC)

A drenagem interna e a ascensão capilar (D e AC), aqui tratadas como densidade de fluxo, foram consideradas como incógnitas da equação do balanço de água. Portanto, conhecidos os demais componentes, a drenagem interna ou ascensão capilar foi obtida pela equação

$$D ou AC = \Delta_z - P - I + ETc . \quad (10)$$

Nesta expressão, valores positivos à esquerda indicam ascensão capilar; valores negativos indicam drenagem interna.

2.7.7 Produtividade e Características tecnológicas da cana-de-açúcar

A colheita da cana-de-açúcar foi feita manualmente, durante duas semanas entre 26 de Março e 13 de Abril de 22012 (Figura 4). Para avaliação de produtividade e análises tecnológicas, somente as três linhas centrais de cada parcela foram utilizadas, descartando-se as linhas de bordadura.

Figura 4 - Colheita manual das parcelas experimentais (a) e detalhe do carregamento da caminhonete para pesagem (b)

A produtividade da cana-de-açúcar foi estimada pela pesagem de colmos e ponteiros separadamente, para cada parcela do experimento (Figura 5a), representando os tratamentos e suas repetições, extrapoladas posteriormente para toneladas por hectare. A pesagem foi realizada sobre uma balança VESTA de quatro apoios com capacidade para 16000 quilogramas, 4000 kg em cada um, assentados sobre uma área plana de cimento no galpão da Fazenda Areão, utilizando-se uma caminhonete pequena para o transporte. A massa da caminhonete, tomada como tara para as pesagens, era registrada novamente ao final de cada quatro pesagens de parcelas.

Aleatoriamente, 10 colmos de cada parcela foram retirados no momento da pesagem total (Figura 5b), para que fossem levados ao laboratório do Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição – LAN, onde foram realizadas as análises

tecnológicas da cana-de-açúcar. As amostras foram avaliadas quanto ao Teor de sacarose aparente, Açúcares redutores, Pureza, avaliados para o caldo e o colmo da cana, e Fibra, Açúcares redutores totais, Açúcar total recuperável e Cinzas, avaliados somente para o caldo.

Figura 5 - Paisagem das parcelas experimentais (a) e detalhe dos colmos de uma das parcelas (b)

2.7.8 Análises estatísticas

O experimento foi instalado considerando o delineamento inteiramente aleatorizado, com 6 tratamentos e 4 repetições. Entretanto, devido às diferentes características dos parâmetros avaliados, duas técnicas estatísticas foram empregadas.

- *Produtividade e Características Tecnológicas*

Os dados foram analisados de acordo com a estatística clássica, com o uso do programa ASSISTAT (SILVA, 2013). Como o experimento continha duas testemunhas, uma para a situação convencional de cultivo, e outra para a situação fertirrigada, no primeiro instante a análise de variância foi feita por meio do teste F, com a comparação entre as médias dos demais tratamentos em relação à situação convencional de cultivo pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. Em um segundo cenário, considerando apenas os tratamentos fertirrigados (5 tratamentos e 4 repetições), uma nova análise de variância foi feita, também utilizando o teste F, com as médias sendo comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Neste último cenário, somente se identificada diferença estatística entre os tratamentos, procedeu-se a análise de variância para a regressão entre níveis de vinhaça e variável analisada.

- *Atributos químicos do solo e da solução do solo*

Para os parâmetros químicos destes dois itens, foram empregadas técnicas estatísticas multivariadas de análise de componentes principais (ACP), em função do grande número de variáveis e da relação de interdependência entre uma e outra. Com isso, tornou-se possível o entendimento de como essas variáveis interagiram conjuntamente. Para este procedimento de análise utilizou-se o software XLSTAT, *Trial Version* (XLSTAT, 2013).

Os valores originais desses atributos químicos, para as camadas de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0-0,3 m, foram padronizados ($\mu = 0$; $\sigma^2 = 1$) para se dar o mesmo peso a cada variável, a fim de compor as variáveis utilizadas na ACP. Com a ACP para esses atributos, foram gerados os componentes principais.

Para a matriz de correlação dos atributos com os componentes considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade para, então, selecionar os atributos tidos como significativos que apresentam alta correlação com o componente principal em que se encontram. Foram selecionados os atributos que apresentaram correlação de no mínimo 0,6 em módulo, em pelo menos um dos componentes principais. Após esse procedimento foram excluídos os atributos que apresentaram baixa correlação, e feita uma nova ACP, gerando então novos componentes. Foram selecionados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), que melhor explicaram a variância dos dados originais. Para a análise de agrupamento das variáveis utilizou-se o método de Ward, com a medida euclidiana para a distância entre os casos nos grupos.

2.8 Resultados e Discussão

2.8.1 Condições climáticas

Ao longo do experimento (Fevereiro de 2011 a Abril de 2012), a temperatura média foi de 21,9 °C, com máxima de 25,7 °C em Fevereiro/2012 e mínima de 15,9

°C em Junho/2011. A precipitação total mensal foi o fator de maior variação ao longo do ciclo da cana, com valores entre 2,1 mm, em Setembro/2011, e 241,2 mm, em Março/2011 (Tabela 6).

Tabela 6 - Informações meteorológicas correspondentes ao período do experimento

Meses Ano	Vel. do Vento Média m s^{-1}	Radiação	Temperatura Média °C	Precipitação Total mm	UR Média %
		Global Média $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$			
Fev/2011	1,2	22,8	24,9	89,6	75,1
Mar/2011	1,4	15,9	23,3	241,2	78,5
Abr/2011	1,2	17,1	22,4	5,2	75,6
Mai/2011	1,3	15,6	18,3	27,2	73,2
Jun/2011	1,4	14,4	15,9	56,3	73,5
Jul/2011	1,5	14,6	18,7	3,9	66,6
Ago/2011	1,7	15,5	19,2	36,1	67,0
Set/2011	1,8	21,7	20,9	2,1	56,4
Out/2011	1,9	15,5	22,6	217,7	64,2
Nov/2011	1,8	23,0	22,6	171,7	62,3
Dez/2011	1,8	24,4	23,9	162,0	65,8
Jan/2012	1,1	24,3	23,5	23,4	67,4
Fev/2012	0,7	24,7	25,7	139,2	81,7
Mar/2012	1,4	21,7	23,9	36,4	66,7
Abr/2012	1,4	18,8	23,3	93,5	68,9

O ano de 2011 foi marcado por um período seco no mês de Setembro, o qual não é comum, sendo normalmente o mês de Julho o mais seco para a localidade, como citado por Timm et al. (2002). O somatório da precipitação pluviométrica em todo o ciclo foi de 1305,5 mm, caracterizado por oscilação nos eventos de chuva e má distribuição ao longo dos meses. O mês de setembro de 2011, que apresentou o valor mínimo de precipitação, também apresentou alto valor médio de Radiação Global ($21,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), o menor valor médio de Umidade Relativa, associado a um alto valor médio de Velocidade de Vento. Essa condição potencializa a evapotranspiração, devido à maior capacidade de conter vapor de água da massa de ar atmosférica, sua maior quantidade de energia, e à constante alteração da camada limite, ao redor das folhas, causada pelos ventos. O valor médio de velocidade do vento ao longo do experimento foi de $1,4 \text{ m s}^{-1}$, com mínimo de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ em Fevereiro/2012 e máximo de $1,9 \text{ m s}^{-1}$ em Outubro/2011.

2.8.2 Atributos químicos do solo

2.8.2.1 Análise multivariada

Nos dados obtidos em campo, a análise de componentes principais e de agrupamentos hierárquicos foi eficiente para distinguir as interações dos atributos químicos do solo com os tratamentos nas camadas de solo estudadas, indicando que essa ferramenta pode ser utilizada para selecionar variáveis relevantes na caracterização do comportamento do solo em resposta à aplicação de tratamentos.

Para os dados em discussão foram considerados os atributos pH, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, enxofre-SO₄²⁻, cobre, ferro, zinco, manganês e boro. No entanto, na análise multivariada, a matriz de correlação das variáveis com os fatores indicou para a exclusão de fósforo, cálcio, magnésio, enxofre-SO₄²⁻ e boro, por explicarem muito pouco da variância dos dados.

Na Tabela 7 são apresentados os componentes principais que explicaram o conjunto das variações nos atributos considerados no solo no início e final do experimento. É importante ressaltar que, na análise de componentes principais, devem ser selecionados apenas os fatores que apresentem autovalor maior que a unidade, uma vez que, por este critério, são os que devem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70% (VICINI, 2005). Por este critério, foram considerados os componentes 1 (autovalor 12,55 e que melhor reteve a variabilidade dos dados originais) e 2 (autovalor 1,11 e que melhor reteve a variabilidade dos dados excluindo a variabilidade expressa pelo primeiro componente), que juntos manifestaram 85,36% da variação das medidas originais (78,43% e 6,93% pelos fatores 1 e 2, respectivamente).

Tabela 7 - Autovalores e percentagem da variância dos atributos químicos do solo explicada por cada componente

Componente	Autovalor	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	12,55	78,43	12,55	78,43
2	1,11	6,93	13,66	85,36
3	0,66	4,10	14,31	89,46
4	0,63	3,92	14,94	93,38
5	0,37	2,31	15,31	95,69
6	0,27	1,72	15,58	97,40
7	0,12	0,76	15,71	98,17
8	0,11	0,66	15,81	98,83
9	0,07	0,43	15,88	99,26
10	0,05	0,32	15,93	99,58
11	0,03	0,16	15,96	99,73
12	0,02	0,13	15,98	99,86
13	0,01	0,08	15,99	99,94
14	0,01	0,04	16,00	99,99
15	0,00	0,01	16,00	100,00
16	0,00	0,00	16,00	100,00

A correlação das variáveis analisadas no solo com os componentes principais está apresentada na Tabela 8. Constatou-se que as variáveis que mais contribuíram para o componente principal 1, em ambas as condições de solo (início e final do experimento), foram pH, matéria orgânica, potássio, alumínio, cobre, ferro, zinco e manganês; apenas potássio no início do experimento esteve também associado ao componente principal 2.

Tabela 8 - Correlação dos atributos químicos do solo com os componentes principais CP1 e CP2

Variável	CP1	CP2
pH _i	0,97	-0,02
pH _f	0,85	0,21
Matéria orgânica _i	-0,98	0,10
Matéria orgânica _f	-0,86	-0,28
Potássio _i	-0,63	0,68
Potássio _f	-0,65	0,13
Alumínio _i	-0,90	0,25
Alumínio _f	-0,65	0,27
Cobre _i	-0,98	0,01
Cobre _f	-0,94	-0,25
Ferro _i	-0,99	0,10
Ferro _f	-0,91	-0,28
Zinco _i	-0,95	0,19
Zinco _f	-0,88	-0,33
Manganês _i	-0,96	0,12
Manganês _f	-0,95	-0,24

OBS.: Os subscritos i e f se referem ao início e final do experimento, respectivamente.

Na Figura 9 está apresentada a ordenação dos atributos químicos do solo e dos tratamentos nas profundidades avaliadas. Como definido, foram considerados apenas os dois componentes que mais explicaram a variação dos dados analisados, o que gera uma ordenação em duas dimensões. De acordo com Alvarenga e Davide (1999), neste caso, os demais componentes podem ser desconsiderados, uma vez que a bidimensionalidade proporciona uma clara ordenação das variáveis em questão, com a construção de um gráfico biplot, e não vale a pena inserir a tridimensionalidade a partir de um valor que agregue tão pouco na explicação da variação dos dados originais.

