

ANDERSON MAILSON DE OLIVEIRA SOUZA

**ATRIBUTOS DE SOLOS SOB USO DE VINHAÇA NA CULTURA DA CANA-
DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO**

Recife – PE

2014

ANDERSON MAILSON DE OLIVEIRA SOUZA

**ATRIBUTOS DE SOLOS SOB USO DE VINHAÇA NA CULTURA DA CANA-
DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Recife - PE

2014

ANDERSON MAILSON DE OLIVEIRA SOUZA

Dissertação intitulada: **ATRIBUTOS DE SOLOS SOB USO DE VINHAÇA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo, e aprovada em 10 de março de 2014.

Maria Betânea Galvão dos Santos Freire
Presidente da Banca Examinadora
(Orientadora)

Brivaldo Gomes de Almeida
(Examinador)

Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
(Examinador)

Djalma Euzébio Simões Neto
(Examinador)

Dedico

Ao meu avô, Dino Américo de Oliveira, pelo exemplo de responsabilidade e comprometimento com o trabalho. E ao meu tio, Marcos Américo de Oliveira, pelo amor e carinho ofertados. Ambos *in memoriam*.

Ofereço

Ao Senhor Deus pelo dom da vida.

A minha mãe, Miriam Maria de Oliveira, cujo favor excede todas riquezas que o mundo possa oferecer.

A minha esposa, Keila Ferreira da Silva Souza, pelo amor e cuidado doados, por sua paciência e companheirismo diante das adversidades.

Aos meus familiares, em especial minha avó, Maria José de Oliveira, por sua constante intercessão por minha vida ante Deus.

Agradecimentos

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, por ser a plataforma de minhas grandes conquistas.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, representado por professores de excelência. A Socorro, pela pessoa maravilhosa que é, e também ao Josué que nunca se negou a ajudar quando o procuro

A minha Orientadora, Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pela oportunidade, confiança, amizade e incentivo. A qual tenho como referência de profissionalismo. Bem como meus Co-orientadores Benedito Correia e Fernando José Freire pela amizade e contribuições.

As indústrias sucroalcooleiras, Central Olho D'água, Cucaú, Petribú, Santa Tereza, São José, Trapiche e União & Indústria, por possibilitar a realização deste trabalho em suas dependências, por todo apoio técnico disponibilizado e atenção concedida. Ao coordenador da EECAC, Djalma Euzébio Simões Neto, que intermediou a comunicação com as empresas.

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro e bolsa concedida.

Aos meus amigos, Dr Guilherme Pessoa, Maércio Medeiros e Emanuel Hernandes, companheiros de longa data do Laboratório de Química do Solo, que contribuíram de forma decisiva na execução deste trabalho.

Aos meus novos amigos que foram importantíssimos na execução do trabalho, Kuessi Bertrand, Henrique Dantas, Kamilla Araújo, Clarissa Buarque e Djennyfer Ferreira. Obrigado pela amizade, respeito, compromisso e dedicação de todos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 O setor sucroalcooleiro.....	14
2.2 Principais solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata do estado de Pernambuco.....	15
2.3 Vinhaça da cana-de-açúcar.....	18
2.4 Implicações do uso de vinhaça sobre os atributos químicos do solo.....	19
2.5 Implicações do uso de vinhaça sobre os atributos físicos do solo.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Área de estudo.....	26
3.2 Amostragem de solo.....	27
3.3 Análises físicas e químicas das amostras dos solos.....	28
3.3.1 Análises químicas.....	28
3.3.2 Análises físicas.....	30
3.4 Análise estatística.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Análise descritiva dos atributos químicos do solo.....	35
4.1.1 Cátions básicos trocáveis e solúveis.....	35
4.1.2 Acidez do solo.....	40
4.1.3 Soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases e alumínio.....	43
4.1.4 Salinidade e pH do extrato de saturação do solo.....	46
4.1.5 Percentagem de sódio e de potássio trocável e relação de adsorção de sódio e de potássio.....	48
4.1.6 Fósforo disponível, carbono orgânico total e estoque de carbono do solo	51
4.2 Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo.....	55
4.2.1 Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo da camada 0-20 cm.....	55

4.2.2	Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo da camada 20-40 cm.....	61
4.2.3	Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo da camada 40-60 cm.....	66
4.2.4	Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo da camada 60-80 cm.....	70
4.2.5	Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo da camada 80-100 cm.....	74
4.3.1	Análise descritiva dos atributos físicos do solo.....	78
4.3.2	Composição granulométrica.....	78
4.3.3	Argila dispersa em água e índice de dispersão.....	80
4.3.4	Densidade de partículas sólidas do solo e do solo.....	83
4.3.5	Distribuição de poros do solo.....	86
4.3.6	Condutividade hidráulica do solo em meio saturado.....	88
4.4.1	Análise de componentes principais e de agrupamento dos atributos físicos do solo.....	89
5	CONCLUSÕES	90
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

Souza, Anderson Mailson de Oliveira. **Atributos de solos sob uso de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar em Pernambuco** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2014.

RESUMO

A importância da cana-de-açúcar para o estado de Pernambuco remota desde o período colonial concentrando-se, desde então, na região da Zona da Mata. O açúcar e o etanol são os dois principais produtos obtidos através do processamento da cana-de-açúcar. A vinhaça é o principal resíduo da produção do etanol pelas indústrias sucroalcooleiras rica em matéria orgânica e com elevada concentração de nutrientes é utilizada nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar com o objetivo de complementar a adubação do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade do solo, por meio dos atributos químicos e físicos do solo, em áreas com histórico de diferentes períodos de utilização de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. As amostras foram coletadas em cinco camadas de 20 cm, até uma profundidade de 100 cm, de 21 pontos amostrais em quatro diferentes usos: cultivo de cana-de-açúcar sob utilização de vinhaça por curto período de tempo (dois a cinco anos); outro com aplicação de vinhaça por longos períodos (15 a 20 anos); áreas sob cultivo convencional; e áreas com vegetação nativa. Os resultados indicaram que o uso sob aplicação de vinhaça por longo período aumentou a concentração de eletrólitos do solo em todas as camadas avaliadas, enquanto que, o uso sob cultivo convencional de cana-de-açúcar promoveu maior perda de fertilidade do solo. Não foi verificado aumento de carbono orgânico total pela adição de vinhaça ao solo e todos os usos sob cultivo de cana-de-açúcar incrementaram efeitos negativos sobre os atributos físicos do solo. Atributos químicos mais importantes na distinção entre os diferentes usos foram: K^+ e Na^+ trocáveis e solúveis; PKT e PST; RAK e RAS; pH do solo; Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis, SB; V% e M%; CTC; COT e ECOT.

Palavras chaves: qualidade do solo, manejo do solo, resíduo da produção do etanol, análise multivariada

Souza de Oliveira Anderson Mailson. **Characteristics of soils under use of vinasse in the culture of cane sugar in Pernambuco** Dissertation (MSc in Soil Science) Federal Rural University of Pernambuco, 2014.

ABSTRACT

The importance of cane sugar for the state of Pernambuco remote since the colonial period focusing on the Zona da Mata region. Sugar and ethanol are the two principal products obtained from the processing of sugar cane. . The stillage is the main result of the production of ethanol by sugarcane industries rich in organic matter and high concentration of nutrients. It is used in the cultivation areas of sugar cane in order to supplement the fertilization of the soil. The objective of this study was to evaluate soil quality, through chemical and physical soil properties in areas with a history of different periods of time in culture stillage cane sugar. Samples were collected from five layers of 20 cm to a depth of 100 cm, 21 sampling points in four different uses: cultivation of sugar cane vinasse for use in short period of time (two to five years); with another application of vinasse for long periods (15-20 years); areas under conventional tillage; and areas with native vegetation. The results indicated that the use under application of vinasse for longer period increased the concentration of electrolytes in all soil layers evaluated, whereas using conventional production of cane sugar caused greater loss of soil fertility. There was no increase in total organic carbon by the addition of vinasse to the ground and all uses under cultivation of cane sugar have increased negative effects on the physical attributes of soil effects. Most important chemical attributes in distinguishing between different uses were: K^+ and Na^+ exchangeable and soluble; percentage of exchangeable potassium (PEK) and of sodium (PES); potassium adsorption ratio (KAR) and sodium (SAR); soil pH; Ca^{+2} and Mg^{+2} exchangeable, sum of bases (SB); base saturation (V%) and aluminum (M%); capacity of exchangeable cations (CEC); total organic carbon (TOC) and total organic carbon stock (TOCS).

Key words: soil quality, soil management, residue of the ethanol production, multivariate analysis

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a cultura da cana-de-açúcar é conhecida no país pela sua importância econômica na produção do açúcar e, mais recentemente, na produção de energia combustível, o etanol. A previsão de cana moída para a safra de 2013/2014 é de 659,85 milhões de toneladas, onde 355,61 milhões de toneladas de cana serão destinadas para a produção de 27,66 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2013).

Atualmente, o estado de Pernambuco é o sétimo maior produtor nacional de cana-de-açúcar e o segundo maior da Região Nordeste. Estima-se que nesta safra 2013/2014 o estado ocupará a segunda posição na produção de etanol, em relação aos demais estados da Região Nordeste, com uma estimativa de 294.911,4 mil litros (CONAB, 2013).

A busca por uma fonte alternativa de energia renovável e economicamente viável, ante a crise do petróleo, fez com que o álcool anidro combustível, hoje denominado de etanol obtido da cana, tornar-se uma importante fonte de energia para veículos automotores com grandes perspectivas para o mercado internacional. A partir da década de 70, com a implantação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), o etanol passou a ser produzido em grande escala e em quantidades que aumentam a cada safra, gerando, conseqüentemente, uma enorme quantidade de resíduos agroindustriais que, por sua vez, despertam preocupações ambientais.

A vinhaça é o principal resíduo gerado da indústria sucroalcooleira devido ao seu elevado volume. Para cada litro de álcool produzido, aproximadamente, outros 13 litros de vinhaça são gerados e devido a sua riqueza em matéria orgânica, que confere a esse efluente elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a vinhaça causa poluição dos cursos d'água quando descartada nos mesmos (GLÓRIA & ORLANDO FILHO, 1984).

O conjunto de parâmetros que compõe a vinhaça como a alta concentração de matéria orgânica, o baixo pH, a elevada corrosividade, os altos índices DBO, além de elevada temperatura na saída dos destiladores, é tido como potencialmente prejudicial aos organismos aquáticos dos cursos de águas doces, além de interferir na fauna marinha presente nas costas brasileiras (FREIRE & CORTEZ, 2000).

Por apresentar-se como um potencial agente poluidor, o despejo direto e indireto de vinhaça em cursos de água foi proibido desde o ano de 1979 pela portaria de número 323 do Ministério de Estado do Interior.

Diante desta problemática, a vinhaça que era descartada em áreas de sacrifício, começou a ser racionalmente utilizada em áreas de cultivo. A vinhaça deixou de ser um problema ambiental para ser um importante subproduto, por diminuir o custo de produção e melhorar o potencial produtivo do solo. No entanto, o rápido aumento da produção de etanol tem comprometido a utilização deste subproduto de forma adequada, devido ao grande volume, porque a fertirrigação com vinhaça requer alto investimento em tubulações de materiais resistentes à corrosão, canais e tanques impermeabilizados e bombeamento com alto consumo de energia. Em virtude destas dificuldades, tornou-se comum em algumas usinas o excessivo despejo de vinhaça no solo com altas lâminas aplicadas na ocasião da fertirrigação.

A elevada concentração em potássio (K^+), que varia de 1,0 a 2,0 $kg\ m^{-3}$ quando originada do caldo de cana-de-açúcar, e de 3,5 a 7,6 $kg\ m^{-3}$ quando proveniente da utilização do melaço na produção do álcool, foi uma das principais características observada na composição da vinhaça (MACEDO, 2007). Com isso, a aplicação da vinhaça via fertirrigação na complementação e até na substituição total da adubação potássica na cana-de-açúcar tornou-se rotina em todo o país.

Bebé et al. (2009), avaliando dois solos, Espodossolo Ferrihumilúvico e Argissolo Amarelo, sob diferentes períodos de aplicação de vinhaça (sem aplicação de vinhaça, com 3, 7 e 15 anos de aplicação), observaram um aumento na concentração de K^+ , Na^+ e Mg^{2+} nos solos em todas as profundidades das áreas que receberam vinhaça, independentemente do período. Ao avaliarem duas áreas de cultivo de cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho-Amarelo, uma sob aplicação de vinhaça por 10 anos e outra sem aplicação de vinhaça, Barros et al. (2010) também observaram uma maior concentração de Ca^+ , Mg^{2+} , Na^+ e, principalmente, de K^+ na área que recebeu vinhaça em todas as camadas. O aumento de bases trocáveis, principalmente o K^+ , por meio da aplicação de vinhaça também promove a elevação do pH do solo, em geral nas camadas mais superficiais (NUNES et al., 1981).