Pelo círculo unitário, quanto mais próximo do perímetro estiver a variável, ou seja, partindo do centro, quanto maior o comprimento da linha que a representa, maior é a importância desta na explicação da variância. De igual modo, o ângulo de inclinação da linha em relação a cada eixo do círculo indica quão estreitamente esta variável é correlacionada com esse eixo. Outra utilidade do círculo unitário é que com a sobreposição deste sobre o plano dos fatores é possível visualizar a relação entre os atributos químicos e os tratamentos nas várias profundidades (VICINI, 2005).

Interpretando a Figura 6, depreende-se que potássio para o solo no início do experimento foi a variável que teve menor peso na explicação da variância das medidas associadas ao componente principal 1. O fato de os vários tratamentos

estarem localizados em um mesmo quadrante indica a formação de estratos homogêneos, ou seja, no caso em análise, em geral, indistintamente do tratamento aplicado, há a clareza de que as camadas mais próximas à superfície do solo (medições feitas em 20 e 40 cm) formam grupos que se diferenciam dos formados para as camadas mais profundas (medições feitas em 60 e 80 cm). Nos quadrantes II e III, as profundidades de 20 e 40 cm, indiferente do tratamento aplicado, foram discriminadas pela forte influência das variáveis matéria orgânica, alumínio, potássio e micronutrientes (zinco, manganês, ferro e cobre). As profundidades de 60 e 80 cm se apresentam posicionadas mais à direita do diagrama, e mais aproximadas do eixo horizontal, nos quadrantes I e IV, fato que indica que o comportamento dos tratamentos nestas profundidades foi fortemente influenciado pelas variáveis pH_i e pH_f , justamente as que se correlacionaram com o eixo horizontal, o componente principal 1. Vale destacar que em qualquer interpretação da Figura 6, quanto mais próximo ao centro estiver o tratamento-profundidade menor é a correlação que este guarda com os atributos químicos de maior importância.

Figura 6 - Diagrama de ordenação dos atributos químicos do solo e dos tratamentos em profundidades. As letras i e f junto à variável se referem ao início e final do experimento, respectivamente

A dissimilaridade entre os grupos formados a partir dos atributos avaliados no solo está apresentada na Figura 7. Por ela se buscou identificar se os atributos químicos diferiram no solo quando comparadas as situações de início e final do experimento. Pelos resultados, foram estabelecidos cinco grupos, cada um com suas particularidades, cujas características de um mesmo grupo são semelhantes, porém diferentes do comportamento de outros agrupamentos (VALLADARES et al., 2008). Vale salientar que a literatura que trata da análise de agrupamento deixa clara a possibilidade, a critério de quem vai interpretar o dendrograma, do estabelecimento de outros grupos, conforme se queira aumentar ou diminuir a homogeneidade entre eles.

Figura 7 - Dissimilaridade entre os grupos estabelecida pela distância euclidiana a partir dos atributos químicos do solo: pH, matéria orgânica, potássio, alumínio, cobre, ferro, zinco e manganês. As letras i e f junto à variável se referem ao início e final do experimento, respectivamente

Constatou-se que os tratamentos aplicados ao solo levaram à formação de grupos diferenciados, mostrando haver, no tempo, efeito dos tratamentos sobre a maioria dos atributos analisados. Quanto ao pH, o fato de estarem compondo o mesmo grupo indicou que os valores não diferiram no tempo e que, assim, não foram influenciados pelos tratamentos aplicados. As variáveis matéria orgânica, cobre, ferro, manganês, zinco e alumínio apresentaram características distintas entre

o início e final do experimento, tanto que formaram grupos heterogêneos entre si, corroborando a tese de que há relação de causa e efeito entre os tratamentos e as variáveis em análise. As variáveis potássio, em ambas as situações analisadas, e alumínio, ao final do experimento, apresentaram comportamento completamente diferenciado, o que as levou, cada uma delas, ao isolamento das demais variáveis.

2.8.3 Atributos químicos da solução do solo

2.8.3.1 Análise exploratória

Nas Tabelas 9 a 16 estão apresentadas as análises exploratórias dos dados relativos à solução do solo para as variáveis pH, condutividade elétrica, potássio, sódio, nitrato, enxofre-SO₄²⁻, cálcio e magnésio. Nelas figuram todos os dados obtidos por tratamento, oriundos da solução do solo extraída após cada uma das oito aplicações ao longo do ciclo da cana-soca.

É importante destacar que o número de extratos coletados não atingiu o máximo esperado em nenhuma das situações (considerando as oito aplicações de vinhaça e quatro repetições por tratamento, deveriam ter sido obtidos 32 extratos e, por conseguinte, 32 dados por variável para serem submetidos à análise exploratória). Apesar do esforço para a extração de solução do solo após as aplicações de vinhaça, ficou evidente que em alguns casos, notadamente no tratamento sem irrigação em todas as profundidades de coleta, o número de dados foi de apenas aproximadamente 25% do esperado. Observe-se que está se fazendo referência ao número de extrações de solução do solo; além disso, em muitas vezes, apesar de se conseguir extrair solução do solo, a quantidade era pouca e, conseqüentemente, impossibilitava a leitura de todos os atributos pré-estabelecidos.

Justifique-se também, à parte, o menor número de dados observados para a profundidade de 20 cm. Como o sistema de irrigação foi instalado em subsuperfície, a 35 cm de profundidade, naturalmente a extração foi mais dificultada pela escassez de solução no solo acima daquele ponto, visto que o aplicado via fertirrigação sofria a influência do campo gravitacional e, assim, drenava com facilidade para as camadas mais profundas. Em tese, a possibilidade de coleta de solução a 20 cm de

profundidade ficou dependente das entradas de água na superfície do solo por precipitação pluvial ou, em subsuperfície, por ascensão capilar e run-off lateral.

As dificuldades na extração de solução do solo são amplamente abordadas na literatura que trata do assunto. Vale ressaltar que o sucesso na extração de solução do solo depende de fatores como o local de instalação da cápsula porosa, do vácuo aplicado no interior do extrator, momento de aplicação do vácuo após a entrada de água no solo e do contato da cápsula com o solo. De acordo com Blanco (2006), o vácuo aplicado deve ser próximo ao do limite de funcionamento do tensiômetro, aproximadamente 70 a 80 kPa, pois, como o vácuo vai reduzindo no tempo, quanto mais próximo desse limite maior a probabilidade de coletar solução do solo em um volume razoável para a realização de todas as análises químicas que se desejar. O autor sugere que o vácuo seja aplicado entre 6 e 12 horas após o término de uma irrigação, por exemplo. Entretanto, Lima (2009), em uma revisão de literatura, constatou que ainda não há uma padronização quanto ao vácuo a ser aplicado e o tempo decorrido entre este e a coleta da solução do solo, fatores que concorrem conjuntamente para dificultar o uso dos extratores como coletores de solução do solo e, conseqüentemente, como instrumentos que auxiliem no manejo da fertirrigação.

Aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade para testar a hipótese de normalidade, verificou-se que em todas as variáveis analisadas, considerando o efeito dos tratamentos na solução do solo nas profundidades amostradas, nem todos os dados seguiram distribuição normal. Portanto, apenas para as situações em que foi constatada distribuição normal se pode assumir que os desvios são aleatórios e, assim, considerar a média como um bom estimador da tendência central dos valores observados.

Analogamente, vale considerar a abordagem feita por Mota (2010) quando discutiu a análise exploratória de dados de armazenagem de água no solo em um cultivo de meloeiro irrigado, em quatro fases fenológicas, com solo coberto e desnudo. Para os dados aqui discutidos, nas situações em que eles apresentaram distribuição normal, o valor médio resultante pode até não indicar o que aconteceu quanto ao parâmetro analisado em um determinado momento de amostragem da solução do solo, visto que o parâmetro pode ter variado no tempo decorrido entre as oito aplicações dos tratamentos e em que se deu o monitoramento dos efeitos destes na constituição da solução do solo. No entanto, ao integrar os valores deste

parâmetro no tempo, a média resultante expressa um comportamento que é devido única e exclusivamente ao efeito de tratamento e, portanto, pode ser comparada com a média de outro tratamento no experimento.

Quanto ao pH (Tabela 9), considerando apenas as situações em que os dados seguiram distribuição normal, verificou-se que a variabilidade dos dados é baixa e que em todos os tratamentos e profundidades os valores não se distanciam da média geral 6,7, indicando não haver efeito de tratamentos para esta variável na solução do solo.

Tabela 9 - Análise exploratória dos dados de pH na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	6,4	7,1	6,6	0,20	3,0	Não
	40	9	6,3	7,3	6,6	0,30	4,5	Não
	60	7	6,4	7,8	6,8	0,49	7,2	Sim
	80	8	6,6	7,4	6,8	0,30	4,4	Sim
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	6,1	7,1	6,6	0,35	5,3	Sim
	40	20	5,8	7,5	6,6	0,42	6,4	Sim
	60	17	6,3	7,5	6,6	0,32	4,8	Não
	80	16	6,3	7,2	6,7	0,27	4,0	Sim
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	6,2	7,4	6,7	0,42	6,2	Sim
	40	12	5,7	7,0	6,6	0,37	5,6	Sim
	60	16	6,2	7,5	6,6	0,35	5,2	Sim
	80	18	6,2	7,2	6,7	0,31	4,6	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	6,1	7,5	6,6	0,54	8,2	Não
	40	12	6,3	7,0	6,6	0,27	4,1	Sim
	60	20	5,6	8,8	6,8	0,59	8,7	Não
	80	23	6,0	7,3	6,8	0,26	3,7	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	6,3	7,7	6,7	0,48	7,1	Sim
	40	16	6,3	7,3	6,7	0,33	4,9	Sim
	60	10	6,3	7,2	6,7	0,33	4,9	Sim
	80	16	6,6	8,0	7,0	0,35	5,0	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	6,3	7,3	6,7	0,36	5,3	Sim
	40	11	6,2	7,3	6,8	0,35	5,2	Sim
	60	20	6,5	7,5	6,9	0,29	4,2	Sim
	80	25	6,1	7,5	6,8	0,28	5,2	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

A Tabela 10 contém os dados de condutividade elétrica para todos os tratamentos e profundidades. Os valores, que estão associados à salinidade, isto é, à presença de solutos inorgânicos na fase aquosa do solo como sódio, potássio, magnésio, cálcio, cloretos, carbonatos, nitrato, sulfatos e outros, apresentaram elevada variabilidade e não seguiram distribuição normal em quase 50% das situações analisadas. Sendo esta discussão válida para as tabelas com dados

relativos aos íons avaliados na solução do solo, a elevada variabilidade espacial e temporal destes em solução é natural, uma vez que é dependente da umidade do solo durante o processo de extração; como se sabe, é o teor de água no solo que define a diluição ou concentração dos íons na solução aquosa.

Com relação ao fato, Petillo e Castel (2007) destacam que quando se aplica água ou solução no solo por gotejamento, cria-se um problema adicional que é a tridimensionalidade da parte molhada. Neste caso, a variabilidade espacial da umidade do solo é normalmente maior sob sistema de irrigação por gotejamento, pela não uniformidade de distribuição da água tanto em superfície quanto em profundidade. Neste experimento a irrigação deve ter contribuído para o aumento da variabilidade dos dados referentes à variação da umidade do solo, uma vez que as lâminas aplicadas ao solo não devem ter chegado na mesma quantidade em todos os pontos de emissão. Considere-se também que, além da variabilidade de parâmetros hidráulicos do solo, da não uniformidade da irrigação e das diferenças nas perdas de água por evaporação em diferentes pontos, tem-se a planta como uma importante fonte de variação, pelo fato de a extração de água pelas raízes também não ser uniforme.

Uma fonte de variação temporal para os dados observados foram as precipitações pluviais registradas em dias próximos ou durante algumas das oito aplicações das doses de vinhaça. Para uma melhor compreensão da influência dos eventos de precipitação pluvial sobre a composição do coletado nos extratores de solução do solo, vale ressaltar que: o vácuo foi aplicado nos extratores 24 horas após a aplicação da vinhaça, com um tempo de oportunidade para o processo de extração de 24 horas após o procedimento de vácuo. Ou seja, a coleta da solução só ocorria 48 horas após a aplicação dos tratamentos e, portanto, a composição do coletado também estava sujeita à influência das precipitações pluviais que pudessem ocorrer durante aquele processo.

Na interpretação dos dados é importante levar em conta que as aplicações, no total de oito, se deram em 29/07, 10/08, 30/08, 10/09, 29/09, 15/10, 30/10 e 27/11 de 2011, e que os registros da estação meteorológica da área experimental para a precipitação pluvial indicaram ocorrência do evento em 30/07 (3,1 mm), em 31/08 (15,0 mm), em 14/10 (101,6 mm), em 15/10 (13,2 mm), em 16/10 (3,9 mm), em 29/10 (11,5 mm), em 26/11 (28,1 mm) e 27/11 (0,3 mm). Neste cenário, e especificamente para a análise sobre a contribuição destes eventos sobre o teor de

água no solo e, por conseguinte, sobre a composição da solução do solo, pode-se desconsiderar as precipitações pluviais menos expressivas (ressalte-se que independentemente da lâmina, os eventos registrados são importantes, por exemplo, na contabilidade para o balanço de água no volume de solo analisado). Entretanto, sob a perspectiva da contribuição deles para a solução do solo, podem ser contabilizados como mais importantes apenas os eventos para a terceira, sexta e oitava aplicação, cujo precipitado foi, respectivamente, de 15,0 mm, 118,7 mm e 28,4 mm. Nestes eventos, os menores volumes precipitados contribuíram apenas para modificar a composição da solução mais próxima à superfície do solo.

Considerando as situações em que a média pode ser tomada como representativa da amostra, ou seja, nos casos em que se detectou distribuição normal, constatou-se o aumento da condutividade elétrica na solução do solo na medida em que se aumentou a dose de vinhaça aplicada ao solo, indicando riscos de enriquecimento do lençol freático por sais se as condições para a drenagem forem favorecidas.

Tabela 10 - Análise exploratória dos dados de condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	88,0	213,9	138,7	50,8	36,6	Sim
	40	9	84,6	401,4	183,8	105,0	57,1	Sim
	60	7	119,7	191,6	138,9	24,9	17,9	Não
	80	8	93,7	406,6	161,8	101,1	62,5	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	46,6	558,2	171,3	151,8	88,6	Não
	40	20	64,9	1439,0	267,6	322,2	120,4	Não
	60	17	80,3	421,3	146,6	92,4	63,0	Não
	80	16	70,8	666,1	209,8	170,6	81,3	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	11	81,4	835,7	304,5	254,7	83,6	Não
	40	12	136,3	932,6	432,6	291,1	67,3	Sim
	60	16	107,6	1106,0	330,2	316,7	95,9	Não
	80	18	116,5	653,8	298,9	139,6	46,7	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	134,0	822,7	301,2	292,4	97,1	Não
	40	12	139,2	771,4	544,1	206,1	37,9	Não
	60	20	198,3	828,5	582,2	175,8	30,2	Sim
	80	23	318,9	2050,0	895,3	373,5	41,7	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	149,6	588,9	308,5	192,4	62,4	Sim
	40	15	274,6	1415,0	816,5	363,4	44,5	Sim
	60	10	312,3	1048,0	686,9	215,2	31,3	Sim
	80	16	325,3	3280,0	1473,5	808,0	54,8	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	167,8	1980,0	449,9	564,8	64,9	Sim
	40	11	405,6	3120,0	1390,7	907,1	65,2	Sim
	60	20	395,8	2000,0	1211,5	430,7	35,5	Sim
	80	25	358,2	3530,0	1526,8	744,6	48,8	Não

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

Com relação aos teores de potássio (Tabela 11), ficou evidente que o comportamento para a variável, principalmente nos casos em que não há aplicação ou se aplica vinhaça ao solo em uma dose inferior à dose recomendada pela CETESB, não pode ser avaliado pela média aritmética dos dados, por não seguirem distribuição normal.

Tabela 11 - Análise exploratória dos dados de potássio (mg L^{-1}) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	1,2	11,3	3,2	3,6	111,9	Não
	40	9	0,0	34,9	7,5	13,4	179,0	Não
	60	8	0,0	18,5	3,6	6,1	169,6	Não
	80	8	0,0	21,0	3,7	7,1	191,5	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	0,6	78,5	10,0	18,6	187,0	Não
	40	19	0,5	210	19,9	47,9	240,5	Não
	60	18	0,0	28,9	3,7	3,7	178,8	Não
	80	17	0,0	51,6	9,2	16,5	178,5	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	0,5	220,0	43,9	64,4	146,5	Não
	40	12	0,7	102,9	35,5	38,2	107,4	Não
	60	16	0,7	235,0	46,6	76,5	164,2	Não
	80	19	1,0	39,5	8,5	10,0	119,0	Não
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	1,5	63,1	19,5	24,7	126,6	Não
	40	12	1,2	76,0	37,7	27,2	72,1	Sim
	60	20	5,9	84,3	38,2	23,7	62,1	Sim
	80	24	0,8	253,0	90,1	65,2	72,4	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	2,9	51,9	21,9	17,1	78,2	Sim
	40	17	32,4	240,0	110,3	66,1	59,9	Sim
	60	10	17,1	98,3	56,9	34,0	59,8	Sim
	80	16	1,1	660,0	205,1	217,9	106,2	Não
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	14,1	300,0	138,9	104,0	74,9	Sim
	40	12	17,6	670,0	206,5	222,0	107,5	Sim
	60	20	20,6	370,0	168,2	95,8	56,9	Não
	80	25	17,8	615,0	192,5	145,3	75,5	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

Ficou clara a relação de que os teores de potássio na solução do solo aumentaram com o aumento das doses de vinhaça aplicada. Este fato indica que os sítios de troca dos colóides do solo são preenchidos por cátions até um determinado nível e que, a partir dele, a tendência é de que quanto mais sejam aplicados mais disponíveis ficam na solução do solo. Com relação ao potássio, por ser requerido em grandes quantidades pelas culturas, sua concentração na solução aquosa não deve ser excessivamente alta, pois, como dito, os colóides fazem sua adsorção e o liberam lentamente para a solução para, então, ser absorvido pelas plantas por processo de difusão.

Quando não se tem informação sobre a concentração de um íon mais adequada para uma cultura pode-se recorrer a valores de referência. Neste sentido, Blanco (2006) informa que a concentração de potássio variando de 20 a 60 mg L⁻¹ na solução do solo é referência para a maioria das culturas conhecidas. Desse modo, considerando que as condições do solo são favoráveis à drenagem, e buscando, sobretudo, minimizar os riscos de contaminação de mananciais de água subterrâneos, deve-se evitar as doses mais elevadas de vinhaça, pois, pelos dados observados, levaram a alta concentração de potássio na solução aquosa do solo.

Vale destacar que o enriquecimento dos mananciais de água em potássio, por si só, não é um problema ambiental, visto que o elemento químico não é poluente de águas. Ocorre que a alta concentração de potássio em solução favorece a formação de pares iônicos, que, com cargas neutralizadas, são facilmente deslocados via lixiviação. Como exemplo, o par iônico potássio (K⁺) e nitrato (NO₃⁻) é especialmente preocupante, porque o nitrato, de fato, é poluente de águas.

Os teores de sódio estão apresentados na Tabela 12. Verificou-se que a concentração do elemento na solução do solo aumentou com as doses crescentes de vinhaça. Embora não se tenha verificado efeito negativo do sódio ao solo e à cultura, é importante que o monitoramento seja constante quanto ao íon, visto que é um dos constituintes da vinhaça e, portanto, a aplicação de doses crescentes de vinhaça significam aumentos do íon no solo e em solução. Além de ser tóxico às plantas, o sódio é também um bom dispersor de coloides, daí os riscos da degradação física do solo, com efeitos refletidos no aumento da densidade, na resistência à penetração de raízes e na redução da condutividade hidráulica.

Tabela 12 - Análise exploratória dos dados de sódio (mg L^{-1}) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	0,0	11,3	2,6	3,9	149,2	Não
	40	9	0,4	9,4	2,6	2,8	107,2	Sim
	60	8	0,6	5,5	2,2	1,7	76,6	Sim
	80	8	0,4	3,0	1,4	0,9	59,4	Sim
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	0,0	10,5	2,2	2,4	109,7	Não
	40	19	0,0	10,3	3,6	3,7	103,1	Não
	60	18	0,0	8,0	1,9	1,9	97,1	Não
	80	17	0,0	8,5	2,3	2,4	105,5	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	11	1,2	9,1	3,5	2,3	66,4	Não
	40	12	2,4	10,2	5,7	2,9	50,4	Sim
	60	16	0,0	6,0	2,5	1,8	72,7	Sim
	80	19	0,0	10,5	4,0	2,8	71,0	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	1,2	7,6	2,8	2,7	94,6	Não
	40	12	1,2	10,0	6,0	3,1	51,8	Sim
	60	20	0,0	100,0	10,0	21,3	213,8	Não
	80	23	3,7	12,0	7,9	2,3	28,7	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	1,3	4,6	2,3	1,2	51,4	Sim
	40	17	2,6	14,4	8,2	3,3	40,5	Sim
	60	10	0,0	9,1	6,3	2,7	42,6	Sim
	80	16	5,6	20,2	11,2	4,5	39,7	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	1,1	12,4	7,0	3,6	51,9	Sim
	40	12	2,4	21,0	10,2	5,5	54,5	Sim
	60	20	3,9	16,9	9,7	3,5	35,6	Sim
	80	25	1,3	24,3	10,2	5,3	51,6	Não

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

A Tabela 13 contém os dados para nitrato na solução do solo. Dentre as variáveis analisadas foi a que apresentou maior variabilidade, fato comprovado pelos altos coeficientes de variação, o que, decerto, contribuiu para o não estabelecimento de relação de causa e efeito entre as doses de vinhaça e a concentração de nitrato na solução do solo. Cunha et al. (1987) ressaltam que a dinâmica do nitrato em solos tratados com resíduos orgânicos, vinhaça por exemplo, é muito complexa, portanto com probabilidade de elevada variabilidade, especialmente por causa das transformações bioquímicas que ocorrem no solo.

O nitrato, por ser um ânion, apresenta-se em quase sua totalidade dissolvido em solução, daí porque é necessária alta concentração para o suprimento às plantas, com valor de referência para culturas variando de 220 a 230 mg L^{-1} na solução do solo (BLANCO, 2006). Quanto à possibilidade da contaminação de mananciais pelo par iônico K^+ e NO_3^- , Cunha et al. (1987) observaram que houve pequeno risco devido à irrigação com vinhaça, visto que a lixiviação de íons abaixo da profundidade de observação, que era de 1,20 m, foi pequena.