O aumento na concentração de cátions no solo decorrente da aplicação de elevados volumes deste subproduto pode favorecer a salinização dessas áreas e comprometer o desenvolvimento da cultura. Há registro de aumento significativo da condutividade elétrica para valores próximos a $3,5 \text{ dS m}^{-1}$ no horizonte Ap de um Vertissolo sob aplicação de vinhaça proveniente da produção de vinho da região central da Espanha (BUENO et al., 2009). Silva et al. (2006a), estudando diferentes sistemas de uso e manejo de solos em cana-de-açúcar, também verificaram aumento da condutividade elétrica na camada superficial do solo que recebeu vinhaça provinda da cana-de-açúcar.

A vinhaça possui uma grande quantidade de matéria orgânica, em torno de $15 \text{ a } 37 \text{ kg m}^{-3}$ (MACEDO, 2007) e sua aplicação no solo pode propiciar aumento significativo no teor de matéria orgânica. Canellas et al. (2003) observaram acúmulo significativo de até 11% na concentração de carbono orgânico em subsuperfície em áreas com adição de vinhaça por um período de 35 anos. Estes mesmos autores verificaram aumento dos teores de ácidos fúlvicos e ácidos húmicos (13 e 61%, respectivamente) nessas mesmas áreas, evidenciando a melhoria da capacidade de troca de cátions comprovada por uma correlação significativa ($R^2 = 0,97$) com o valor $p < 0,05$. Devido à contínua disposição deste efluente sobre as áreas de cultivo, o acúmulo de matéria orgânica favorece a elevação do estoque de carbono no solo.

O K^+ em altas concentrações no solo pode atuar como íon dispersante, principalmente, em solos com predominância de cargas negativas comprometendo a condutividade hidráulica do solo. Lobato et al. (1998), trabalhando com amostras remoldadas de um Latossolo Roxo distrófico, verificaram diminuição da condutividade hidráulica saturada dos solos com o aumento das doses de vinhaça, sendo os valores mais expressivos a partir da dose de 400 m^3 . Por outro lado, Camilotti et al. (2006), ao avaliarem a densidade do solo, distribuição de poros e resistência a penetração de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar sob uso de vinhaça e lodo de esgoto, verificaram que estes atributos físicos do solo não foram afetados pelos tratamentos.

Vários autores têm investigado a influência da aplicação de vinhaça em diversos aspectos do solo, desde as propriedades químicas, como macro e micronutrientes (CANELLAS et al., 2003) e frações orgânicas (BALDOTTO et al., 2008), assim como na dinâmica de defensivos agrícolas (PRATA et al.,

2001) e da fauna do solo (MATOS et al., 2011). Além disso, estudos sobre a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas em função da fertirrigação com vinhaça (LYRA et al., 2003; SILVA et al. 2007). Contudo, é preciso uma avaliação mais ampla de diversos tipos de solo sob diferentes intensidades de aplicação de vinhaça a partir de aspectos físicos e químicos que contribuem para a qualidade dos solos de regiões de cultivo tradicional da cana-de-açúcar.

Objetivou-se por meio deste trabalho avaliar a qualidade do solo em áreas com diferentes históricos de aplicação de vinhaça sob cultivo de cana-de-açúcar, caracterizando os atributos físicos e químicos de solos sem aplicação de vinhaça e com seu uso, por curtos e longos períodos, bem como identificar os atributos físicos e químicos de maior relevância para a avaliação da qualidade destes solos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor sucroalcooleiro

A cana-de-açúcar, cujas raízes permeiam não apenas o solo, mas a história do Brasil, foi introduzida no período colonial e transformou-se em uma das culturas mais importantes para a economia do país. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia e China (FAOSTAT, 2012). Primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol, o país tem conquistado, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética.

Em Pernambuco, especificadamente na Zona da Mata, a cana-de-açúcar, introduzida pelos portugueses no período colonial, surgiu como a segunda atividade econômica, uma vez que a primeira era a extração do Pau-brasil. Mas, no decorrer do tempo, a cultura da cana-de-açúcar consolidou-se como a principal atividade econômica do estado, levando Pernambuco a ser o principal produtor de açúcar do país durante décadas até meados do século XX (ANDRADE, 2001). O notório desenvolvimento e expansão da atividade canavieira no estado são atribuídos a fatores de ordem física, como a posição geográfica em relação ao mercado europeu, e condições edafo-climáticas favoráveis ao desenvolvimento da cultura (PRADO JÚNIOR, 1942) e de ordem humana (ANDRADE, 2001). No entanto, a indústria canavieira de Pernambuco, no cenário nacional, vem sendo superada por indústrias de outros estados, principalmente da região Centro-Sul.

Os dois produtos que regem a cadeia produtiva da cana-de-açúcar em todo território nacional é a produção de açúcar e de etanol, este, porém mais recentemente que aquele em virtude de questionamentos sobre a sustentabilidade energética no mundo. A crise petrolífera na década de 70 do século 20 acarretou uma revolução na indústria canavieira brasileira. A busca por uma fonte alternativa de energia renovável e economicamente viável fez do etanol, obtido da cana-de-açúcar, uma importante fonte de energia para veículos automotores com grandes perspectivas para o mercado internacional.

Em 1975 foi criado o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), com o objetivo de estimular a produção do álcool em todo território nacional, o que impulsionou a indústria sucroalcooleira (IBGE, 2006). Porém, paralelamente ao

aumento na produção do etanol, houve um enorme crescimento na quantidade de resíduos agroindustriais que, por sua vez, despertaram preocupações ambientais.

Atualmente, a área cultivada com cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2013/14 está estimada em 8.810,79 mil hectares, sendo o estado de São Paulo o maior produtor com 51,66% da área plantada e, ocupando a sétima posição, Pernambuco com 3,25% (286.030 hectares). O estado produzirá, aproximadamente, 13.351,6 mil toneladas de cana-de-açúcar, sendo 3.738,4 mil toneladas destinadas a produção de etanol, o que corresponde a 294.911,4 mil litros de etanol (CONAB, 2013).

2.2 Principais solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata do estado de Pernambuco

Os solos ocupados com cana-de-açúcar que predominam na Zona da Mata de Pernambuco, em geral, são bastante evoluídos e profundos, não apresentam problemas físicos, com algumas exceções, e são quimicamente ácidos e com baixa fertilidade natural.

Dentre as principais classes de solos exploradas com cana-de-açúcar destacam-se os Latossolos, que ocupam cerca de 9% da área do estado de Pernambuco, tendo como principais subordens presentes na Zona da Mata os Latossolos Amarelos e os Latossolos Vermelho-Amarelos (ARAÚJO FILHO, 2000). Ambos são solos profundos e muito profundos, bem drenados, alumínicos ou distróficos, com baixa fertilidade natural e fortemente ácidos (EMBRAPA, 2006). Os Latossolos ocorrem com maior predominância no sul da região canavieira e tem como principal subordem os Latossolos Vermelho-Amarelos, que ocupam cerca de 40% da região canavieira (KOFFLER et al., 1986). Orlando Filho & Zambello Jr. (1983) apresentam os Latossolos Vermelho-Amarelos como os principais solos explorados com cana-de-açúcar em Pernambuco, representando cerca de 49,4% dos solos sob cultivo.

Os Argissolos representam 25% da área do estado e possuem como subordens dominantes na Zona da Mata os Argissolos Acinzentados, Argissolos Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Vermelhos. Estes são originários de sedimentos do Grupo Barreiras do Terciário-Quaternário da região dos Tabuleiros Costeiros, com exceção dos Argissolos

Vermelhos, ou de rochas do Pré-Cambriano em áreas úmidas (ARAÚJO FILHO, 2000). São solos de baixa fertilidade natural, forte a moderadamente ácidos, com profundidade variável e drenagem forte a imperfeita (EMBRAPA, 2006). Os Argissolos ocorrem, predominantemente, no norte da região canavieira do estado, e a subordem dos Argissolos Vermelho-Amarelos é a mais importante ocupando cerca de 20% de toda região canavieira (KOFFLER et al., 1986). Os Argissolos Vermelho-Amarelos correspondem à segunda subordem de solo mais explorada com cana-de-açúcar em Pernambuco (ORLANDO FILHO & ZAMBELLO JR., 1983).

Os demais solos são de baixa expressão em relação aos anteriores no cultivo da cana-de-açúcar e distribuem-se de forma pontual na Zona da Mata.

Os Espodossolos ocorrem nos Tabuleiros Costeiros e na Baixada Litorânea. Nos Tabuleiros Costeiros, derivam de sedimentos arenosos do Grupo Barreiras do período Terciário, e na Baixada Litorânea, são oriundos de sedimentos arenoquartzosos não consolidados, do período do Holoceno (ARAÚJO FILHO, 2000). Em geral, são solos profundos a muito profundos de textura tipicamente arenosa, a drenagem é variável, dependendo do tipo de horizonte B espódico. Possui baixa fertilidade natural, moderada a fortemente ácidos, baixa saturação por bases, com altos teores de alumínio e baixíssima capacidade de troca de cátions (EMBRAPA, 2006). São solos que, para serem cultivados, exigem intensas adubações e, no período seco, torna-se necessário o uso da irrigação. Quando localizados em áreas de baixadas e na presença do horizonte B espódico cimentado, poderão apresentar elevação do lençol freático, necessitando de uma drenagem artificial.

Os Plintossolos são de baixa expressão e, geralmente, ocorrem em áreas com deficiência de drenagem como áreas rebaixadas e em linhas de drenagem natural. Em sua maioria, são solos profundos a muito profundos, com ampla distribuição granulométrica e elevado gradiente textural (ARAÚJO FILHO, 2000). Predominantemente são fortemente ácidos e com baixa saturação por bases (EMBRAPA, 2006). Esses solos são bastante variáveis quanto à fertilidade natural, mas, principalmente quando ocorrem em áreas de baixada, sua limitação pode ser de ordem física, pela presença de horizonte plíntico ou litiplíntico, característicos de áreas com problemas de drenagem (EMBRAPA, 2006).

Os Nitossolos ocorrem de forma pontual na região da bacia sedimentar vulcânica no município do Cabo de Santo Agostinho, Zona da Mata Sul. São solos minerais profundos, bem drenados, moderadamente ácidos a ácidos, com baixa saturação por bases (< 35%) e saturação por alumínio superior a 70% (ARAÚJO FILHO, 2000). São solos que, em geral, apresentam boa estrutura, sendo sua principal limitação a baixa fertilidade natural.

Os Chernossolos, em particular os Argilúvicos, têm ocorrência localizada na Zona da Mata Norte. São solos minerais pouco profundos, com granulometria bem distribuída, e drenagem moderada devido ao acúmulo de argila de características expansivas (ARAÚJO FILHO, 2000). Esses solos variam de moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos, com saturação por bases e capacidade de troca de cátions alta, ricos em cálcio e magnésio (EMBRAPA, 2006). A principal limitação deste solo em relação ao cultivo da cana-de-açúcar é a limitação quanto à mecanização.

Os Cambissolos que ocorrem na Zona da Mata encontram-se desde relevo plano a montanhoso, compreendendo uma grande variedade de solos minerais, pedogeneticamente são pouco evoluídos, com pequena variação textural ao longo do perfil. A drenagem pode variar de acentuada a imperfeita. São solos predominantemente distróficos e, por vezes, álicos, normalmente ácidos, relativamente dessaturados de bases. A capacidade de troca de cátions é relativamente baixa (ARAÚJO FILHO, 2000).

Os Gleissolos distribuem-se nos ambientes de várzeas úmidas e baixadas mal drenadas, são solos originários de materiais constituídos por sedimentos recentes não consolidados, argilosos, argilo-arenosos e arenosos referidos ao Holoceno e, em sua maioria, de fertilidade natural baixa a média (ARAÚJO FILHO, 2000). São solos minerais hidromórficos com textura média a muito argilosa e de mal a muito mal drenados (EMBRAPA, 2006). O cultivo de cana-de-açúcar sobre este tipo de solo só é possível com a drenagem artificial, pois, em sua grande maioria, são localizados em ambientes de várzea, sob constante alagamento.

Os Neossolos Flúvicos da Zona da Mata restringem-se às várzeas com melhores condições de drenagem, compreendem solos minerais não hidromórficos, pouco evoluídos, formados por sobreposição de camadas de sedimentos aluviais recentes, sem relações pedogenéticas entre os estratos. A drenagem varia de excessiva a imperfeita em função da textura. Variam de

álidos a eutróficos, normalmente são ácidos, relativamente dessaturados de bases, com baixa capacidade de troca de cátions (ARAÚJO FILHO, 2000).