Tabela 13 - Análise exploratória dos dados de nitrato (mg L^{-1}) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	0,6	5,0	2,6	1,7	66,8	Sim
	40	9	0,0	74,4	10,1	24,4	242,3	Não
	60	8	0,0	8,7	2,8	3,4	121,7	Não
	80	8	0,0	3,8	0,9	1,3	146,7	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	1,3	28,0	10,0	8,8	87,7	Não
	40	20	0,0	463,1	41,8	104,3	249,7	Não
	60	18	0,0	45,8	11,6	13,0	112,0	Sim
	80	17	0,5	83,6	20,0	24,9	124,2	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	0,0	27,9	6,9	9,9	143,9	Não
	40	13	0,5	10,4	3,3	3,3	98,4	Não
	60	16	0,0	11,2	1,8	2,7	149,9	Não
	80	19	0,0	43,2	6,0	11,1	184,3	Não
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	0,0	16,9	7,8	6,2	80,4	Sim
	40	12	0,6	3,9	1,8	1,1	59,0	Não
	60	21	0,0	15,2	5,6	4,7	84,0	Sim
	80	24	0,5	54,0	5,2	10,9	210,4	Não
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	0,6	10,5	3,9	3,6	92,2	Sim
	40	17	0,0	11,2	3,3	3,6	106,9	Não
	60	10	0,6	31,5	4,8	9,4	196,0	Não
	80	16	0,0	104,1	11,2	25,5	227,0	Não
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	0,5	22,7	12,9	9,7	75,4	Não
	40	12	0,0	23,6	4,5	6,7	148,9	Não
	60	20	0,0	50,7	12,3	15,4	124,8	Não
	80	25	0,0	87,6	30,9	27,1	87,6	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

Destaque-se que, à medida que as doses de vinhaça são aumentadas, a drenagem deve ser desfavorecida, isto para evitar que os níveis de nitrato nos mananciais de água não excedam 10 mg L^{-1} de solução, visto que em resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, número 20, de 18 de junho de 1986 (BRASIL, 1986), e Portaria do Ministério da Saúde, número 1469, de 29 de dezembro de 2000 (BRASIL, 2001), ficou estabelecido ser este o nível máximo de N-NO_3^- em águas para o consumo humano.

Os teores de enxofre- SO_4^{2-} na solução do solo estão apresentados na Tabela 14. Os dados evidenciam aumento de enxofre- SO_4^{2-} com as doses de vinhaça aplicada ao solo, evidenciando, já na menor dose aplicada ($176 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), elevado potencial de lixiviação. Vale notar neste caso a preocupação com o fato de um ânion nunca lixiviar sozinho, ou seja, sempre ser perdido acompanhado por um cátion. Dias et al. (1994) constataram que o movimento dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} estiveram associados ao de sulfatos, provando que quando o enxofre lixiviava o

acompanhavam, para somar-se à perda, cálcio e magnésio, elementos importantes na nutrição vegetal.

Tabela 14 - Análise exploratória dos dados de enxofre-SO₄²⁻ (mg L⁻¹) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	0,9	7,6	3,9	2,4	61,7	Sim
	40	9	1,5	31,8	8,5	11,3	133,1	Não
	60	8	1,6	38,5	8,7	12,2	141,5	Não
	80	8	1,6	31,8	7,4	10,1	136,8	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	1,3	28,0	10,0	8,8	87,7	Não
	40	20	0,0	97,8	13,4	23,1	171,8	Não
	60	18	1,3	46,9	8,2	10,7	130,8	Não
	80	8	2,9	21,8	6,2	6,4	103,8	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	2,5	51,5	16,3	16,2	99,5	Sim
	40	13	0,0	71,4	20,8	21,0	100,9	Sim
	60	16	2,9	76,3	19,4	25,2	129,9	Não
	80	19	5,0	30,2	12,9	6,0	46,6	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	2,5	25,5	12,8	11,4	89,6	Sim
	40	12	6,0	50,7	23,9	14,2	59,7	Sim
	60	21	13,2	49,6	30,7	11,6	37,8	Sim
	80	24	0,0	123,0	47,0	28,8	61,2	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	2,5	38,5	9,5	13,0	137,5	Não
	40	17	20,6	114,5	50,1	27,1	54,1	Sim
	60	10	25,1	56,7	39,2	11,9	30,4	Sim
	80	16	0,0	194,7	77,9	55,2	70,9	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	3,2	92,9	40,3	29,2	72,5	Sim
	40	12	12,7	176,3	66,7	54,7	82,0	Sim
	60	20	0,0	113,3	59,9	26,6	44,4	Sim
	80	25	21,3	216,5	85,6	51,6	60,3	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

Os teores de cálcio na solução do solo também aumentaram com as doses crescentes de vinhaça que foram aplicadas ao solo (Tabela 15). Como o elemento é um dos constituintes da vinhaça, na medida em que esta vai sendo adicionada ao solo o cálcio vai sendo adsorvido via atração eletrostática às cargas negativas dos coloides, o que resulta em aumento desse cátion na micela. Saturada a micela, seja por cálcio ou outros cátions, todos os outros íons que são adicionados via aplicação de vinhaça ficam livres em solução e, portanto, passíveis de lixiviação desde que as condições de drenagem favoreçam o processo.

Um dos inconvenientes do cálcio em concentração muito elevada na solução do solo é que ele pode se combinar com ânions, que por vezes nem estão em concentração elevada na solução aquosa, e precipitar, reduzindo a disponibilidade às plantas de outros elementos importantes na nutrição. Como dito anteriormente, é

comum que se formem precipitados de cálcio com sulfatos. Com o fósforo a combinação resulta em fosfato bicálcicos e tricálcicos, geralmente insolúveis ou de baixa solubilidade em água.

Tabela 15 - Análise exploratória dos dados de cálcio (mg L^{-1}) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	3,6	11,1	7,8	2,3	29,7	Sim
	40	9	4,8	15,5	9,8	3,2	33,2	Sim
	60	8	6,9	27,5	11,3	6,7	59,5	Não
	80	8	5,4	26,5	11,2	6,4	57,3	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	1,2	87,5	16,3	21,4	131,6	Não
	40	20	0,0	136,0	28,2	34,8	123,3	Não
	60	15	0,5	110,5	26,4	35,7	135,3	Não
	80	14	4,8	118,0	28,1	32,9	117,2	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	5,4	151,0	29,0	42,2	145,6	Não
	40	12	1,0	68,5	26,5	22,7	85,4	Sim
	60	16	2,0	106,0	21,4	26,2	122,6	Não
	80	20	10,5	82,0	28,7	18,2	63,5	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	7,5	58,5	19,4	21,9	112,9	Não
	40	12	6,6	59,0	30,0	15,3	51,2	Sim
	60	21	1,5	176,0	49,1	41,9	85,4	Não
	80	23	5,0	127,5	47,1	30,3	64,3	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	6,6	41,0	15,5	12,0	79,4	Sim
	40	16	0,0	80,0	39,8	26,0	65,3	Sim
	60	10	25,8	66,0	37,3	12,9	34,4	Não
	80	16	14,5	173,0	75,4	49,5	65,7	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	6,0	104,0	39,7	29,4	73,9	Sim
	40	12	2,5	141,0	49,3	42,1	85,4	Não
	60	21	5,0	190,0	71,0	43,7	61,6	Sim
	80	25	10,0	187,0	89,8	54,7	60,9	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coeficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

Na Tabela 16 estão contidos os dados de concentração de magnésio na solução do solo. Como aconteceu com a maioria das outras variáveis analisadas, o seu teor na solução aumentou com as doses crescentes de vinhaça, evidenciando que, como para o cálcio, após a saturação dos sítios de troca dos colóides a tendência é que fiquem livres em solução e aumentem sua concentração conforme mais se aplique vinhaça. A exemplo do que ocorre na relação entre cálcio com sulfatos e fósforo, o magnésio também pode se combinar com estes elementos e formar precipitados.

Tabela 16 - Análise exploratória dos dados de magnésio (mg L^{-1}) na solução do solo

Tratamento	Prof.	N ¹	Mín.	Máx.	Média	DP ²	CV (%) ³	Teste K-S ⁴
Sem irrigação, Adubação convencional	20	7	1,8	4,8	3,5	0,9	26,7	Sim
	40	9	2,0	13,0	5,1	3,5	68,5	Sim
	60	7	3,0	4,0	3,4	0,3	10,2	Sim
	80	8	2,1	16,0	4,3	4,7	110,2	Não
Fertirrigação, sem vinhaça	20	19	0,6	43,5	6,9	10,1	147,3	Não
	40	20	0,9	35,0	8,6	9,3	107,3	Não
	60	17	0,5	61,0	10,4	15,5	148,8	Não
	80	16	1,2	34,0	10,4	11,2	107,6	Não
Fertirrigação, 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	12	2,0	40,0	9,7	10,8	111,9	Não
	40	12	3,0	31,5	12,0	9,2	77,2	Sim
	60	16	2,4	54,5	10,8	15,0	138,6	Não
	80	17	3,5	24,5	11,1	6,7	60,3	Sim
Fertirrigação, 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	5	3,3	28,5	9,0	10,9	122,0	Não
	40	12	3,6	34,0	16,8	9,2	54,6	Sim
	60	20	1,0	59,5	20,8	12,4	59,7	Não
	80	22	1,5	68,0	25,0	15,5	62,0	Sim
Fertirrigação, 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	7	6,6	41,0	15,1	12,0	79,4	Sim
	40	15	1,5	61,0	30,8	16,2	52,7	Sim
	60	10	14,0	38,5	22,5	7,3	32,4	Sim
	80	12	4,0	69,5	28,2	20,6	73,1	Sim
Fertirrigação, 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	20	10	3,3	68,0	22,4	19,4	86,8	Sim
	40	11	3,0	68,5	31,7	22,4	70,8	Sim
	60	20	8,0	61,0	33,0	15,2	46,1	Não
	80	20	2,0	65,0	33,9	16,0	47,2	Sim

¹Número de dados; ²Desvio Padrão da amostra; ³Coefficiente de Variação; ⁴Normalidade, teste de Kolmogorov-Smirnov (5%)

2.8.3.2 Análise multivariada

Os componentes que explicam o conjunto das variáveis consideradas na solução do solo ao final do experimento estão apresentados na Tabela 17. Como explicado anteriormente, foram considerados apenas os fatores que apresentaram autovalor superior à unidade. Por conseguinte, foram levados em conta somente os componentes 1 e 2 que, juntos, explicaram 87,77% da variação das medidas originais (73,29% e 14,49% pelos fatores 1 e 2, respectivamente).

Tabela 17 - Autovalores e percentagem da variância de atributos químicos da solução do solo explicada por cada componente

Componente	Autovalor	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	5,86	73,29	5,86	73,29
2	1,16	14,49	7,02	87,77
3	0,66	8,23	7,68	96,01
4	0,12	1,56	7,81	97,57
5	0,09	1,14	7,90	98,71
6	0,06	0,80	7,96	99,50
7	0,02	0,30	7,98	99,80
8	0,02	0,20	8,00	100,00

A Tabela 18 contém a correlação das variáveis analisadas na solução do solo com os componentes principais. Verificou-se que condutividade elétrica, potássio, sódio, enxofre-SO₄²⁻, cálcio e magnésio foram as variáveis que mais influenciaram o componente principal 1. Por outro lado, pH e nitrato foram as que mais se correlacionaram com o componente principal 2.