O cultivo da cana de açúcar em Pernambuco está sendo desenvolvido em áreas ocupadas por estas classes de solos. Pela descrição apresentada, verifica-se a variabilidade dos solos quanto as suas potencialidades de uso. Adicionalmente, é preciso destacar que o manejo adotado nessas áreas ao longo de aproximadamente 500 anos de história de cultivo da cana de açúcar na região deve ter promovido alterações significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas desses solos, influenciando sobre sua qualidade.

2.3 Vinhaça da cana-de-açúcar

A vinhaça, também denominada de “calda”, “vinhoto”, “restilo”, “tiborna”, “garapão” e “caxixi”, é um subproduto da produção do álcool, na qual são gerados, em média, 13 litros de vinhaça para cada litro de álcool destilado (ORLANDO FILHO et al., 1983). Por advento do avanço tecnológico nas novas unidades industriais, houve uma tendência na redução do volume de vinhaça produzido na ordem de 10 a 12 litros de vinhaça por litro de álcool produzido (MARQUES et al., 2006). Embora seja de consistência líquida, a vinhaça se enquadra na definição de resíduo sólido, conforme os critérios da NBR 10.004 da ABNT (1987), devido à ausência de um tratamento convencional adequado, sendo este lançado diretamente no solo como fertilizante na lavoura canavieira.

Esse resíduo líquido orgânico de coloração marrom escura e de natureza corrosiva é, pela grande quantidade produzida e pelo elevado potencial poluente, o principal subproduto da indústria sucroalcooleira. De modo geral, a vinhaça apresenta baixos valores de pH, com uma composição, em média, de 93% de água, onde 73% dos constituintes sólidos correspondem a matéria orgânica e, dentre os constituintes inorgânicos, o potássio é o elemento predominante (CERRI et al., 1988). A composição química da vinhaça é muito variável, dependendo, principalmente, do tipo de mosto produzido (BRASIL, 1981), conforme a Tabela 1.

Devido a sua riqueza em matéria orgânica, nutrientes e os altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sua disposição nos cursos d'água pode ocasionar impactos negativos à vida aquática (FREIRE & CORTEZ, 2000), tornando as águas dos cursos d'água putrescíveis (GLÓRIA, 1975a) e,

além de provocar odor desagradável, pode favorecer um aumento no caso de endemias como a malária, a amebíase e a esquistossomose (ALMEIDA, 1952a).

Tabela 1: Composição química de vinhaças conforme o tipo de mosto (PRADA et al., 1998)

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

¹Demanda bioquímica de oxigênio; ²Demanda química de oxigênio

Por apresentar-se como um potencial agente poluidor e com o aumento na produção de álcool combustível, devido à crise petrolífera e à implantação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) em 1975, a destinação final do crescente volume de vinhaça tornou-se fonte de grande preocupação. O que impulsionou a criação de uma legislação específica em 1978, que proibiu o despejo direto e indireto de vinhaça em cursos de água: a portaria de número 323 do Ministério de Estado do Interior. Antes da regulação sobre a destinação final da vinhaça, seu despejo nos mananciais superficiais era uma prática comum entre as indústrias sucroalcooleiras (MACEDO, 2007), apesar de

Almeida (1955), em seu trabalho, relatasse estudos de outros autores sobre os problemas da vinhaça desde os anos de 1940 e 1950.

2.4 Implicações do uso de vinhaça sobre os atributos químicos do solo

Com a proibição do descarte da vinhaça nos mananciais superficiais, o principal destino da vinhaça passou a ser o solo em áreas de sacrifício, que constituíam antigas áreas de cultivo próximas à indústria, e, com o passar do tempo, estudos viabilizaram o uso racional da vinhaça na lavoura de cana-de-açúcar. Desde 1950, vários estudos já comprovavam efeitos positivos da aplicação de vinhaça nas áreas sob cultivo de cana-de-açúcar contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo e o aumento na produtividade da cana-de-açúcar (ALMEIDA, 1952b; GOMES & CARDOSO, 1958; ORLANDO FILHO et al., 1983).

Por apresentar uma elevada concentração de nutrientes, principalmente de potássio (K^+), e altos teores de matéria orgânica, os atributos químicos do solo são os mais influenciados pela fertirrigação com vinhaça. Apesar do seu caráter ácido, a vinhaça, quando aplicada ao solo, inicialmente aumenta a acidez do solo, mas com a decomposição da matéria orgânica ocorre o aumento do pH do solo, decorrente de reações de redução, que consomem íons H^+ , neutralizando a acidez do solo (COPERSUCAR, 1978; CAMARGO et al., 1983; SILVA et al., 2014) podendo até alcalinizá-lo (ALMEIDA, 1955).

A rápida decomposição da matéria orgânica presente na vinhaça, que favorece a elevação do pH do solo, está associada a baixa relação C/N que a mesma apresenta (Tabela 1). A elevação do pH do solo tem como principais efeitos diretos o aumento da disponibilidade de nutrientes e a redução da toxidez por alumínio, potencializando a produtividade da cana-de-açúcar.

A fertirrigação com vinhaça promove o incremento na capacidade de troca de cátions (CTC), nos teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e, principalmente, K^+ , contribuindo efetivamente no aumento da soma de bases dos solos (ORLANDO FILHO et al., 1983). O aumento da CTC do solo está diretamente associado ao, também, aumento nos teores de matéria orgânica presentes na vinhaça, que tem como consequência a minimização da lixiviação de cátions no perfil do solo (BARROS et al. 2010). O incremento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis em todas as camadas estudadas de um Argissolo Vermelho-

Amarelo foi observado por Barros et al., (2010), em áreas fertirrigadas com vinhaça por um período de 10 anos. Bebé et al. (2009), ao estudarem um Espodosolo Ferrihumilúvico e um Argissolo Amarelo sob diferentes períodos de aplicação de vinhaça (sem aplicação de vinhaça, com 3, 7 e 15 anos de aplicação) também observaram aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, sendo este nas camadas superficiais do solo.

Como a vinhaça possui quantidades consideráveis de matéria orgânica, observa-se um aumento desta nas áreas que estão sob aplicação de vinhaça, principalmente, em áreas com longo histórico da disposição constante desse subproduto do álcool. Canellas et al. (2003) estudando um Cambissolo, observaram que as áreas fertirrigadas com vinhaça, durante um período de 35 anos, apresentaram aumento significativo na quantidade de carbono orgânico total nas duas camadas avaliadas. Da mesma forma, Zolin et al. (2011), em um estudo exploratório de aplicação de vinhaça ao longo dos anos sobre Latossolos Vermelhos, observaram o incremento de carbono orgânico ao longo dos anos nas camadas avaliadas. Camilotti et al. (2006) não constataram alteração no teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho em um curto período de avaliação (4 anos). Ou seja, verifica-se que a resposta dos solos varia, provavelmente, em decorrência das propriedades destes, da composição da vinhaça e das doses e período de aplicação.

Dentre os nutrientes exportados pela cana-de-açúcar o K^+ é o mais requerido (KONDORFER & OLIVEIRA, 2005). A fertirrigação com vinhaça pode substituir a adubação potássica e, ou, reduzir a adubação mineral com este nutriente, minimizando os custos de produção, uma vez que, os fertilizantes potássicos são importados. Paulino et al. (2011), estudando a influência da aplicação de vinhaça ao longo dos anos (0, 1, 2, 3, 4, 12 e 20 anos), observaram aumento de K^+ na camada superficial de áreas fertirrigadas com vinhaça sobre Latossolos Vermelhos. Da mesma forma, Silva et al. (2006a) observaram elevação nos teores de K^+ no solo tratado com vinhaça em relação aos demais tratamentos sobre um Argissolo Amarelo. Estes trabalhos destacam a importância da vinhaça como uma fonte alternativa de K^+ para a cultura da cana-de-açúcar, pois a grande maioria dos solos cultivados apresenta baixos valores naturais de K^+ e, no Brasil, não há uma jazida de K^+ de grande expressão.

O fósforo (P) é um dos macronutrientes requeridos em menor quantidade pelas plantas. No entanto, o P é aplicado em doses elevadas, pois, naturalmente, há uma baixa disponibilidade deste elemento na maioria dos solos cultivados e os minerais da fração argila de solos intemperizados como os brasileiros possui grande afinidade por este elemento (NOVAIS, 1999). Devido à matéria orgânica e à presença de P na composição da vinhaça, a disposição deste resíduo orgânico no solo tem contribuído para o aumento da disponibilidade de P ao solo. Esse fato foi comprovado por Glória & Mattiazzo (1976), ao observarem que a adição de vinhaça contribuiu para disponibilidade de fósforo no solo, destacando o efeito da matéria orgânica. Da mesma forma, Canellas et al. (2003) verificaram que na área de cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça houve aumento no teor de P disponível em relação a área de cana-de-açúcar sem aplicação de vinhaça.

A condutividade elétrica (CE) é uma medida indireta da concentração de sais, salinidade, em uma determinada solução através da passagem de corrente elétrica pela mesma. Os solos são considerados salinos quando a CE do extrato de saturação é $\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ e a porcentagem de sódio trocável (PST) é $< 15\%$ (USSSL STAFF, 1954). A vinhaça possui elevada concentração de sais e sua disposição no solo pode promover alterações na concentração eletrolítica do solo. Sengik et al. (1988) observaram aumento na condutividade elétrica na camada superficial do solo com a aplicação de doses de vinhaça superiores a $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Silva et al. (2006a), estudando os efeitos de diferentes sistemas de uso e manejo de solos com cana-de-açúcar em um Argissolo Amarelo, verificaram aumento significativo na CE da camada superficial das áreas que recebiam vinhaça, porém abaixo do valor de CE que define o solo como salino.

Por outro lado, em solos afetados por sais, geralmente, a salinidade é acompanhada pelo acúmulo excessivo de sódio, tornando-os sódicos também. O sódio (Na^+), elemento não essencial para as plantas, é um íon monovalente que, em excesso, aumenta a espessura da camada dupla difusa na superfície das argilas, minimizando as forças de atração entre elas, favorecendo a dispersão das partículas do solo causando, conseqüentemente, problemas físico-hídricos. Na vinhaça a concentração média de Na^+ fica em torno de 52 mg L^{-1} (ELIA NETO & NAKAHODO, 1995). Brito et al. (2005), ao avaliarem os teores de Na^+ e K^+ no lixiviado de três tipos de solos (Argissolo Amarelo, Nitossolo Háptico e Espodossolo Cárbico) observaram que, de modo geral, a

aplicação da vinhaça promoveu o aumento do Na^+ no lixiviado para todos os solos. Estes autores também verificaram a redução do Na^+ trocável no Argissolo Amarelo e no Nitossolo Háptico, principalmente, no horizonte superficial, e no Espodossolo Cárbico foi observado aumento do Na^+ trocável em todos os horizontes em função da baixa concentração deste elemento neste solo.

Embora a aplicação da vinhaça no solo promova grandes benefícios, seu uso indiscriminado tem gerado preocupações agronômicas, como: o desequilíbrio nutricional acarretado, principalmente pelo excesso de K^+ (MARQUES et al., 2006); a aplicação da dose mais adequada para cada tipo de solo (GLÓRIA, 1975b) e; os efeitos negativos sobre a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (FREIRE & CORTEZ, 2000). Mas também há preocupações de caráter ambiental, tais como a contaminação de águas subterrâneas (SILVA et al. 2007) e o potencial risco de salinização dos solos e águas (LYRA et al., 2003). Diante disso, a solução ecológica para destinação da vinhaça por meio da fertirrigação nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar tem sido questionada.

2.5 Implicações do uso de vinhaça sobre os atributos físicos do solo

O manejo intensivo do solo com o cultivo da cana-de-açúcar ao longo do tempo promove modificações na sua estrutura que, de maneira geral, pode comprometer a capacidade produtiva. A aplicação de vinhaça no solo, além de promover mudanças nos atributos químicos, altera os atributos físicos do solo. Essas alterações são influenciadas pela composição química da vinhaça, principalmente pelo teor de matéria orgânica.

A densidade do solo (D_s) é um atributo físico dependente da composição granulométrica e do teor de matéria orgânica do solo, mas pode ser influenciado pelo manejo do solo. Paulino et al. (2011), estudando o efeito da vinhaça ao longo do tempo sobre um Latossolo Vermelho, apresentaram resultados que indicavam aumento na D_s , em todas as camadas estudadas, das áreas fertirrigadas com vinhaça a partir de 4 anos. Camilloti et al. (2006), avaliando a influência da aplicação anual de lodo de esgoto e de vinhaça em um Latossolo Vermelho, verificaram que não houve modificação significativa, em função dos tratamentos, na D_s após as colheitas do 3º e 4º cortes da cultura, ou seja, dentro de um período de quatro anos.

A porosidade do solo corresponde ao espaço do solo ocupado por ar e água, é oriunda da disposição das partículas sólidas do solo, dos espaços entre os agregados e da ação dos organismos que habitam o solo. Assim como a densidade, o espaço poroso do solo pode ser influenciado pelo teor de matéria orgânica do solo. A redução da porosidade total (Pt) é refletida na distribuição dos poros. Araújo et al. (2004), estudando as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, destacaram a redução da macroporosidade (Ma) no solo cultivado, em comparação com os do solo sob mata nativa, em função da compactação evidenciada pela redução da Ds.

Zolin et al. (2011), estudando o efeito da aplicação de vinhaça ao longo do tempo em Latossolos Vermelhos, apresentam resultados que indicam redução da Pt do solo em todas as camadas avaliadas após vinte anos. No entanto, Camilloti et al. (2006) não observaram resultados significativos para a Pt, Ma e microporosidade do solo (Mi) nas áreas de Latossolos Vermelhos sob uso de vinhaça e, ou, lodo de esgoto.

O comportamento da argila dispersa em água (ADA) e o grau de floculação em áreas fertirrigadas com vinhaça foi estudada por Vasconcelos et al. (2010). Estes autores observaram que as áreas de cultivo de cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça e de vinhaça + torta de filtro em um Latossolo Amarelo, ficaram em posição intermediária em relação à área irrigada e a área de mata nativa, destacando a importância destes resíduos na minimização da degradação do solo. Camargo et al. (1988) verificaram a diminuição nos teores de ADA em solos que receberam vinhaça por três anos, e associaram essa redução ao aumento da concentração salina no solo, promovido pela vinhaça, que reduz a dupla camada difusa.

A condutividade hidráulica do solo representa a capacidade do solo transmitir água, ou seja, reflete a intensidade de deslocamento da água no solo. A textura e a estrutura dos solos são atributos a que a condutibilidade se acha mais diretamente ligada (BRADY & WEIL, 2007). Como o manejo do solo interfere principalmente na estrutura do solo, a utilização de resíduos orgânicos como a vinhaça pode promover mudanças neste importante atributo. Lobato et al. (1998), trabalhando com amostras remoldadas de um Latossolo Roxo distrófico, verificaram diminuição da condutividade hidráulica saturada dos solos com o aumento das doses de vinhaça, sendo os valores mais expressivos a partir da dose de 400 m³. Marques et al. (2006), advertem

quanto a utilização de doses de vinhaça acima do recomendado destacando, como consequência, a redução da condutividade hidráulica em função da formação de camadas de impedimento ao fluxo da água.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O trabalho foi realizado por meio da amostragem de solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar em sete usinas, distribuídas ao longo da Zona da Mata de Pernambuco, a saber:

- a) Zona da Mata Norte:
 - Usina Central Olho D'água S.A. – Município de Camutanga-PE.
- b) Zona do Litoral Norte:
 - Usina Santa Tereza S.A. – Município de Goiânia-PE;
 - Usina São José S.A. – Município de Igarassú-PE;
- c) Zona da Mata Central:
 - Usina Petribú S.A. – Município de Carpina-PE.
- d) Zona do Litoral Sul:
 - Usina Cucaú S.A. – Município de Rio Formoso-PE;
 - Usina Trapiche S.A. – Município de Sirinhaém-PE.
- e) Zona da Mata Sul:
 - Usina União & Indústria S.A. – Município de Primavera-PE.

A Zona da Mata do estado de Pernambuco, onde se concentram as indústrias sucroalcooleiras, é uma mesorregião que se caracteriza por uma estreita faixa úmida apresentando um regime de chuvas de inverno. A temperatura média anual da região varia em torno de 24°C.

Segundo a classificação de Köppen, a maior parte da região enquadra-se no tipo de clima Ams', que constitui um clima tropical chuvoso com verão seco (menos de 60 mm no mês mais seco), e com precipitação pluviométrica anual total atingindo pouco mais de 2.000 mm nas áreas mais próximas ao litoral. Ao oeste da Zona da Mata ocorre o tipo de clima As', caracterizado como um clima tropical chuvoso com verão seco, onde a estação chuvosa se adianta para o outono (KOFFLER et al., 1986). A precipitação se concentra nos meses de maio, junho e julho na Zona da Mata Sul e abril, maio e junho na Zona da Mata Norte. As médias anuais de precipitação decrescem mais rapidamente em

direção ao interior na Zona da Mata Norte, enquanto que, na Zona da Mata Sul os totais de precipitação são mais elevados por apresentar uma faixa úmida mais larga (BRASIL, 1973; ARAÚJO FILHO, 2000).

3.2. Amostragem do solo

Em cada usina a amostragem foi feita em áreas que estavam sob quatro condições de manejo quanto à aplicação de vinhaça. O levantamento destas situações foi realizado junto à administração das empresas envolvidas.

O primeiro uso é caracterizado por áreas sem a utilização de vinhaça, apenas com o uso de adubação mineral sob cultivo de cana-de-açúcar (cultivo convencional). O segundo correspondeu a áreas com utilização de vinhaça por curtos períodos de tempo, de dois a cinco anos (período curto). O terceiro, por áreas com aplicação de vinhaça por longos períodos, entre quinze e vinte anos, (longo período). O último consistiu em áreas com solos de mesmas classes preservados sob vegetação nativa, mata atlântica, nas proximidades das demais áreas (mata nativa).

Para cada uso foram coletadas amostras deformadas de solo, com o auxílio de um trado do tipo caneco, em cinco profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm) com três repetições cada, sendo cada ponto amostral devidamente georreferenciado com GPS no momento da coleta. As amostras deformadas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados. Nas três primeiras profundidades também foram tomadas amostras não deformadas por meio do trado amostrador tipo Uhland, onde os cilindros volumétricos (aproximadamente 5x5 cm, diâmetro e altura) contendo as amostras foram envolvidos com filme PVC e, cuidadosamente, colocados em caixas com espuma para o transporte. A restrição da coleta das amostras não deformadas em profundidade ocorreu em função de dificuldades operacionais como a necessidade de escavações e número de cilindros volumétricos.

A amostragem de solo foi realizada sob diferentes relevos, pois a fertirrigação com vinhaça é, normalmente, feita em áreas mais elevadas, distantes dos cursos d'água, para evitar contaminação destes. Desta forma, a amostragem abrangeu encostas, chãs e sopés, principalmente na Zona da

Mata Sul e Norte, e em áreas planas dos Tabuleiros Costeiros, localizados na Litoral do estado.

3.3. Análises físicas e químicas das amostras dos solos

As amostras de solo deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm (terra fina seca ao ar) para a realização das análises químicas e físicas. As não deformadas, após toaleta, foram submetidas à saturação por capilaridade para a determinação da condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}), distribuição de poros e densidade do solo.

3.3.1 Análises químicas

Com o intuito de avaliar os elementos químicos presentes na solução do solo e adsorvidos às cargas elétricas dos colóides, foi realizada uma caracterização desses dois compartimentos tidos como de fundamental importância para avaliação da qualidade química de áreas sujeitas aos diferentes usos com manejos diferenciados quanto à aplicação de vinhaça.

A extração da solução do solo foi realizada por meio do preparo da pasta de saturação e extração por sistema a vácuo, possibilitando a avaliação dos elementos solúveis, cujos procedimentos estão descritos em USSL Staff (1954). De posse do extrato da pasta saturada, foram medidos a condutividade elétrica (CE a 25°C) e o pH; os cátions solúveis Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica; e Na^+ e K^+ por fotometria de emissão de chama (EMBRAPA, 2009).

Quanto aos demais atributos químicos do solo, foram medidos o pH em água na relação 1:2,5 com agitação por um minuto e tempo de reação de uma hora (EMBRAPA, 2009). Os cátions trocáveis foram analisados conforme a Embrapa (2009), sendo o Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹. O Ca^{2+} e o Mg^{2+} foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, e o Al^{3+} trocável, ou acidez trocável, foi determinado por titulação com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹, na presença do indicador azul de bromotimol (0,1%). O Na^+ e o K^+ foram extraídos com solução de Mehlich-1 e determinados por fotometria de emissão de chama.

A acidez potencial (H+Al) foi extraída com solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ (pH 7,1-7,2) e determinada por titulação com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹, na presença do indicador fenolftaleína 10 mg L⁻¹ (EMBRAPA, 2009). De posse dos valores dos cátions trocáveis foi calculada a soma de bases (SB), (Equação 1), capacidade de troca de cátions potencial (T) (Equação 2), a saturação por bases (V) (Equação 3) e a saturação por alumínio (m) (Equação 4) (EMBRAPA, 2009).

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} \quad (1)$$

$$T = SB + (H + Al) \quad (2)$$

$$V = \frac{SB}{T} 100 \quad (3)$$

$$m = \frac{Al^{+3}}{(SB + Al^{+3})} 100 \quad (4)$$

Também foram calculados a porcentagem de sódio trocável (PST) (Equação 5) e a relação de adsorção de sódio (RAS) (Equação 6) (USSL Staff, 1954), bem como, a porcentagem de potássio trocável (PKT) (Equação 7) e a relação de adsorção de potássio (RAK) (Equação 8).

$$PST = \frac{Na^{+}}{T} 100 \quad (5)$$

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (6)$$

$$PKT = \frac{K^{+}}{T} 100 \quad (7)$$

$$RAK = \frac{K^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (8)$$

O fósforo disponível (P), extraído com solução de Mehlich-1, foi determinado na presença da solução ácida de molibdato de amônio diluída e de ácido ascórbico, por colorimetria utilizando comprimento de onda de 660 nm (EMBRAPA, 2009).

O carbono orgânico total foi quantificado pelo método Walkey Black, adaptado por Mendonça & Matos (2005). E o estoque de carbono orgânico foi calculado (Equação 9) conforme sugere Veldkamp (1994).

$$ECOT = \frac{(COT Ds h)}{10} \quad (9)$$

Em que ECOT é o estoque de carbono orgânico em determinada profundidade ($Mg ha^{-1}$); COT é o teor de carbono orgânico total ($g kg^{-1}$); Ds é a densidade do solo média da profundidade ($Kg cm^{-3}$); h é a espessura da camada considerada (cm).

3.3.2. Análises Físicas

Algumas análises físicas foram realizadas com as amostras deformadas e, nas amostras não deformadas, foram utilizadas para determinar a densidade do solo e as variáveis físico-hídricas que requerem o status original do arranjo do solo *in situ*.

Utilizando as amostras deformadas, foram determinadas as frações granulométricas do solo (areia grossa e fina, silte e argila total) e a argila dispersa em água (ADA) por meio do método da pipeta com agitação mecânica lenta (Ruiz, 2005). De posse desses dados foi calculado o índice de dispersão (ID) (Equação 10).

$$ID = \frac{ADA}{Argila Total} \quad (10)$$

A condutividade hidráulica em meio saturado com o permeâmetro de coluna vertical e carga constante (K_{sat}) foi determinada conforme a Embrapa (1997), utilizando a equação de Darcy para a obtenção da Equação 11.

$$K_{sat} = \frac{V_a L}{A t (h + L)} \quad (11)$$

Onde K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); V_a o volume de água coletado (cm^3); L , a altura de coluna de solo (cm); A , a área da seção transversal interna do cilindro (cm^2); h , a altura da lâmina de água sob a superfície do solo (cm); e t , o tempo de coleta para obtenção do V_a .

Após a realização da K_{sat} foram determinadas a macro e a microporosidade pela mesa de tensão (EMBRAPA, 1997), bem como a mesoporosidade. A macroporosidade foi determinada após a aplicação de tensão equivalente a 1 kPa ou 10 cca sobre as amostras contidas na mesa de tensão. Por meio da diferença entre a umidade volumétrica de saturação e o volume de água equilibrada a 1 kPa, que corresponde ao volume de macroporos, a macroporosidade foi calculada conforme a equação 12.

$$M_a = \frac{V_{ma}}{V_t} \quad (12)$$

Onde, M_a é o volume de macroporos ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); V_{ma} , o volume de macroporos (cm^3) e; V_t , volume total do cilindro (cm^3).

O volume de água retido entre a tensão de 1 kPa e 6 kPa, correspondeu ao volume de mesoporos, sendo a mesoporosidade determinada conforme a equação 13.

$$M_e = \frac{V_{me}}{V_t} \quad (13)$$

Onde, M_e é a mesoporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); o V_{me} corresponde o volume de mesoporos (cm^3) e; V_t , o volume do anel (cm^3).

A microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi obtida por meio da diferença entre a porosidade total e a soma da macro e mesoporosidade, equação 14.

$$M_i = P_t - (M_a + M_e) \quad (14)$$

A determinação da porosidade total do solo foi realizada pela umidade volumétrica de saturação, onde esta correspondeu ao volume de poros na amostra. As amostras saturadas foram pesadas e secas em estufa a 105 °C para, por meio da diferença de pesos, convertidos em volume pela densidade da água, quantificar o volume de poros, e por fim, calcular a porosidade total pela equação 15. Assumindo-se que a densidade da água seja 1g cm^{-3} .

$$P_t = \frac{V_p}{V_t} \quad (15)$$

Onde P_t é a porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); V_p corresponde ao volume ocupado pelos poros do solo (cm^3) e; V_t volume total do cilindro (cm^3).

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do cilindro volumétrico e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico conforme a Embrapa (1997).

3.4. Análise estatística

O conjunto de dados dos atributos físicos e químicos do solo foi avaliado, previamente, por meio da estatística descritiva (média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação) com o objetivo de caracterizar cada uso de solo sob os diferentes manejos com vinhaça nas diferentes profundidades, constituindo uma análise preliminar da avaliação estatística.

Os valores médios dos dados originais de cada uso de solo sob os diferentes manejos de vinhaça em cada profundidade foram submetidos a uma padronização, uma vez que, as unidades de medida das variáveis são distintas umas das outras e influenciam diretamente no procedimento multivariado. Esse procedimento foi limitado para cada profundidade e para cada conjunto de atributos do solo (químicos e físicos) separadamente, envolvendo todos os usos e manejos com e sem vinhaça.

Os dados foram submetidos ao teste de esfericidade de Bartlett, que verifica a existência da hipótese nula, e o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que avalia a adequação dos dados, cujo resultado indica se é ou não apropriado o uso da análise de componentes principais (ACP).

Na análise multivariada foi avaliado o nível de relacionamento dos atributos químicos e físicos do solo, separadamente, e para cada profundidade pela análise de componentes principais (ACP), sendo esta uma etapa intermediária do procedimento estatístico. As variáveis físicas e químicas que se mostraram mais importantes na comparação dos atributos foram utilizadas na análise de agrupamento (AA) como etapa conclusiva na separação de cada

uso de solo sob manejos diferentes com vinhaça aos quais os solos estavam submetidos.

A ACP tem por objetivo reduzir a complexidade das inter-relações entre um elevado número de variáveis observadas a um número relativamente pequeno de combinações lineares com essas variáveis, que resultam nas componentes principais (CPs) (RIBAS & VIEIRA, 2011). Nesta etapa do estudo, a ACP foi aplicada para identificar e selecionar as CPs e as variáveis, químicas e físicas, que mais contribuem com essas CPs para explicar, com redução significativa de perda de informação, a maior parte da variabilidade total dos dados. De acordo com Ferreira (2008), o primeiro componente principal explica a maior parte da variação total dos dados e, portanto, o mais importante, e o segundo componente é o segundo mais importante e, assim, sucessivamente.

Após a aplicação da ACP, as variáveis, químicas e físicas, que apresentaram maior correlação com as CPs foram mantidas para a etapa conclusiva, enquanto as demais foram excluídas. Para definir o número de CPs necessários para serem usados na interpretação dos resultados foi utilizado como critério, que o número de CPs seria baseado na explicação de 70% da variabilidade total dos dados. E em cada componente principal, foram selecionadas as variáveis que possuíam coeficientes de correlações, com suas respectivas CPs, superiores a 0,7 (em módulo). Com o objetivo de melhorar a interpretação das CPs a extração delas foi realizada por meio do processo de rotação das componentes que minimiza o número de variáveis com altas cargas num único componente principal (FIELD, 2009).

Essas variáveis, químicas e físicas, consideradas discriminantes na comparação de cada uso de solo sob os diferentes manejos com vinhaça nas diferentes profundidades, foram mantidas para a posterior análise de agrupamento (AA).

Após a seleção pela ACP, as variáveis consideradas importantes no processo interpretativo, foram submetidas a AA. Esse método estatístico tem por finalidade encontrar e separar objetos em grupos similares, sendo estes com veracíssima semelhança dentro de cada grupo e mínima entre os grupos, em termos das variáveis estudadas (MINGOTI, 2005). A medida de dissimilaridade utilizada foi a distância euclidiana e o algoritmo de WARD como método de aglomeração. O resultado da AA foi apresentado em forma de

dendrograma, que auxiliou na identificação dos agrupamentos das amostras mais semelhantes. O número de grupos foi definido pela partição do dendrograma na primeira maior distância entre grupos de ligação obtida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos atributos químicos do solo

4.1.1 Cátions básicos trocáveis e solúveis

Os valores médios de todos os cátions básicos trocáveis foram visivelmente maiores no uso longo período com vinhaça (LPV), em todas as profundidades avaliadas, entre todos os usos (Tabela 2). O uso curto período com vinhaça (CPV) também teve comportamento semelhante ao LPV, porém apresentou menor teor de cálcio trocável (Ca^{+2}) na primeira profundidade em relação ao cultivo convencional (CC) e, também, menor valor de magnésio trocável (Mg^{+2}) em relação ao uso mata nativa (MN), nesta mesma profundidade. A vinhaça é relativamente rica em cátions básicos e sua disposição no solo por meio da fertirrigação contribui para a melhoria da fertilidade do solo pela adição de elementos que fazem parte de sua composição (ORLANDO FLHO et al., 1983; CANELLAS et al., 2003; BARROS et al., 2010).

O aumento nos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis em todas as profundidade avaliadas no uso LPV não pode ser apenas atribuído à fertirrigação com vinhaça, mas provavelmente também à calagem e, ou, gessagem que são efetuadas nestas áreas com o objetivo de suprir as necessidades da cultura em relação a estes elementos, elevar o pH, corrigir a acidez trocável em subsuperfície (gesso) e, também, diminuir a saturação por potássio no solo.

Bebé et al. (2009), estudando o efeito da aplicação de vinhaça em um Espodossolo Ferrihumilúvico Órtico espessarênico sob diferentes períodos, observaram que o aumento nos valores de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis restringiram-se à camada mais superficial (0-10 cm), pois em profundidade o conteúdo de areia do solo aumentava e, nas camadas subsuperficiais, o solo não era enriquecido com estes cátions.

Canellas et al. (2003) verificaram aumento significativo de Ca^{+2} trocável na camada superficial da área sob aplicação de vinhaça, em relação à área de cana queimada e de cana queimada sem vinhaça. Com relação ao Mg^{+2} trocável, estes autores não verificaram diferenças significativas para a área sob uso de vinhaça.

Tabela 2: Valores de cátions básicos trocáveis dos solos em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
Ca ⁺² (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	0,79	2,47	0,06	0,76	96,22	2,83	11,81	0,33	2,56	90,35	1,92	3,19	0,26	0,87	45,48	3,60	7,96	1,09	1,79	49,78
	20 – 40	0,25	1,62	0,02	0,38	150,77	1,08	4,29	0,14	1,11	103,51	1,17	2,56	0,05	0,79	67,39	2,45	5,23	0,48	1,29	52,54
	40 – 60	0,25	1,71	0,02	0,41	165,33	0,53	2,02	0,06	0,44	83,34	0,92	3,10	0,03	0,84	91,29	1,78	5,75	0,35	1,15	64,85
	60 – 80	0,22	1,56	0,02	0,37	162,55	0,47	1,61	0,03	0,43	91,39	0,77	2,23	0,02	0,67	86,14	1,68	5,41	0,52	1,12	66,72
	80 – 100	0,19	1,48	0,01	0,38	202,65	0,48	1,36	0,04	0,38	78,52	0,73	2,15	0,02	0,66	90,37	1,84	6,00	0,47	1,44	78,41
Mg ⁺² (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	0,86	2,01	0,07	0,59	68,70	0,76	2,12	0,14	0,59	77,98	0,85	2,23	0,22	0,54	63,23	1,48	3,39	0,42	0,87	58,88
	20 – 40	0,45	1,23	0,04	0,36	80,47	0,46	2,01	0,05	0,54	118,71	0,59	2,07	0,10	0,52	88,22	1,13	3,28	0,14	0,86	76,26
	40 – 60	0,36	1,37	0,03	0,38	103,60	0,18	0,53	0,02	0,15	80,17	0,43	1,40	0,07	0,37	85,40	0,81	2,24	0,15	0,55	68,05
	60 – 80	0,32	1,23	0,02	0,31	95,11	0,17	0,59	0,01	0,17	99,89	0,54	1,60	0,02	0,46	84,74	0,75	2,09	0,12	0,50	66,31
	80 – 100	0,40	1,93	0,02	0,51	126,91	0,17	0,50	0,02	0,15	89,82	0,59	1,97	0,02	0,53	89,06	0,65	2,14	0,11	0,48	73,34
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	0,22	0,79	0,02	0,20	90,52	0,19	1,33	0,02	0,27	145,57	0,47	1,09	0,05	0,32	67,57	1,05	3,04	0,06	0,79	75,40
	20 – 40	0,10	0,39	0,01	0,11	107,30	0,06	0,52	0,01	0,11	178,18	0,22	1,02	0,02	0,26	118,39	0,69	1,67	0,06	0,50	71,86
	40 – 60	0,09	0,72	0,01	0,16	167,99	0,03	0,17	0,00	0,04	135,78	0,13	0,85	0,02	0,18	145,35	0,65	1,67	0,03	0,48	73,74
	60 – 80	0,06	0,22	0,00	0,07	114,47	0,02	0,13	0,00	0,03	144,95	0,10	0,71	0,01	0,15	155,10	0,64	2,08	0,02	0,55	86,33
	80 – 100	0,06	0,25	0,00	0,06	107,49	0,02	0,10	0,00	0,02	114,22	0,08	0,40	0,00	0,10	127,93	0,59	2,42	0,03	0,56	95,19
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	0,10	0,19	0,02	0,05	46,38	0,07	0,25	0,01	0,05	74,10	0,12	0,30	0,05	0,07	60,94	0,16	0,42	0,03	0,11	69,47
	20 – 40	0,07	0,16	0,01	0,04	53,80	0,03	0,12	0,00	0,02	81,37	0,07	0,22	0,02	0,05	71,75	0,12	0,31	0,02	0,09	76,44
	40 – 60	0,06	0,14	0,01	0,03	53,48	0,02	0,07	0,00	0,02	76,92	0,06	0,20	0,01	0,05	82,79	0,11	0,32	0,02	0,09	81,84
	60 – 80	0,05	0,09	0,00	0,03	54,41	0,02	0,06	0,00	0,02	90,20	0,06	0,18	0,01	0,05	85,48	0,10	0,35	0,01	0,10	94,92
	80 – 100	0,05	0,18	0,00	0,04	73,79	0,02	0,07	0,00	0,02	81,47	0,06	0,18	0,00	0,05	89,23	0,10	0,36	0,03	0,09	87,29

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

Vasconcelos et al. (2010) observaram que nos sistemas de manejo sob aplicação de vinhaça e de vinhaça+torta de filtro houve significativos aumentos nos teores de Ca^{+2} , na profundidade 0-20 cm, em relação ao sistema irrigado e de mata nativa.

Tanto no uso LPV quanto o CPV, em função da aplicação de vinhaça, foi verificada a distribuição de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis em profundidade. Os elevados valores destes dois elementos, em função da fertirrigação com vinhaça, são refletidos na solução do solo em menor proporção para Ca^{+2} , em relação aos demais usos, e em maior para Mg^{+2} , com exceção das duas primeiras camadas para o uso CPV (Tabela 2). O aumento do teor médio de Ca^{+2} no perfil do solo favorecer o desenvolvimento radicular, principalmente o de raízes finas, quebra a barreira química promovida pelos elevados teores de Al^{+3} em subsuperfície, contribuindo para incrementos na produtividade da cultura (SOUSA et al., 2007).

O uso CC apresentou maiores valores de Ca^{+2} trocável em profundidade do que o uso MN, porém observam-se menores valores de Mg^{+2} trocável, com exceção da camada de 20-40 cm, em relação a este mesmo uso. A redução de Mg^{+2} trocável do uso CC em relação ao de MN evidencia uma provável deficiência deste elemento no solo. Mas observa-se que neste mesmo uso há uma concentração maior de Mg^{+2} solúvel (Tabela 3) em relação ao uso de MN. De acordo com Raij (1991), a calagem é suficiente para suprir a carência de Ca^{+2} e Mg^{+2} das maioria das culturas.