Tabela 18 - Correlação dos atributos químicos da solução do solo com os componentes principais CP1 e CP2

Variável	CP1	CP2
pH	-0,42	0,69
Condutividade elétrica	-0,99	0,05
Potássio	-0,97	-0,02
Sódio	-0,95	-0,04
Nitrato	0,27	0,81
Enxofre-SO ₄ ²⁻	-0,99	0,05
Cálcio	-0,94	-0,13
Magnésio	-0,97	0,01

A análise da Figura 8, que contém o círculo unitário com a ordenação dos atributos químicos da solução do solo e dos tratamentos em profundidades, leva à constatação de que o tratamento 1, ou seja, cultivo sem irrigação e com adubação convencional, apresentou homogeneidade em todas as profundidades avaliadas e contribuiu para discriminar o atributo nitrato (quadrante I). Os tratamentos 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça) e 3 (fertirrigado e com aplicação de 176 m³ de vinhaça ha⁻¹) também não diferiram em todas as profundidades analisadas, mas foram distintos das demais situações (quadrante IV), e não se correlacionaram com nenhuma das variáveis em estudo. Os demais tratamentos, que incluíram a

aplicação de doses crescentes de vinhaça, foram influenciadores e discriminantes das variáveis condutividade elétrica, enxofre-SO₄²⁻, cálcio, magnésio, potássio e sódio (quadrantes II e III). O pH teve pouca contribuição para discriminar os comportamentos.

Figura 8 - Diagrama de ordenação dos atributos químicos da solução do solo e dos tratamentos em profundidades

O dendrograma que apresenta a dissimilaridade entre os grupos formados a partir das análises dos atributos químicos da solução do solo (Figura 9) foi construído com a finalidade de verificar se nas profundidades de solo avaliadas houve efeito dos tratamentos (efeito medido a partir do observado na solução do solo).

Figura 9 - Dissimilaridade entre os grupos estabelecida pela distância euclidiana a partir dos atributos químicos da solução do solo: pH, CE, potássio, sódio, nitrato, enxofre-SO₄²⁻, cálcio e magnésio

Por ele ficou evidente a formação de três grupos: 1) um grupo predominantemente formado pelos tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça) e 3 (fertirrigado e com aplicação de 176 m³ de vinhaça ha⁻¹), além de poucas inclusões dos tratamentos 4 e 5 (fertirrigado e com aplicação de 352 e 704 m³ de vinhaça ha⁻¹, respectivamente); 2) um grupo formado predominantemente pelos tratamentos 3 (fertirrigado e com aplicação de 176 m³ de vinhaça ha⁻¹), 4 (fertirrigado e com aplicação de 352 m³ de vinhaça ha⁻¹) e 5 (fertirrigado e com aplicação de 704 m³ de vinhaça ha⁻¹), além de uma inclusão do tratamento 6 (fertirrigado e com aplicação de 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹); 3) um grupo formado predominantemente pelo tratamento 6 (fertirrigado e com aplicação de 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹) com uma inclusão do tratamento 5 (fertirrigado e com aplicação de 704 m³ de vinhaça ha⁻¹). Em suma, os grupos foram formados segundo a escala com que os tratamentos foram aplicados, indicando que estes levaram à diferenciação das variáveis estudadas nas profundidades a que estão associadas, deixando clara a existência de causa e efeito entre os tratamentos e atributos químicos da solução extraída.

2.8.4 Balanço de água no solo

As Figuras 10, 11, 12 e 13 contêm os valores médios de umidade observados no solo ao longo do segundo ciclo da cana-de-açúcar nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm. Nelas também estão indicados os valores de capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), estabelecidos em níveis de energia correspondentes a 1/3 e 15 atmosferas, respectivamente, entre cujos extremos toda a água contida no solo está disponível à maioria das espécies cultivadas. Aqui estão sendo desconsiderados aspectos outros, como aeração e resistência do solo à penetração de raízes, que também devem ser considerados na definição mais avançada de água disponível – o intervalo hídrico menos limitante (SILVA et al., 1994).

Em geral, com algumas exceções, em todas as profundidades e datas monitoradas o teor de água no solo foi mantido abaixo, porém muito próximo da capacidade de campo. Por exemplo, a 20 cm de profundidade, cujo valor de θ_{CC} para o solo é $0,274 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o menor valor médio de umidade registrado foi $0,258 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ou seja, a umidade do solo foi mantida no mínimo a 94% da capacidade máxima de armazenagem de água pelo solo. Para a profundidade de 40 cm, em que o valor de θ_{CC} é de $0,346 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o menor valor encontrado para a umidade foi $0,329 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, distando no máximo em 5% do valor da capacidade de campo. A 60 cm, com valor de θ_{CC} de $0,372 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a menor umidade observada foi de $0,342 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondendo a 92% do valor máximo de armazenagem. Por fim, para a profundidade de 80 cm, em que o valor de θ_{CC} é de $0,364 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, foi observada a menor umidade com valor de $0,341 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o equivalente a 94% da capacidade de campo.

Com base nas informações de umidade apresentadas para todas as profundidades, constata-se que o teor médio de água no solo ao longo do ciclo experimental possibilitou uma situação confortável à cultura sob o aspecto de disponibilidade hídrica, ou seja, a cultura não sofreu estresse hídrico e, portanto, sob estas condições, considerando a boa sanidade das plantas, pode-se assumir que a evapotranspiração ocorreu ao máximo ou muito próximo disto.

Figura 10 - Valores médios de umidade na profundidade de 20 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m^3 de vinhaça ha^{-1} , respectivamente)

Figura 11 - Valores médios de umidade na profundidade de 40 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m^3 de vinhaça ha^{-1} , respectivamente)

Figura 12 - Valores médios de umidade na profundidade de 60 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m^3 de vinhaça ha^{-1} , respectivamente)

Figura 13 - Valores médios de umidade na profundidade de 80 cm para os tratamentos 1 (sem irrigação e com adubação convencional), 2 (fertirrigado e sem aplicação de vinhaça), 3, 4, 5 e 6 (fertirrigado e com aplicação de 176, 352, 704 e 1056 m^3 de vinhaça ha^{-1} , respectivamente)

A variação diária de armazenagem de água no solo, que é o balanço de água no solo (Figura 14), reflete a contabilidade das entradas de água no volume de solo considerado e as saídas de água desse mesmo volume. Em geral, o registrado nos períodos de monitoramento confirma outros resultados verificados na literatura

de que a variação de armazenagem segue a variação das lâminas de água aplicada, seja por irrigação ou precipitações pluviais (ANTONINO et al., 2000; LIMA et al., 2006; MOTA et al., 2010).

Com relação à densidade de fluxo, considerada como a média diária para cada período (Figura 15), constatou-se que nos tratamentos T1 (sem irrigação e adubação convencional), T2 (fertirrigado, sem vinhaça) e T3 (fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹) ocorreu predominantemente ascensão capilar. Nestes tratamentos, como a lâmina de água aplicada na maioria das vezes era inferior à demanda hídrica da cultura, é razoável supor que as plantas de cana-de-açúcar tenham expandido o sistema radicular, e com isso aumentado a extração de água, o que favoreceu a ascensão capilar de água ao volume de solo considerado nos períodos mais secos. Brito et al. (2009) recorrem a este mecanismo desenvolvido pelas plantas de cana-de-açúcar para explicar a elevada ascensão capilar em períodos de escassez de água.

Nos demais tratamentos, em que se fazia a fertirrigação e, ainda, aplicação de doses crescentes de vinhaça, verificou-se que na medida em que as doses eram acrescidas, o que implicava maior lâmina de água aplicada ao solo, maior era a ocorrência de drenagem além de 0,8 m de profundidade do solo. Assim, levando em conta o potencial poluidor da vinhaça que estava sendo adicionada ao solo, a ocorrência de fluxos de drenagem, que, registre-se, foram demasiadamente elevados em alguns períodos dos tratamentos que consideravam a aplicação de vinhaça, tornou-se um indicativo de que o manejo da aplicação de vinhaça ao solo deve ser regido por um rigoroso monitoramento da água no solo de modo a garantir que não ocorram fluxos consideráveis de drenagem ao longo do ciclo da cultura de cana-de-açúcar.

Particularmente quanto ao manejo de água via irrigação para otimizar o uso da água e evitar a contaminação do lençol freático com poluentes químicos, Mota (2010) sugere irrigações rápidas, apesar do inconveniente de ter de acionar o sistema de fornecimento de água com maior frequência no tempo. Outra possibilidade apontada pelo autor é manter o sistema de irrigação acionado por mais tempo, desde que os emissores de água apresentem baixa vazão.

Figura 14 - Variação diária de armazenagem de água no solo, com os respectivos desvios-padrão da média, em 17 períodos de monitoramento do segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (T1 = Sem irrigação, adubação convencional; T2 = Fertirrigado, sem vinhaça; T3 = Fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹; T4 = Fertirrigado, 352 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 704 m³ de vinhaça ha⁻¹; T6 = Fertirrigado, 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹)

Figura 15 - Densidade de fluxo diária, com os respectivos desvios-padrão da média, em 17 períodos de monitoramento do segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (T1 = Sem irrigação, adubação convencional; T2 = Fertirrigado, sem vinhaça; T3 = Fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹; T4 = Fertirrigado, 352 m³ de vinhaça ha⁻¹; T5 = Fertirrigado, 704 m³ de vinhaça ha⁻¹; T6 = Fertirrigado, 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹)

A regressão na análise da variância dos dados diários de densidade de fluxo está apresentada na Figura 16. Vale salientar que como os fluxos registrados foram função não apenas das doses de vinhaça, mas também das irrigações e precipitações pluviais, foram consideradas as respectivas lâminas de água aplicadas em cada tratamento (por exemplo, para o tratamento sem irrigação, com adubação convencional, a lâmina considerada era a da precipitação pluvial apenas; para os demais tratamentos, a lâmina considerada incluiu a precipitação pluvial, a irrigação e a respectiva dose de vinhaça). É importante informar que nos períodos em que não houve aplicação de vinhaça não foi possível estabelecer a regressão para as variáveis em apreço, daí o porquê de serem apresentadas apenas oito regressões dentre os períodos analisados.

Os modelos que melhor explicaram a ocorrência de fluxos, sejam de drenagem ou ascensão capilar, foram o linear (períodos 11 - de 223 a 248 dias após o corte, DAC, e 16 - de 274 a 305 DAC), quadrático (períodos 6 - de 183 a 193 DAC, 10 - de 218 a 223 DAC, e 14 - de 256 a 265 DAC), cúbico (períodos 1 - de 139 a 161 DAC, e 7 - de 193 a 209 DAC) e quártico (período 4 - de 174 a 178 DAC), todos indicando a ocorrência de drenagem com o aumento da lâmina de água aplicada ao solo. Aqui cabe ressaltar a importância das funções matemáticas, desde que estas expliquem bem as relações entre as variáveis, no manejo da aplicação de água e/ou vinhaça no solo em análise. Por exemplo, com estas funções é possível prever que a partir de 4,3 mm (período 1), de 4,0 mm (período 4), de 4,4 mm (período 6), de 5,4 mm (período 7), de 7,8 mm (período 10), de 6,0 mm (período 11), 4,8 mm (período 14) e 4,2 mm (período 16) de lâmina diária de água aplicada há drenagem para além de 0,8 m de profundidade do solo.

Considerando todo o período de monitoramento (de 139 a 329 dias após o corte), a previsão é de que o excedente acima de 5,1 mm seja perdido por drenagem. No entanto, como se trata de um valor médio, a estimativa levando em conta todo o período subestima a evapotranspiração máxima (7,12 mm no quinto período, Tabela 19) e superestima a evapotranspiração mínima definida para a cultura (3,36 mm no segundo período, Tabela 19), daí por que é recomendável observar os valores preditos para cada período monitorado.