No uso CC foram observados os maiores valores de Ca^{+2} e Mg^{+2} solúveis (Tabela 3) nas duas primeiras camadas, o que pode estar relacionado com as aplicações de calcário e sua baixa solubilidade no solo, atuando especialmente onde ocorre a incorporação.

Nos usos sob manejo de vinhaça, CPV e LPV, os valores de potássio (K^{+}) trocável e solúvel foram os maiores em todas as profundidades avaliadas, principalmente no LPV (Tabelas 2 e 3). Dentre os cátions presentes na vinhaça, o K^{+} é o mais significativo, por sua elevada concentração neste resíduo (ORLANDO FILHO et al. 1983). A elevação no teor de K^{+} nas áreas sob uso de vinhaça e seu decréscimo em profundidade também foi constatado por outros autores (BEBÉ et al., 2009; BRITO et al., 2009; VASCONCELOS et al., 2010; e BARROS et al., 2010).

Tabela 3: Valores de cátions solúveis dos solos em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
Ca^{+2} (mmol _c L ⁻¹)	0 – 20	5,14	6,13	3,98	0,67	13,14	8,64	25,02	2,28	7,13	82,56	6,76	10,56	4,75	1,74	25,66	6,81	15,80	3,09	2,83	41,55
	20 – 40	4,18	5,91	3,58	0,52	12,35	4,49	14,30	1,96	2,93	65,22	3,45	6,69	2,15	1,14	32,95	3,10	7,64	1,72	1,34	43,36
	40 – 60	3,84	5,68	1,93	0,67	17,37	2,74	7,00	1,50	1,19	43,64	3,07	5,17	2,21	0,78	25,29	2,88	5,61	1,11	1,02	35,31
	60 – 80	3,79	4,68	2,74	0,38	10,10	2,67	7,69	1,54	1,34	50,24	2,89	4,49	2,08	0,59	20,31	2,91	5,79	0,84	1,34	45,82
	80 – 100	3,60	4,35	1,58	0,57	15,91	2,67	7,13	1,10	1,29	48,46	2,74	3,88	2,05	0,50	18,08	2,45	4,00	0,83	0,77	31,49
Mg^{+2} (mmol _c L ⁻¹)	0 – 20	1,84	3,23	0,95	0,50	26,87	4,46	14,81	0,92	4,64	104,12	2,10	5,76	1,10	1,14	54,58	2,71	7,08	0,95	1,82	67,11
	20 – 40	0,55	1,74	0,22	0,40	71,66	1,76	13,33	0,21	2,96	167,89	1,14	3,51	0,46	0,81	71,22	1,45	6,09	0,47	1,26	86,69
	40 – 60	0,43	1,81	0,12	0,43	98,65	0,55	1,84	0,16	0,42	76,37	0,89	1,91	0,49	0,39	43,82	1,29	5,02	0,33	1,10	85,68
	60 – 80	0,31	0,69	0,11	0,15	48,39	0,50	2,55	0,05	0,57	114,67	0,76	1,60	0,37	0,33	42,80	1,25	5,51	0,15	1,35	107,93
	80 – 100	0,25	0,53	0,01	0,15	59,81	0,50	3,42	0,08	0,72	143,09	0,64	1,30	0,21	0,30	46,49	0,78	2,06	0,11	0,43	55,74
K^{+} (mmol _c L ⁻¹)	0 – 20	0,82	2,50	0,31	0,56	68,17	0,77	4,35	0,18	0,91	118,54	2,17	5,73	0,10	1,95	89,54	5,90	22,29	0,19	5,90	99,97
	20 – 40	0,41	2,39	0,07	0,60	147,39	0,33	1,68	0,05	0,43	129,55	0,84	4,14	0,05	1,02	121,40	2,37	7,98	0,19	2,18	91,67
	40 – 60	0,31	3,56	0,04	0,77	246,00	0,14	0,68	0,03	0,15	107,85	0,45	3,19	0,06	0,72	160,99	2,07	7,57	0,10	1,91	92,35
	60 – 80	0,19	0,87	0,04	0,23	122,59	0,12	0,60	0,02	0,13	109,90	0,29	2,31	0,04	0,52	180,14	2,03	7,27	0,08	1,98	97,71
	80 – 100	0,09	0,23	0,04	0,05	57,65	0,11	0,42	0,02	0,09	86,42	0,22	1,31	0,03	0,38	173,90	1,61	6,65	0,03	1,60	99,00
Na^{+} (mmol _c L ⁻¹)	0 – 20	1,58	2,27	0,95	0,39	24,69	1,25	2,12	0,60	0,44	34,88	1,97	5,64	0,60	1,25	63,55	2,43	6,45	0,73	1,73	71,08
	20 – 40	1,07	2,37	0,55	0,45	42,30	0,88	2,42	0,36	0,42	47,33	1,35	3,10	0,36	0,74	54,70	1,76	4,64	0,50	1,18	67,20
	40 – 60	0,87	3,60	0,41	0,66	76,39	0,63	0,99	0,31	0,22	34,18	0,96	2,17	0,31	0,55	56,71	1,54	4,57	0,36	1,21	78,39
	60 – 80	0,75	1,39	0,31	0,30	40,64	0,59	1,01	0,36	0,20	34,26	0,84	1,98	0,39	0,49	57,44	1,45	4,44	0,31	1,09	75,06
	80 – 100	0,69	2,61	0,36	0,49	71,66	0,55	0,87	0,26	0,19	34,36	0,70	1,49	0,31	0,32	45,80	1,03	2,22	0,26	0,61	59,41

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

No entanto, Orlando Filho et al. (1996), relatam que é importante considerar as interrelações entre K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} na dinâmica das reações de troca iônica nos solos, pois o excesso de um poderá interferir na absorção dos outros e, conseqüentemente, influir diretamente nos processos de absorção de nutrientes e sua utilização pelas plantas. Além disso, o excesso de K^+ pode favorecer a dispersão das partículas de argila, por apresentar comportamento inverso em comparação aos cátions bivalentes em relação ao processo de floculação dos colóides do solo (VASCONCELOS et al., 2010).

No uso CC, quando comparado com o de MN, observa-se redução nos teores de K^+ do solo, tanto na fase trocável quanto na solúvel (Tabelas 2 e 3). Essa redução nos teores de K^+ nas áreas de cultivo convencional está associada à intensa lixiviação no perfil do solo, que pode variar conforme a quantidade de chuva, da dose do nutriente, da textura do solo, entre outros fatores (ROSOLEM et al., 2006). O K^+ é o nutriente mais absorvido pela cana-de-açúcar e a redução da quantidade deste elemento no solo, sem que ocorra sua reposição, implica em decréscimo na produtividade (OTTO et al., 2010).

Alguns trabalhos procuram descrever o nível crítico de K^+ trocável no solo para a cultura da cana-de-açúcar, como o de Raij (1974), que determinou o nível crítico de $0,21 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K^+ , o de Orlando Filho et al. (1981), com o nível crítico de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K^+ e o de Rodella et al. (1983), que sugeriram o nível crítico de $0,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Mas, independente do nível crítico adotado, os valores médios de K^+ trocável do uso LPV atendem a qualquer um deles em todas as profundidades estudadas neste trabalho (Tabela 2). No uso CPV o nível crítico só é atendido nas duas primeiras profundidades, enquanto que no uso CC os valores encontram-se abaixo do nível crítico em todas as profundidades (Tabela 2), o que pode acarretar perda de produtividade nestas áreas. Raij (1991) destaca a importância do K^+ trocável como principal fonte de reposição para a solução do solo.

Outro íon importante que está presente na composição da vinhaça é o sódio (Na^+) que, apesar de não ser essencial, pode interferir de forma negativa no processo de agregação das partículas do solo, bem como na nutrição vegetal. Dentre os usos estudados observa-se maior concentração de Na^+ trocável no LPV em todas as profundidades e na primeira camada do CPV (Tabela 2). Estes resultados indicam que a utilização da vinhaça pode aumentar o teor de Na^+ no solo, não apenas na fase trocável, mas também na

solução do solo, onde os usos do solo sob manejo de vinhaça, CPV e LPV, apresentaram os maiores valores em todas as camadas (Tabela 3).

Barros et al. (2010), ao estudarem o efeito da aplicação da vinhaça sobre as propriedades químicas de solos cultivados com cana-de-açúcar por um período de 10 anos, observaram aumentos significativos no conteúdo de Na^+ e em relação à área que não recebia aplicação de vinhaça. No entanto, Brito et al. (2009), avaliando o comportamento de diferentes classes de solos (Argissolo, Nitossolo e Espodossolo) sob aplicação de vinhaça, verificaram redução do Na^+ trocável com aplicação das doses de vinhaça no Argissolo e no Nitossolo, porém no Espodossolo houve aumento. Os autores atribuíram essas diferenças às particularidades de cada solo. Em outro trabalho. Brito et al, (2005), estudando o lixiviado desses mesmos solos em função da aplicação de vinhaça, verificaram aumento de Na^+ no lixiviado, independente do tipo do solo.

Em ordem decrescente observam-se os maiores coeficientes de variações dos cátions trocáveis: Ca^{+2} (202,65%) no uso MN > K^+ (178,18%) no uso CC > Mg^{+2} (126,91%) no uso MN > Na^+ (94,92%) no uso LPV; e solúveis: K^+ (246%) no uso MN > Mg^{+2} (167,89%) no uso CC > Na^+ (78,39%) no uso LPV > Ca^{+2} (82,52%) no uso CC.

Estes altos valores de coeficiente de variação podem ser atribuídos à grande variabilidade dos solos estudados em relação aos teores de argila, mineralogia, regime pluvial, bem como capacidade de infiltração de água dos solos. Apesar da área estudada com cana de açúcar ter sido restringida à Zona da Mata de Pernambuco, encontram-se solos bastante diferenciados e as respostas aos manejos ocorrem em função do conjunto das propriedades físico-químicas de cada solo e ambiente em particular.

4.1.2 Acidez do solo

O comportamento dos solos sob os diferentes usos quanto os diferentes tipos de acidez estão expressos na Tabela 4. De modo geral, e em todas as camadas avaliadas, verificou-se que o maior valor de pH foi encontrado no uso LPV seguido do CPV. Os valores médios desta variável no uso LPV encontram-se dentro da faixa considerada ideal para a maioria das culturas no Brasil, 5,7 a 6,0 (SOUSA et al., 2007). A elevação do pH do solo em função da aplicação da vinhaça é bastante discutida na literatura. Em trabalhos como o

de Orlando Filho et al. (1983) e Brito et al. (2009), foi verificado que a vinhaça elevou o pH, como também aqui foi observado (Tabela 4). Enquanto que Paulino et al. (2011) observaram uma tendência de decréscimo do pH do solo conforme aumentou-se os anos de aplicação de vinhaça, fato contrário ao observado.

O aumento do pH do solo em profundidade aumenta a disponibilidade de nutrientes, diminui a toxidez por alumínio e pode contribuir para o aumento da disponibilidade de fósforo. Porém, valores de pH muito elevados podem afetar a disponibilidade de micronutrientes catiônicos (Barros et al. 2010). No uso LPV foram encontrados valores máximos de pH superiores a 7,0 e, em alguns casos, maiores que 8,0. E o solo sob o uso CPV também apresentou valores máximos de pH superiores a 7,0 nas três primeiras camadas. No uso CC observa-se, com exceção da primeira profundidade, valores médios de pH menores que os do uso de MN em profundidade. Isso demonstra a necessidade de correção da acidez ativa, ou pH, para que a cultura da cana-de-açúcar possa se desenvolver melhor.

Com relação à acidez trocável (Al^{+3}), cujo efeito tóxico afeta principalmente as raízes das plantas cultivadas (SOUSA et al., 2007), houve redução desse tipo de acidez nos usos LPV e CPV em todas as camadas avaliadas, sendo que no uso LPV essa acidez aumenta em profundidade enquanto que nos demais usos sob cultivo os valores oscilam.

No uso de MN observaram-se os maiores valores de Al^{+3} , com decréscimo em profundidade, acompanhando os valores de pH. Vasconcelos et al. (2010) não observaram diferença significativa entre os diferentes sistemas de manejo das áreas cultivadas (manejo sem irrigação, com vinhaça+torta de filtro e apenas com vinhaça), apenas houve diferença em relação área de mata nativa em todas as camadas estudadas.

Medina et al. (2002), avaliando a influência de doses de vinhaça no crescimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho, verificaram que a aplicação de vinhaça proporcionou maior desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar na camada de 0-25 cm. Este efeito pode estar relacionado com a elevação do pH e a redução do Al^{+3} trocável, além da adição de cátions básicos ao solo.