Figura 16 - Análise de regressão entre as variáveis lâmina de água aplicada e densidade de fluxo para 8 períodos de monitoramento no segundo ciclo da cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (P1, P4, P6, P7, P10, P11, P14, P6 e Ptotal correspondem, respectivamente, aos períodos de 06/07 a 27/07/2011, 10/08 a 13/08/2011, 19/08 a 28/08/2011, 29/08 a 12/09/2011, 23/09 a 27/09/2011, 28/09 a 22/10/2011, 31/10 a 08/11/2011, 18/11 a 18/12/2011 e 06/07/2011 a 12/01/2012)

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios diários dos componentes do balanço de água no solo para os 17 períodos de monitoramento. Os períodos monitorados compreendem duas fases fenológicas do ciclo da cana-soca, sejam elas: dos períodos 1 a 13, fase intermediária; de metade do período 14 ao período 17, fase final ou de maturação (ALLEN et al., 1998).

Com relação às precipitações pluviais, os eventos foram registrados com maior ocorrência e intensidade na segunda metade do experimento, época que coincide com o período normal de precipitações pluviais para a região de Piracicaba-SP (PEREIRA et al., 2007). Quanto às irrigações, cuja necessidade foi monitorada via tensiômetros para manter o solo com umidade menos limitante ao desenvolvimento das plantas, os valores apresentados incluem as doses de vinhaça, daí por que em muitos períodos, justo naqueles em que se fazia a aplicação de vinhaça, os valores de irrigação não aparecem como sendo os mesmos para todos os tratamentos. Nos períodos em que a lâmina de irrigação foi a mesma para todos os tratamentos que contemplavam irrigação é porque não se irrigou (no caso de lâmina zero) ou não se fez aplicação de vinhaça nestes períodos.

Os dados de variação de armazenagem, ou o próprio balanço de água no solo, tornam evidente que em geral conteúdo diário de água armazenada no volume de solo considerado é praticamente constante no tempo para todos os tratamentos.

Quanto à evapotranspiração, foi definida a partir dos coeficientes de cultivo estabelecidos por Allen et al. (1998), considerando 1,25 para a fase intermediária e 0,80 para a fase final, portanto, puramente a partir de dados climáticos.

Tabela 19 - Componentes do balanço de água no solo em 17 períodos de monitoramento no segundo ciclo da cultura de cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (continua)

Períodos	Nº dias	DAC*	Tratamentos	P	I	Δh	q**	ETc
						----- mm dia ⁻¹ -----		
06/07 a 27/07/2011	22	161	Sem irrigação, adub. convencional	0,04	0,00	-0,51 b	3,63 a	4,18
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,68	0,55 a	4,01 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,48	0,18 a	2,84 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,28	0,45 a	1,94 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,88	0,23 a	0,49 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		5,48	0,68 a	-0,66 b	
28/07 a 04/08/2011	8	169	Sem irrigação, adub. convencional	0,78	0,00	-0,06 a	2,52 a	3,36
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,00	-1,57 b	1,01 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-0,75 a	1,84 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-0,98 a	1,60 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-0,38 a	2,20 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-1,29 b	1,29 b	
05/08 a 09/08/2011	5	174	Sem irrigação, adub. convencional	0,00	0,00	-0,12 b	4,57 a	4,69
			Fertirrigação, sem vinhaça		3,70	2,64 a	3,63 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,70	2,26 a	3,25 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,70	3,40 a	4,39 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,70	1,22 a	2,21 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,70	2,01 a	3,00 a	
10/08 a 13/08/2011	4	178	Sem irrigação, adub. convencional	0,00	0,00	-0,24 a	5,15 a	5,39
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,00	-0,24 a	5,15 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,40	-1,63 a	-0,64 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		8,80	-3,38 b	-8,47 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		17,6	-0,90 a	-13,11 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		26,40	-0,20 a	-21,21 b	
14/08 a 18/08/2011	5	183	Sem irrigação, adub. convencional	0,10	0,00	0,01 a	7,03 a	7,12
			Fertirrigação, sem vinhaça		2,90	-0,37 a	3,75 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,90	-0,43 a	3,69 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,90	-0,64 a	3,46 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,90	-0,00 a	4,12 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,90	-0,43 a	3,69 b	
19/08 a 28/08/2011	10	193	Sem irrigação, adub. convencional	1,75	0,00	-0,04 a	3,04 a	4,83
			Fertirrigação, sem vinhaça		1,20	-0,72 a	1,16 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,96	-0,09 a	0,03 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,72	-0,73 a	-2,37 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		8,24	-0,03 a	-5,19 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		11,76	0,07 a	-8,61 b	
29/08 a 12/09/2011	15	208	Sem irrigação, adub. convencional	1,01	0,00	2,41 a	7,31 a	5,91
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,38	-0,34 b	4,18 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,56	-0,24 b	3,10 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,73	-1,13 b	1,04 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		5,08	-0,24 b	-0,41 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		7,42	-0,33 b	-2,85 b	
13/09 a 18/09/2011	6	214	Sem irrigação, adub. convencional	0,00	0,00	-6,17 b	-0,05 b	6,12
			Fertirrigação, sem vinhaça		1,92	0,15 a	4,35 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,92	-0,52 a	3,68 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,92	0,05 a	4,25 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,92	0,00 a	4,20 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,92	0,21 a	4,41 a	
19/09 a 22/09/2011	4	218	Sem irrigação, adub. convencional	0,23	0,00	0,20 a	6,42 a	6,45
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,00	-1,55 a	4,67 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	0,50 a	6,72 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-0,01 a	6,23 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	0,05 a	6,27 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-1,89 b	4,33 b	

DAC* = Dias após o corte; P = Precipitação Pluvial; I = Irrigação (ou Irrigação + Vinhaça); Δh = variação de armazenagem; q** = densidade de fluxo (valores positivos e negativos representam ascensão capilar e drenagem, respectivamente); ETc = evapotranspiração. Média seguida de mesma letra do tratamento sem irrigação + adubação convencional, na coluna, dentro de cada período, não difere deste pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

Tabela 19 - Componentes do balanço de água no solo em 17 períodos de monitoramento no segundo ciclo da cultura de cana-de-açúcar, em Piracicaba-SP (conclusão)

Períodos	Nº dias	DAC*	Tratamentos	P	I	Δh	q	ETc
						mm dia ⁻¹		
23/09 a 27/09/2011	5	223	Sem irrigação, adub. convencional	0,22	0,00	4,16 a	10,83 a	6,89
			Fertirrigação, sem vinhaça		1,00	0,66 b	6,33 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,52	2,36 a	4,51 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		8,04	0,32 b	-1,05 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		15,08	0,36 b	-8,05 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		22,12	1,05 a	-14,40 b	
28/09 a 22/10/2011	25	248	Sem irrigação, adub. convencional	7,74	0,00	-0,21 b	-1,93 a	6,02
			Fertirrigação, sem vinhaça		1,40	0,83 a	-2,29 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,10	0,36 b	-3,46 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,81	-0,12 b	-4,65 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,22	0,59 a	-5,35 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		5,62	0,49 a	-6,85 a	
23/10 a 26/10/2011	4	252	Sem irrigação, adub. convencional	2,48	0,00	-2,53 a	1,80 a	6,81
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,00	-3,76 a	0,57 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-2,31 a	2,02 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-2,20 a	2,13 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-2,77 a	1,56 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,00	-3,30 a	1,03 a	
27/10 a 30/10/2011	4	256	Sem irrigação, adub. convencional	3,58	0,00	0,13 b	2,50 a	5,95
			Fertirrigação, sem vinhaça		1,50	1,72 a	2,59 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,50	0,77 b	1,64 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,50	1,41 a	2,28 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,50	1,26 b	2,13 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,50	1,24 b	2,11 a	
31/10 a 08/11/2011	9	265	Sem irrigação, adub. convencional	0,00	0,00	-0,86 a	4,91 a	5,77
			Fertirrigação, sem vinhaça		2,11	-0,30 a	3,36 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,07	-0,76 a	0,94 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		6,02	-1,71 a	-1,96 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		9,93	-0,79 a	-4,95 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		13,84	-0,77 a	-8,84 b	
09/11 a 17/11/2011	9	274	Sem irrigação, adub. convencional	12,74	0,00	1,79 a	-7,15 a	3,80
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,56	0,71 a	-8,79 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,56	1,25 a	-8,25 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,56	1,24 a	-8,26 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,56	1,55 a	-7,95 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,56	1,16 a	-8,34 b	
18/11 a 18/12/2011	31	305	Sem irrigação, adub. convencional	6,02	0,00	-0,25 a	-1,85 a	4,42
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,97	0,05 a	-2,52 b	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,54	-0,22 a	-3,36 b	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,10	-0,58 a	-4,28 b	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,24	-0,28 a	-5,12 b	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		4,37	0,14 a	-6,11 b	
19/12 a 12/01/2012	24	329	Sem irrigação, adub. convencional	4,04	0,00	0,03 a	0,08 a	4,09
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,42	0,81 a	0,44 a	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,42	0,45 a	0,08 a	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,42	0,66 a	0,29 a	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,42	0,58 a	0,21 a	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		0,42	0,40 a	0,03 a	
06/07/2011 a 12/01/2012	190	329	Sem irrigação, adub. convencional	3,46	0,00	0,01	2,46	5,03
			Fertirrigação, sem vinhaça		0,99	0,07	-0,90	
			Fertirrigação, 176 m ³ vinhaça ha ⁻¹		1,73	0,09	1,83	
			Fertirrigação, 352 m ³ vinhaça ha ⁻¹		2,47	0,11	-1,18	
			Fertirrigação, 704 m ³ vinhaça ha ⁻¹		3,95	0,13	1,34	
			Fertirrigação, 1056 m ³ vinhaça ha ⁻¹		5,43	0,10	-1,41	

DAC* = Dias após o corte; P = Precipitação Pluvial; I = Irrigação (ou Irrigação + Vinhaça); Δh = variação de armazenagem; q** = densidade de fluxo (valores positivos e negativos representam ascensão capilar e drenagem, respectivamente); ETc = evapotranspiração. Média seguida de mesma letra do tratamento sem irrigação + adubação convencional, na coluna, dentro de cada período, não difere deste pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

No que se refere à densidade de fluxo, o tratamento sem irrigação, com adubação convencional, apresentou predominantemente ascensão capilar, uma vez que o suprimento de água à demanda da cultura e da atmosfera se deu basicamente por água da camada de solo além 0,8 m, salvo nos períodos em que as precipitações pluviais se deram em maior volume. Já nos tratamentos com adição de vinhaça, principalmente nas doses de 352 m³, 704 m³ e 1056 m³ ha⁻¹, os fluxos ocorreram predominantemente na forma de drenagem. Considerando todo o período de monitoramento, de 161 a 329 dias após o corte da cana-planta, um total de 190 dias, os tratamentos 1 (sem irrigação, com adubação convencional) e 2 (fertirrigado, sem vinhaça) apresentarem ascensão capilar superior à drenagem. Nos demais tratamentos, o saldo líquido para os fluxos foi de drenagem para além de 0,8 m de profundidade do solo.

Considerando cada componente do balanço de água no solo no período de 190 dias de monitoramento, entraram no volume de solo 658,1 mm de água no tratamento 1 (sem irrigação, com adubação convencional), 845,4 mm no tratamento 2 (fertirrigado, sem vinhaça), 986,2 mm no tratamento 3 (fertirrigado, 176 m³ de vinhaça ha⁻¹), 1127,0 mm no tratamento 4 (fertirrigado, 352 m³ de vinhaça ha⁻¹), 1408,6 mm no tratamento 5 (fertirrigado, 704 m³ de vinhaça ha⁻¹) e 1690,2 mm no tratamento 6 (fertirrigado, 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹).