Tabela 4: Valores de pH do solo, acidez trocável e potencial em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
pH (1:2,5)	0 – 20	4,53	5,61	3,96	0,45	10,00	5,16	6,57	3,89	0,63	12,11	5,69	7,77	4,10	0,89	15,65	6,54	8,34	4,88	0,92	14,07
	20 – 40	4,61	5,30	3,89	0,36	7,78	4,60	5,76	3,67	0,51	11,02	5,28	7,06	4,05	0,79	14,98	6,24	7,57	4,30	0,97	15,49
	40 – 60	4,74	5,44	4,16	0,33	6,91	4,58	5,77	3,88	0,44	9,66	5,10	7,37	3,91	0,83	16,33	6,13	7,87	4,28	1,01	16,50
	60 – 80	4,74	5,62	4,08	0,36	7,66	4,60	5,95	3,85	0,42	9,12	5,10	6,84	4,08	0,69	13,62	6,03	8,19	4,37	1,06	17,53
	80 – 100	4,79	5,39	4,19	0,34	7,12	4,63	6,02	4,02	0,39	8,35	5,03	6,79	4,11	0,67	13,41	5,93	7,88	4,44	0,97	16,34
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	1,32	2,75	0,05	0,71	53,97	0,40	1,95	0,00	0,53	132,53	0,32	1,60	0,00	0,52	161,99	0,10	0,75	0,00	0,22	221,18
	20 – 40	1,33	3,25	0,05	0,82	61,61	0,94	2,05	0,05	0,67	71,25	0,55	2,05	0,00	0,71	128,09	0,24	2,00	0,00	0,52	214,84
	40 – 60	1,17	2,60	0,05	0,64	55,22	1,16	3,45	0,05	0,78	67,19	0,78	3,35	0,00	0,93	119,90	0,37	3,00	0,00	0,76	203,41
	60 – 80	1,06	2,35	0,05	0,61	57,12	1,08	2,40	0,05	0,68	62,82	0,61	1,55	0,00	0,60	97,61	0,46	4,75	0,00	1,09	237,43
	80 – 100	1,04	2,10	0,05	0,64	60,93	0,95	2,30	0,05	0,61	64,14	0,48	1,60	0,00	0,51	107,59	0,45	4,75	0,00	1,13	250,26
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	0 – 20	7,65	15,02	3,80	3,09	40,40	3,91	8,75	0,00	2,33	59,53	2,77	7,92	0,00	2,29	82,62	0,92	6,11	0,00	1,60	174,44
	20 – 40	5,13	15,18	0,99	4,25	82,82	3,75	9,90	1,16	2,12	56,43	2,81	7,10	0,00	2,12	75,22	1,44	6,93	0,00	1,92	133,34
	40 – 60	4,34	22,28	0,83	5,25	121,02	3,44	8,91	1,32	2,10	61,03	3,19	18,32	0,00	3,84	120,24	1,05	6,11	0,00	1,64	155,41
	60 – 80	3,17	10,40	0,99	2,79	88,13	2,99	7,10	0,16	1,90	63,66	3,13	22,94	0,00	4,81	153,90	1,23	4,95	0,00	1,48	120,21
	80 – 100	3,00	8,58	0,50	2,53	84,15	2,30	5,45	0,33	1,51	65,55	2,38	12,38	0,00	2,69	112,63	1,31	4,95	0,00	1,42	108,67

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

No uso CC verifica-se que a redução do Al^{+3} se restringiu as duas primeiras camadas, evidenciando que o uso de corretivos, como o calcário, são mais efetivos nas camadas superficiais do solo.

Assim como na acidez ativa e trocável, o uso LVP foi o que mais reduziu a acidez potencial do solo em todas as camadas estudadas. Enquanto que, em ordem decrescente, os usos CPV e CC surtiram efeito de forma mais efetiva apenas nas duas primeiras camadas quando comparados ao uso de referência, MN. Camargo et al. (1983) relatam o efeito da vinhaça na redução dos valores deste atributo químico. A fertirrigação da vinhaça ao longo dos anos pode reduzir os efeitos dos diferentes tipos de acidez do solo que, por sua vez, favorecer o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar.

Para as variáveis associadas à acidez do solo, os coeficientes de variação foram maiores na ordem: acidez trocável (250,26%), acidez potencial (174,44%) e acidez ativa (17,53%), todas essas variações são atribuídas ao uso de LPV. É possível que, além dos atributos diferenciados dos solos avaliados, a composição da vinhaça, bem como as doses aplicadas, tenham interferido nesta variabilidade. Isso também demonstra que a reação deste e de outros resíduos aplicados ao solo deve ser cuidadosamente monitorada, pois as reações diferem de situação para situação, não se devendo extrapolar resultados obtidos de um lugar para outro.

4.1.3 Soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases e alumínio

As variáveis que relacionam os cátions e sua saturação estão apresentadas na Tabela 5. E, como esperado, o uso LPV apresentou os maiores valores de soma de bases (SB) em todas as camadas dentre os diferentes usos do solo. O uso CPV também teve comportamento semelhante ao uso LPV a partir da segunda profundidade. A elevação da SB nos solos sob estes usos reflete o incremento de cátions de caráter básico por maior da fertirrigação com vinhaça (Tabela 2).

Tabela 5: Valores de soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial, saturação por bases e por alumínio em função de cada uso do solo sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
SB ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0 – 20	1,97	4,78	0,41	1,34	68,13	3,85	13,19	0,60	3,09	80,30	3,35	5,22	0,82	1,33	39,80	6,30	11,06	2,63	2,68	42,62
	20 – 40	0,87	3,02	0,14	0,72	82,69	1,62	6,26	0,22	1,63	100,11	2,05	4,32	0,21	1,25	60,74	4,39	10,11	0,71	2,35	53,43
	40 – 60	0,77	3,54	0,09	0,85	111,24	0,76	2,53	0,12	0,57	74,64	1,54	3,86	0,13	1,15	75,01	3,34	8,53	0,54	1,81	54,40
	60 – 80	0,66	2,20	0,06	0,58	88,28	0,68	2,25	0,08	0,59	87,16	1,47	3,37	0,08	1,03	70,02	3,17	7,99	0,71	1,73	54,40
	80 – 100	0,70	2,52	0,06	0,79	113,09	0,68	1,94	0,07	0,51	74,85	1,46	4,17	0,06	1,13	77,40	3,18	8,63	0,76	2,05	64,52
T ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0 – 20	9,62	17,22	5,62	3,31	34,37	7,76	16,24	2,25	4,18	53,82	6,12	10,25	3,44	1,74	28,45	7,22	11,80	3,17	2,45	33,93
	20 – 40	6,00	15,54	2,28	4,31	71,93	5,37	13,69	2,46	3,21	59,81	4,87	10,56	2,13	2,13	43,75	5,83	10,44	3,50	1,90	32,63
	40 – 60	5,10	22,72	1,57	5,46	107,05	4,21	9,70	2,04	2,08	49,56	4,73	21,31	2,02	4,00	84,69	4,39	8,53	2,52	1,73	39,35
	60 – 80	3,83	11,19	1,28	2,87	75,04	3,67	7,95	1,56	1,81	49,28	4,60	24,94	1,64	4,89	106,37	4,41	7,99	2,74	1,47	33,24
	80 – 100	3,71	10,94	1,30	2,61	70,35	2,98	5,91	1,39	1,45	48,50	3,85	14,80	1,23	2,96	76,86	4,49	8,63	2,24	1,79	39,81
V (%)	0 – 20	21,15	51,12	3,81	13,39	63,32	49,19	100,00	8,20	23,27	47,31	59,96	100,00	10,13	28,78	48,00	87,41	100,00	33,04	19,07	21,82
	20 – 40	18,69	59,81	1,78	16,07	85,96	28,68	57,81	4,54	17,93	62,53	46,12	100,00	5,03	31,19	67,62	75,77	100,00	13,24	28,93	38,18
	40 – 60	20,17	55,77	1,45	16,03	79,51	20,55	65,72	3,62	16,22	78,92	40,17	100,00	3,90	32,85	81,77	78,23	100,00	16,26	29,84	38,15
	60 – 80	21,22	65,60	1,71	17,32	81,61	23,10	90,76	2,62	24,30	105,21	42,71	100,00	2,09	33,10	77,47	72,94	100,00	20,21	28,54	39,13
	80 – 100	24,22	83,57	1,57	24,93	102,93	26,54	78,80	5,12	22,62	85,23	43,93	100,00	2,84	32,55	74,09	70,87	100,00	18,54	27,38	38,63
m (%)	0 – 20	41,09	85,54	1,06	24,79	56,22	15,09	75,91	0,00	22,57	149,59	11,72	63,11	0,00	20,21	172,53	2,43	18,85	0,00	5,40	222,21
	20 – 40	61,02	93,85	1,63	25,74	42,18	43,67	86,83	1,59	30,74	70,39	23,97	86,79	0,00	31,53	131,53	7,57	50,30	0,00	14,60	192,93
	40 – 60	69,50	95,47	1,39	24,42	37,86	57,94	93,53	1,94	27,88	48,11	35,09	92,17	0,00	33,70	96,04	12,39	73,36	0,00	23,06	186,07
	60 – 80	62,07	96,14	2,22	27,19	43,81	59,65	95,75	4,25	29,87	50,07	34,59	95,07	0,00	33,81	97,74	13,09	77,96	0,00	24,00	183,40
	80 – 100	62,74	96,09	1,95	32,11	51,19	56,04	94,17	3,02	29,00	51,75	31,87	96,28	0,00	35,26	110,63	12,97	80,83	0,00	23,87	184,06

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; SB – Soma de Bases; T – Capacidade de Troca de Cátions Potencial; V – Saturação por Bases; m – Saturação por alumínio.

O aumento da SB nas áreas sob uso de vinhaça também foi observado por Vasconcelos et al. (2010), que encontraram diferenças significativas em todas as camadas estudadas em relação aos outros sistemas que não recebiam aplicação de vinhaça. Semelhantemente, Barros et al. (2010), avaliando duas áreas, uma sob uso contínuo de vinhaça por um período de 10 anos e outra sem o uso de vinhaça, constataram aumento significativo em todas as camadas avaliadas na SB. No uso CC observa-se que houve incremento na SB em menores proporções que os usos sob fertirrigação com vinhaça nas duas primeiras camadas, tendo comportamento semelhante ao uso de MN nas três últimas camadas. Esse comportamento da SB no uso CC possui relação com a baixa mobilidade do calcário em profundidade. O maior coeficiente de variação da SB foi observado no uso MN (113,09%).

Com relação à capacidade de troca de cátions potencial, ou total (T) do solo, os maiores valores médios das três primeiras profundidades no uso MN (Tabela 5) podem ser atribuídos ao acúmulo de matéria orgânica nas primeiras camadas de solos sob este tipo de vegetação, o que será discutido posteriormente.

Sousa et al. (2007) também destacam o importante papel da matéria orgânica no aumento da T nos solos minerais, principalmente os tropicais com cargas predominantemente variáveis e dependentes de pH e com caulinita e óxidos de ferro e alumínio dominando a fração argila. Em todos os usos foi observado decréscimo da T em função da profundidade, o que é considerado normal na maioria dos solos minerais, uma vez que o teor de matéria orgânica também decresce. O uso MN apresentou o maior coeficiente de variação (107,05%) para o valor da T.

A saturação por bases (V%) do solo no uso LPV foi superior a 70% em todas as profundidades, caracterizando-o como eutrófico (EMBRAPA, 2006), enquanto que nos demais usos esse valor não chegou a 60%. Esse elevado percentual de bases no uso LPV reflete a elevada SB, em função do incremento de bases trocáveis ao longo dos anos de aplicação de vinhaça. O uso CPV também apresentou aumento na V% quando comparado com os usos CC e MN, porém, com exceção da primeira camada, é considerado distrófico assim como os usos CC e MN. O aumento nos valores de V% nas áreas sob uso de vinhaça também foi verificado por Barros et al. (2010) em todas as

profundidades avaliadas. O maior coeficiente de variação da V% foi o do uso MN (102,93%).

Com relação à saturação por alumínio (m%) é possível perceber a redução desta em função do uso LPV em todas as camadas (Tabela 5). O elevado valor de pH (Tabela 4) e a alta concentração de cátions básicos (Tabela 2) no complexo de troca, proporcionadas pela disposição da vinhaça ao solo ao longo do tempo, contribuem para a redução da m%. A redução da m% indica a minimização dos efeitos tóxicos do Al^{+3} na planta e também favorecer a disponibilidade de fósforo no solo.