Quanto aos fluxos, nos tratamentos 1 e 2 houve um saldo líquido, respectivamente, de 297,2 mm e 122,5 mm por ascensão capilar. Nos tratamentos 3, 4, 5 e 6 o saldo líquido foi de drenagem, com um montante de 12,4 mm, 149,0 mm, 429,2 mm e 714,2 mm, respectivamente. Com relação aos tratamentos em que ocorreram fluxos com saldo líquido de drenagem, os resultados observados indicam que no tratamento 3 as perdas por drenagem representaram apenas cerca de 1% da lâmina total aplicada e no 4, 13%. Já nos tratamentos 5 e 6 as perdas foram elevadas e significaram, respectivamente, 30% e 42% da lâmina total aplicada. Associando os tratamentos com a questão ambiental da contaminação do lençol freático por elementos químicos contidos na solução do solo, é cautelosa a recomendação dos tratamentos 5 e 6 (com 704 m³ e 1056 m³ de vinhaça ha⁻¹, respectivamente) sem um rigoroso sistema de monitoramento da solução do solo ao longo do perfil de solo considerado.

2.8.5 Produtividade

As doses crescentes de vinhaça aplicadas causaram pequeno aumento na produção de colmos (PC) da cana-de-açúcar em seu segundo ciclo, mas não foram suficientes para causar diferença estatística significativa para esta variável. Para a variável produção de massa verde de ponteiros (PMVP), também não houve diferença estatística significativa (Tabela 20).

Vale ressaltar que, para todos os tratamentos, a produtividade obtida superou a produtividade média para esta variedade, CTC 12, na região de estudo, a qual está em torno de 80 t ha⁻¹. O coeficiente de variação (CV) encontrado para a produção de colmos pode ser considerado médio, estando entre 10 e 20%; porém, o CV encontrado para a produção de massa verde de ponteiros, quase o dobro do primeiro, já é considerado alto para experimentos agrônômicos, acima de 20%.

Tabela 20 - Produção de massa verde de ponteiros (PMVP) e de colmos (PC) por cana-de-açúcar em um Nitossolo Vermelho Eutrófico, em cultivo sem irrigação com adubação convencional e em função da fertirrigação com doses de vinhaça, em Piracicaba-SP

Tratamentos	PMVP	PC
	----- t ha ⁻¹ -----	-----
Sem irrigação + adubação convencional	28,6 a	183,9 a
Fertirrigação sem vinhaça	29,8 a	194,8 a
Fertirrigação + 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	24,9 a	194,7 a
Fertirrigação + 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	25,3 a	190,8 a
Fertirrigação + 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	24,6 a	205,1 a
Fertirrigação + 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	28,2 a	203,4 a
Teste F		
Fontes (F)	0,5642 ^{ns}	0,4204 ^{ns}
CV (%)	22,1	12,5
DMS	11,6	47,6

^{ns}: não significativo a 5% de probabilidade.

Média seguida de mesma letra do tratamento sem irrigação + adubação convencional, na coluna, não difere deste pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

2.8.6 Características tecnológicas

Na Tabela 21, são apresentados os resultados das características tecnológicas da cana-de-açúcar Brix (teor de sólidos solúveis), Pol (teor de sacarose aparente), AR (açúcares redutores) e Pureza (relação entre POL e Brix), para colmo e caldo, e Fibra, ART (açúcares redutores totais), ATR (açúcar total recuperável) e

Cinzas (resíduo orgânico remanescente após queima da matéria orgânica), em função dos tratamentos aplicados.

De acordo com Ripoli e Ripoli (2004), os valores obtidos para as variáveis POL, Pureza, Fibras, AR e ART estão dentro das amplitudes recomendadas e indicam boa qualidade da cana colhida. As recomendações para estes indicadores de qualidade são POL (>14), Pureza ($>85\%$), Fibras (11 a 13%), AR ($<0,8\%$) e ART ($>15\%$ maior possível). Comparando-se as médias de cada um dos Tratamentos 2, 3, 4, 5 e 6 com a testemunha (Tratamento 1 – sem irrigação + adubação convencional) pelo teste de Dunnet (5%) não houve diferença significativa para sete das oito variáveis analisadas. Os resultados estão de acordo com Có Júnior et al. (2008), que aplicando volumes de vinhaça equivalentes a 100% e 200% do potássio requerido pela cana também no estado de São Paulo, não encontraram alterações para nenhuma das variáveis tecnológicas.

Tabela 21 - Qualidade tecnológica da cana, em cultivo sem irrigação com adubação convencional e em função da fertirrigação com doses de vinhaça, em Piracicaba-SP

Tratamentos	Brix		POL		AR (%)		Pureza (%)	Fibra (%)	ART (%)	ATR (kg/TC)	Cinzas (%)
	Caldo	Colmo	Caldo	Colmo	Caldo	Colmo	Caldo				
Sem irrigação + adubação convencional	18,7 a	16,4 a	16,4 a	13,8 a	0,65 a	0,55 a	87,3 a	12,3 a	17,8 a	137,6 a	0,51 b
Fertirrigação sem vinhaça	19,7 a	17,3 a	17,6 a	14,8 a	0,57 a	0,49 a	89,4 a	12,4 a	19,1 a	147,2 a	0,56 b
Fertirrigação + 176 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	18,5 a	16,4 a	16,3 a	13,9 a	0,63 a	0,54 a	87,8 a	11,6 a	17,7 a	138,5 a	0,64 a
Fertirrigação + 352 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	19,4 a	17,0 a	17,4 a	14,6 a	0,51 a	0,42 a	89,6 a	12,5 a	18,8 a	144,7 a	0,68 a
Fertirrigação + 704 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	19,0 a	16,7 a	16,9 a	14,3 a	0,59 a	0,50 a	88,9 a	12,0 a	18,3 a	142,2 a	0,75 a
Fertirrigação + 1056 m ³ de vinhaça ha ⁻¹	18,6 a	16,4 a	16,3 a	13,9 a	0,64 a	0,54 a	87,6 a	11,6 a	17,7 a	138,8 a	0,80 a
Teste F											
Fontes (F)	0,741 ^{ns}	0,605 ^{ns}	1,102 ^{ns}	0,886 ^{ns}	1,388 ^{ns}	1,574 ^{ns}	1,173 ^{ns}	2,061 ^{ns}	1,020 ^{ns}	0,804 ^{ns}	23,866 ^{**}
CV (%)	6,0	5,7	6,9	6,6	15,0	15,0	2,1	4,6	6,4	6,1	6,9
DMS	2,2	1,9	2,2	1,8	0,17	0,15	3,6	1,1	2,3	16,8	0,09

^{ns}: não significativo a 5% de probabilidade; ^{**} Significativo a 1% de probabilidade.

Média seguida de mesma letra do tratamento sem irrigação + adubação convencional, na coluna, não difere deste pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

Entretanto, houve exceção para o Teor de cinzas, que apresentou relação direta com o aumento das doses de vinhaça. A análise de regressão relativa às variáveis teor de cinzas no caldo de cana-de-açúcar e doses de vinhaça está apresentada na Figura 17. Constatou-se elevada correlação positiva, significativa a 1% de probabilidade, evidenciando que aumento na dose de vinhaça provoca aumento no teor de cinzas, com comportamento descrito por uma função linear, cujas variações nas doses de vinhaça explicam 94% das variações no teor de cinzas. Aplicado o teste t para o coeficiente angular (b), verificou-se que estatisticamente ele difere de zero e, portanto, a reta que representa a função não é paralela ao eixo das abscissas, isto é, ao eixo x. O fato do não paralelismo evidencia a influência das doses de vinhaça sobre a variável teor de cinzas no caldo.

De acordo com Orlando Filho e Zambello (1980), o potássio é o elemento que aparece em maior proporção nas cinzas e, por isso, a sua aplicação possui efeito comprovado sobre esta variável. Considerando-se a sua alta concentração média na vinhaça aplicada (2956,25 mg L⁻¹), justificam-se os resultados observados.

Figura 17 - Análise de regressão para o teor de cinzas em cana-de-açúcar, em função de doses de vinhaça, em Piracicaba-SP

3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, considerando a aplicação de doses crescentes de vinhaça na cana-de-açúcar em seu segundo ciclo, pôde-se concluir que:

- A quantidade máxima de vinhaça a ser aplicada ao solo não depende somente das concentrações de potássio no solo e no próprio resíduo, mas também da dinâmica da água e de íons na solução do solo;
- Na solução do solo, houve aumento nos valores de condutividade elétrica, potássio, sódio, enxofre, cálcio, magnésio, sem relação de causa e efeito para o nitrato, devido à sua alta variabilidade;
- Há risco iminente de enriquecimento do lençol freático com íons, desde que este ascenda até próximo da zona considerada para a drenagem interna (0,8 m), quando da aplicação de vinhaça no solo independentemente da dose aplicada; e
- As variáveis produção de colmo e de massa verde, e características tecnológicas da cana-de-açúcar, exceto teor de cinzas, não foram afetadas pela aplicação de vinhaça.

REFERÊNCIAS

ALFARO, M.A.; JARVIS, S.C.; GREGORY, P.J. Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil Use and Management**, Denmark, v. 20, n. 2, p. 182-189, June 2004.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARENGA, M.I.N.; DAVIDE, A.C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 933-942, 1999.

ALVES, M.J.F.; ANDRADE, S.J.; MENEZES, E.P.; ALCÂNTARA, L.M. Quantificação da demanda hídrica da cana-de-açúcar (variedades RB 83-5486, RB 86-7515, SP 79-1011 e SP 81-3250) na região de Ituiutaba – MG. **Revista Intercursos**, Ituiutaba, v. 7, n. 1, p. 43-48, jan./jun. 2008.

ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M.; ALEXANDRE, D.M.B.; PALÁCIO, H.A.Q.; LIMA, C.A. Investigação de mudanças do status salino do solo pelo emprego de análise multivariada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 410-415, abr. 2011.

ANTONINO, A.C.D.; SAMPAIO, E.V.S.B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, I.H. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 29-34, jan./abr. 2000.

ANUÁRIO brasileiro da cana de açúcar 2012. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2012. 128 p.

ARAFAT, S.; YASEEN, A.E. Agronomic evaluation of fertilizing efficiency of vinasse. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: WCSS, 2002. p. 14-21.

BARBOSA, E.A.A. **Fertirrigação e aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial na produção de cana de açúcar**. 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010.

BELLINASSO, H.; DEMATTE, J.A.M.; ROMEIRO, S.A. Soil spectral library and its use in soil classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 861-870, jun. 2010.

BLANCO, F.F. **Manual de construção e utilização de extratores de cápsula porosa para obtenção da solução do solo**. Teresina: EMBRAPA Meio Norte, 2006. 36 p. (Documentos, 142).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 380, 30 jul. 1986.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 1469, de 29 de dezembro de 2000. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 10, 10 jan. 2001.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 17-24, jan./fev. 2009.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.M. Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça. **Agropecuária Técnica**, Areia, v. 26, n. 1, p. 60-67, jan./jun. 2005.

BRUNO, I.P.; SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; DOURADO NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; VOLPE, C.A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 3, p. 215-220, May/June 2007.

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 e Tecnologia**, Jaboticabal, v. 1, n. 1, p. 13-20, 2010.

CENCIANI, K.; LAMBAIS, M.R.; CERRI, C.C.; AZEVEDO, L.C.B.; FEIGL, B.J. Bacteria diversity and microbial biomass in forest, pasture and fallow soils in the southwestern Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 907-916, jul./ago. 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica: P4.231**. São Paulo, 2006. 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**, Botucatu, v. 28, p. 196-203, 2008.

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**, Viena, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1987.

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

DALRI, A.B.; CORTEZ, G.E.P.; SENARENSE, R.; ARAÚJO, J.A.C.; CRUZ, R.L. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 4, p. 344-352, out./dez. 2010.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, à níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283-288, abr./jun. 2006.

DIAS, L.E.; ALVAREZ, V.H.; COSTA, L.M. NOVAIS, R.F. Dinâmica de algumas formas de enxofre em colunas de solos tratados com diferentes doses de fósforo e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 373-380, 1994.

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

FAO. Disponível em:

<<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

FERREIRA, P.A.; GARCIA, G.O.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; BORGES JUNIOR, J.C.F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. **Acta Scientia Agronômica**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 29-35, jan./mar. 2006.

GAVA, G.J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, mar. 2011.

GHIBERTO, P.J. **Lixiviação de nutrientes em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2009. 158 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultissol in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n.10, p. 1443-1448, Oct. 2009.

_____. Nitrogen fertilizer leaching in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 1, p. 86-93, Jan./Feb. 2011.

GÓMEZ, J.; RODRIGUEZ, O. Effects of vinasse on sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity. **Revista de la Facultad de Agronomía**, Maracaibo, v. 17, p. 318-326, 2000.

GONÇALVES, F.M. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. **Importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta**. Piracicaba: Potafos, 2001. 5 p. (Informações Agronômicas, 95).

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 494 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE:** estatística da produção agrícola. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201302comentarios.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2013.

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

LIBARDI, D.; CARDOSO, N.A. Cana-de-açúcar: a salvação da lavoura ou do planeta? **Análise Conjuntural**, Curitiba, v. 29, n. 5-6, p. 24-26, maio/jun. 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2012. 343 p.

LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 529-532, set./dez. 1994.

LIMA, C.J.G.S. **Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**. 2009. 109 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A.; SOUZA, E.S.; LIRA, C.A.B.O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 1, n. único, p. 89-95, out./dez. 2006.

MANLY, B.J.F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Tradução de S.I. Carmona. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229 p.

MARQUES, P.A.A.; FRIZZONE, J.A.; TEIXEIRA, M.B. O Estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 2, n. 1, p. 17-31, mar. 2006.

MASIERO, G.; LOPES, H. Etanol e biodiesel com recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. **Revista Brasileira de Política Internacional**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 60-79, jul./dez. 2008.

MEDEIROS, F.A.S.B.; MEDEIROS, J.F. de; SILVA, M.C.C.; ALVES, L.P.; SOUZA, T.H. de; LEVIEN, S.L.A. Necessidade hídrica do meloeiro irrigado com água de diferentes salinidades e cultivado com ou sem cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 234-238, abr./jun. 2005.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície.** 2010. 124 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MOTA, J.C.A.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; AMARO FILHO, J. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1721-1731, 2010.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, v. 25, n. 2, p. 1-5, 1961.

OMETTO, J.C. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ, 1980. 17 p.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. Effects of NPK fertilization on the technological quality of sugar cane variety CB41-76. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 96, p. 37-44, 1980.

OTTO, R.; VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1137-1145, jul./ago. 2010.

PASSARIN, A.L.; RODRIGUEIRO, E.L.; ROBAINA, C.R.P.; MEDINA, C.C. Caracterização de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico típico submetido a diferentes doses de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1255-1260, nov./dez. 2007.

PAYE, H.S.; MELLO, J.W.V.; MELO, S.B. Métodos de análise multivariada no estabelecimento de valores de referência de qualidade para elementos-traço em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 1031-1042, maio/jun. 2012.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia agrícola.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 2007. 192 p. (Apostila).

PETILLO, M.G.; CASTEL, J.R. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 5, n. 2, p. 232-243, June 2007.

QUEIROZ, R.J.B.; SANTOS, D.M.M.; FERRAUDO, A.S.; CARLIN, S.D.; SILVA, M.A. Biochemical and physiological responses of sugarcane cultivars to soil water deficiencies. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 4, p. 469-476, July/Aug. 2011.

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

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole, 1990. 188 p.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302 p.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento – Análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 448-459, jul./set. 2008.

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFOOR-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHIMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 4, n. 6, 2011. Disponível em: < <http://www.plosone.org>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

ROCHA, F.J. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça**. 2012. 94 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

RUHOFF, A.L.; SALDANHA, C.B.; COLLISCHONN, W.; UVO, C.B.; ROCHA, H.R.; CABRAL, O.M.R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de Cerrado e cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 137-146, out./dez. 2009.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, jul./set. 2006.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, F.A.S. **ASSISTAT versão 7.5 beta**. Campina Grande: UFCG, DEAG, CTRN, 2013.

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, jan./fev. 2007.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15-22, jan./fev. 2010.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. Estatística multivariada aplicada à diminuição do número de preditores no

mapeamento digital do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 5, p. 553-561, maio 2011.

TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Water balance of a sugarcane crop: quantitative and qualitative aspects of its measurement. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 57-62, jan./abr. 2002.

TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. 2001. 168 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VALENTIN, J.L. **Ecologia numérica**: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 117 p.

VALLADARES, G.S.; GOMES, E.G.; MELLO, J.C.C.B.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; EBELING, A.G.; BENITES, V.M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 285-296, 2008.

VALNIR JÚNIOR, M.; COSTA, R.N.T.; AGUIAR, J.V. de. Análise de componentes do balanço hídrico em cultura de caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp), sob condições de recarga hídrica natural. **Irriga**, Botucatu, v. 6, n. 3, p. 135-153, set. 2001.

VENDRAME, P.R.S.; BRITO, O.R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 859-864, jun. 2007.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 p. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VITTI, G.C.; QUEIROZ, F.E.C.; OTTO, R.; QUINTINO, T.A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf>. Acesso em: 26 maio 2011.

WANG, Y.D.; MO, Y.C.; WANG, W.H.; LI, Y.R.; YE, Y.P. Effect of vinasse irrigation on the activity of three enzymes and agronomic characters at seedling stage of sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 8, n. 4, p. 264-267, 2006.

XLSTAT. **Xlstat 2013 add-in for Excel (Trial Version)**. New York, 2013. Disponível em: <<http://www.xlstat.com>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

ANEXOS

Anexo A - Atributos químicos do solo (0-20 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	pH (CaCl₂)	M.O.	P (resina)	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma Bases	CTC	Sat. Bases	Sat. Al.	S-SO₄
	-	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----							V%	m%	mg dm ⁻³
Inicial	5,0	27	8	2,5	30	15	39	1	48	86	55	-	16
T1	4,7	24	14	2,8	30	14	42	1	47	89	53	2	14
T2	4,7	19	7	2,0	25	13	38	1	40	78	51	2	19
T3	4,9	24	13	4,2	25	11	38	0	40	78	51	0	15
T4	4,7	27	13	5,3	27	14	38	2	46	84	55	4	28
T5	5,0	24	23	3,7	28	15	34	0	47	81	58	0	19
T6	4,6	27	20	4,2	28	11	38	1	43	81	53	2	25

Anexo B - Atributos químicos do solo (20-40 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	pH (CaCl₂)	M.O.	P (resina)	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma Bases	CTC	Sat. Bases	Sat. Al.	S-SO₄
	-	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----							V%	m%	mg dm ⁻³
Inicial	5,2	20	5	1,7	28	14	33	0	43	77	57	-	28
T1	5,2	20	7	0,6	31	14	31	0	46	77	60	0	14
T2	4,8	19	7	1,8	27	12	38	0	41	79	52	0	21
T3	5,1	19	9	4,4	32	9	34	0	45	79	57	0	19
T4	4,6	22	9	3,7	26	10	38	2	40	78	51	5	35
T5	4,7	21	21	1,8	30	12	34	0	44	78	56	0	47
T6	4,9	21	14	4,2	33	14	31	0	51	82	62	0	35

Anexo C - Atributos químicos do solo (40-60 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	pH (CaCl₂)	M.O.	P (resina)	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma Bases	CTC	Sat. Bases	Sat. Al.	S-SO₄
	-	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							V%	m%	mg dm ⁻³
Inicial	5,5	13	5	0,6	22	14	25	0	37	62	60	-	79
T1	5,5	12	7	0,3	28	14	22	0	42	64	66	0	19
T2	5,1	18	6	0,8	19	10	31	0	30	61	49	0	32
T3	5,6	11	6	1,5	36	18	20	0	56	76	74	0	43
T4	5,4	15	8	2,8	24	11	31	0	38	69	55	0	50
T5	4,9	24	14	1,8	24	11	34	0	37	71	52	0	28
T6	5,2	14	11	2,1	29	16	28	0	47	75	63	0	49

Anexo D - Atributos químicos do solo (60-80 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	pH (CaCl₂)	M.O.	P (resina)	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma Bases	CTC	Sat. Bases	Sat. Al.	S-SO₄
	-	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							V%	m%	mg dm ⁻³
Inicial	5,7	9	4,2	0,2	17	12	23	0	35	58	62	-	80
T1	5,6	13	9	0,3	21	9	22	0	30	52	58	0	21
T2	5,5	12	7	0,6	24	10	25	0	35	60	58	0	42
T3	5,6	9	7	1,3	33	15	20	0	49	69	71	0	32
T4	5,5	18	7	3,2	24	11	25	0	38	63	60	0	40
T5	5,1	19	10	1,8	23	11	34	0	36	70	51	0	40
T6	5,4	16	18	5,1	30	15	28	0	50	78	64	0	46

Anexo E - Valores de micronutrientes (0-20 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----mg dm ⁻³ -----				
Inicial	2	15	3	92	0
T1	5,4	38,0	3,0	57,6	0,4
T2	4,2	28,0	1,7	41,6	0,4
T3	5,0	35,0	4,3	60,8	0,5
T4	4,8	30,0	2,4	60,4	0,7
T5	4,3	29,0	2,4	47,2	0,6
T6	4,8	34,0	2,3	58,0	0,5

Anexo F - Valores de micronutrientes (20-40 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar comparados com o estado inicial do solo

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----mg dm ⁻³ -----				
Inicial	2	11	1	53	0
T1	3,5	30,0	1,0	31,6	0,3
T2	3,2	21,0	1,1	27,6	0,4
T3	4,2	22,0	2,6	34,8	0,4
T4	3,6	23,0	1,7	38,4	0,7
T5	3,2	20,0	1,3	26,4	0,3
T6	4,0	25,0	1,1	30,0	0,4

Anexo G - Valores de micronutrientes (40-60 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar, comparados com o estado inicial do solo

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----mg dm ⁻³ -----				
Inicial	1	6	0	9	0
T1	1,7	9,0	0,3	7,6	0,4
T2	1,5	10,0	0,5	9,2	0,3
T3	2,1	11,0	0,3	13,6	0,4
T4	1,6	9,0	0,4	10,8	0,5
T5	2,9	17,0	1,4	26,0	0,6
T6	2,1	10,0	0,4	8,8	0,5

Anexo H - Valores de micronutrientes (60-80 cm) no segundo ano da cana-de-açúcar, comparados com o estado inicial do solo

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----mg dm ⁻³ -----				
Inicial	1	4	0	5	0
T1	1,0	7,0	0,4	5,5	0,6
T2	0,9	7,0	0,4	4,6	0,4
T3	2,0	10,0	0,5	10,8	0,4
T4	1,1	6,0	0,2	4,5	0,5
T5	1,8	12,0	0,9	14,4	0,4
T6	1,9	15,0	0,5	8,0	0,3