O uso CPV apresentou o segundo melhor resultado em relação à redução da m% e, de modo geral, em todos os usos, a maior redução ocorreu nas duas primeiras camadas, que por sua vez estão relacionadas com a matéria orgânica, principalmente no uso de MN, e a adição de nutrientes ao solo nas áreas de cultivo. A m% apresentou maior variação no uso LPV, com um coeficiente de variação de 222,21%.

4.1.4 Salinidade e pH do extrato de saturação do solo

A condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}), caracterizada como um método para se estimar o total de sais solúveis, ou seja, a salinidade, foi maior no uso LPV em todas as camadas avaliadas, seguido do uso CPV (Tabela 6). Os valores de médios dos cátions solúveis apresentados na Tabela 3 justificam os altos valores da CE_{es} observados nestes dois usos sob influência da aplicação da vinhaça. Embora esses valores médios de CE_{es} dos diferentes usos estejam abaixo daqueles que definem os solos como salinos, observa-se que, na primeira camada do uso LPV, há indícios de salinização oriunda da fertirrigação do solo com vinhaça, encontrando-se solo com valor máximo de CE de $4,41 \text{ dS m}^{-1}$ (Tabela 6).

Camargo et al. (1987) também observaram em uma das amostragens na camada 0-10 cm, valores de CE_{es} de $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ em área sob uso de vinhaça. E Bébé et al. (2009), estudando áreas sob diferentes períodos de uso de vinhaça, observaram aumento da CE_{es} em todos os períodos na camada 10-20 cm, e também verificaram correlações positivas entre a CE_{es} dessas áreas com cálcio, magnésio, sódio e potássio.

Tabela 6: Valores de condutividade elétrica e pH do extrato de saturação dos solos em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
CE _{es} (dS m ⁻¹)	0 – 20	0,61	1,32	0,39	0,20	33,79	0,98	2,99	0,20	0,76	77,60	0,82	2,09	0,28	0,47	57,54	1,46	4,41	0,34	1,15	78,82
	20 – 40	0,31	1,02	0,13	0,20	64,00	0,51	2,06	0,12	0,46	91,76	0,56	1,77	0,14	0,41	72,88	0,77	2,22	0,21	0,52	66,74
	40 – 60	0,26	1,14	0,10	0,29	108,98	0,25	0,70	0,09	0,14	55,92	0,46	2,84	0,12	0,59	128,03	0,71	2,12	0,15	0,53	73,86
	60 – 80	0,18	0,35	0,10	0,08	44,91	0,23	0,73	0,08	0,15	63,22	0,34	1,71	0,12	0,36	104,22	0,68	2,26	0,12	0,56	82,47
	80 – 100	0,18	0,61	0,09	0,14	78,00	0,22	0,74	0,07	0,14	66,71	0,31	1,55	0,09	0,33	108,96	0,52	1,21	0,10	0,32	60,92
pH _{es} (extrato)	0 – 20	5,75	7,25	4,64	0,79	13,67	6,65	7,75	5,86	0,53	8,02	6,94	8,02	5,83	0,52	7,44	7,18	7,98	6,16	0,56	7,85
	20 – 40	6,51	7,47	5,48	0,50	7,70	6,56	7,25	5,88	0,35	5,35	6,69	7,28	6,02	0,36	5,36	7,01	7,79	5,81	0,60	8,54
	40 – 60	6,72	7,93	6,03	0,54	8,00	6,67	7,47	6,1	0,37	5,53	6,81	7,29	6,34	0,32	4,63	6,77	7,44	5,88	0,45	6,57
	60 – 80	6,76	7,74	5,86	0,56	8,26	6,67	7,56	5,84	0,41	6,18	6,88	7,60	6,19	0,39	5,69	6,80	7,66	5,80	0,58	8,51
	80 – 100	6,80	7,92	6,07	0,48	7,03	6,76	7,54	6,13	0,39	5,76	6,71	7,57	6,09	0,41	6,09	6,71	7,57	5,76	0,54	8,05

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; CE – Condutividade elétrica do Extrato de Saturação

Silva et al. (2006), estudando os efeitos dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar nas características químicas do solo, verificaram que as áreas sob manejo de vinhaça, apresentaram aumento significativo da CE_{es} nas duas primeiras camadas em relação aos demais manejos em função da composição da vinhaça.

A salinização estimulada por atividades antropogênicas, envolvendo o manejo inadequado do solo e da água, é denominada como salinização secundária (Qadir et al., 2007). Autores como Lyra et al. (2003), Marques (2006) e Silva et al. (2007) advertem sobre o risco de salinidade por meio da fertirrigação com vinhaça.

O aumento da concentração de sais nos usos de solos cultivados foi limitado à primeira camada. Porém, é de conhecimento geral que a maior parte das raízes desenvolve-se, preferencialmente, na camada superficial do solo. A diminuição do potencial osmótico do solo pode comprometer, por exemplo, o perfilhamento e o estabelecimento da cana-de-açúcar. Neste caso, é necessário ter cautela quanto à dose aplicada, bem como a intensidade de aplicação da vinhaça nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

Quanto ao pH_{es} do extrato de saturação, foram verificadas grandes modificações, o mesmo variou conforme a concentração de cátions presentes no extrato de saturação, sendo ligeiramente superior nos usos sob influência da vinhaça. No uso MN foi verificado o maior coeficiente de variação (13,67%).

4.1.5 Percentagem de sódio e de potássio trocável e razão de adsorção de sódio e de potássio

Em nenhum dos usos o valor médio da percentagem de sódio trocável (PST) alcançou níveis preocupantes, ou seja, acima de 6% conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). No entanto, os valores máximos dos usos CPV e LPV revelam valores de PST acima de 6%, conforme representado na Tabela 7.

O aumento do íon Na^+ em relação aos demais cátions no complexo catiônico pode provocar toxidez e favorecer o processo de dispersão das partículas coloidais do solo.

Tabela 7: Valores de percentagem de sódio e de potássio trocáveis e relação de adsorção de sódio e de potássio dos solos em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
PST (%)	0 – 20	1,17	3,35	0,28	0,75	63,86	1,10	3,38	0,07	0,87	78,65	2,06	5,93	0,65	1,33	64,57	2,31	5,52	0,47	1,45	62,55
	20 – 40	1,51	3,50	0,29	1,07	71,17	0,65	1,88	0,02	0,48	72,95	1,65	5,88	0,32	1,28	77,88	1,99	5,39	0,42	1,38	68,94
	40 – 60	1,90	5,13	0,19	1,38	72,74	0,70	2,35	0,03	0,68	97,46	1,59	5,60	0,21	1,31	82,33	2,45	6,41	0,42	1,70	69,61
	60 – 80	1,69	4,27	0,03	1,22	72,06	0,79	4,16	0,00	0,96	122,45	1,80	7,10	0,09	1,69	94,19	2,29	6,26	0,16	1,91	83,59
	80 – 100	2,06	5,89	0,03	1,72	83,10	0,89	2,36	0,00	0,77	85,91	1,88	6,72	0,00	1,81	96,34	2,21	5,17	0,58	1,37	61,75
PKT (%)	0 – 20	2,56	7,22	0,18	2,20	85,91	2,62	10,02	0,44	2,71	103,25	8,19	22,67	1,10	5,93	72,39	14,71	36,41	1,26	10,31	70,06
	20 – 40	2,31	6,31	0,13	2,28	98,90	1,13	8,20	0,14	1,67	147,21	5,28	27,44	0,66	6,93	131,18	11,76	29,80	1,14	8,02	68,19
	40 – 60	2,90	11,33	0,10	3,55	122,21	0,76	5,68	0,07	1,18	155,67	3,44	24,17	0,30	5,52	160,19	14,86	35,93	0,84	9,71	65,37
	60 – 80	2,36	10,26	0,02	2,82	119,16	0,79	8,61	0,01	1,81	230,99	3,47	30,11	0,23	6,70	192,98	14,45	37,25	0,25	10,93	75,60
	80 – 100	2,58	12,02	0,10	3,19	123,50	0,72	5,20	0,02	1,08	149,59	3,38	22,74	0,02	6,20	183,61	13,40	34,44	0,42	9,58	71,47
RAS (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	0 – 20	0,85	1,15	0,51	0,23	26,72	0,60	1,42	0,23	0,76	125,76	0,92	2,19	0,30	0,49	53,97	1,22	3,10	0,34	0,76	67,56
	20 – 40	0,68	1,23	0,39	0,23	33,67	0,54	0,83	0,28	0,68	123,92	0,90	2,06	0,25	0,46	51,46	1,17	2,55	0,39	0,68	57,87
	40 – 60	0,58	1,86	0,28	0,34	57,97	0,52	0,98	0,27	0,68	131,40	0,66	1,31	0,22	0,31	46,20	1,04	2,86	0,28	0,68	65,71
	60 – 80	0,52	0,94	0,21	0,19	37,20	0,50	1,04	0,24	0,22	43,17	0,62	1,21	0,27	0,30	48,61	0,99	2,25	0,28	0,58	58,67
	80 – 100	0,50	1,68	0,25	0,32	64,71	0,47	0,97	0,25	0,20	42,64	0,53	0,96	0,22	0,20	37,42	0,82	1,91	0,27	0,49	59,59
RAK (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	0 – 20	0,44	1,24	0,17	0,29	65,85	0,29	1,02	0,12	0,22	76,55	0,97	2,26	0,05	0,77	79,41	2,65	8,02	0,09	2,50	94,39
	20 – 40	0,25	1,25	0,05	0,32	130,22	0,17	0,81	0,05	0,17	101,57	0,52	2,09	0,04	0,57	109,71	1,55	5,40	0,14	1,41	90,64
	40 – 60	0,18	1,84	0,03	0,39	214,37	0,10	0,36	0,03	0,09	85,56	0,29	1,78	0,04	0,41	141,00	1,38	4,62	0,08	1,18	85,38
	60 – 80	0,13	0,59	0,03	0,15	120,60	0,09	0,26	0,24	0,07	79,09	0,20	1,40	0,03	0,33	163,19	1,36	4,38	0,10	1,20	87,70
	80 – 100	0,07	0,16	0,03	0,03	52,32	0,08	0,33	0,02	0,07	80,34	0,15	0,93	0,02	0,25	160,23	1,24	4,30	0,04	1,12	90,16

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; PST – Porcentagem de Sódio Trocável; PKT – Porcentagem de Potássio Trocável; RAS – Razão de Adsorção de Sódio; RAK – Razão de Adsorção de Potássio.

A dispersão dessas partículas ocorre em função das forças repulsivas o que, normalmente, está associado à expansão das duplas camadas difusas que, por sua vez, estão relacionadas com a presença do sódio adsorvido (Freire & Freire. 2007). Mas, segundo Ayers & Westcot (1999), a cana-de-açúcar é uma cultura semi-tolerante à PST (15% > PST > 40%), apesar da cultura poder ser prejudicada pelas alterações nas propriedades físicas do solo.

Diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho, Silva et al. (2006) observaram os maiores valores de PST na área irrigada, devido à elevada razão de adsorção de sódio que água apresentava $4,04 \text{ (mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0,5}$, mas não verificaram alterações na PST da área manejada com vinhaça.

Ao estudar o efeito do aporte de matéria orgânica pelos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas, Vasconcelos et al., (2010) não constataram alterações significativas na PST das áreas estudadas. Contudo, o mesmo não foi observado com relação ao percentual de potássio trocável (PKT) em todas as camadas, sendo verificados aumentos no uso LPV, com valores médios superiores a 11% e máximos de até 37,25% (Tabela 7).

O uso CPV apresentou a segunda maior PKT, o que evidencia a influência da vinhaça no incremento de K^+ ao solo, mesmo em curto período de aplicação. Segundo Orlando Filho et al. (1993), quando a saturação de K^+ , em relação ao valor T do solo, é superior a 5% as lavouras apresentam alta produtividade. Neste caso, o uso LPV atende a esse critério em todas as camadas e o uso CPV nas duas primeiras. Entretanto, os valores de PKT para o uso CC são relativamente baixos, sendo inferiores ao uso MN em todas as profundidades a partir da segunda, em virtude dos baixos valores de K^+ trocável que os solos sob esse uso apresentam (Tabela 2).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB, 2006), que tem como objetivo estabelecer os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar, no solo do Estado de São Paulo, relata que a concentração máxima de K^+ no solo não dever ser superior a 5% do valor de T. Ou seja, o uso LPV e o de CPV poderiam apresentar problemas caso essa legislação fosse adotada para o Estado de Pernambuco, o qual não possui uma legislação própria quanto à

disposição desse resíduo ao solo. No uso CC foi observado o maior coeficiente de variação para este atributo (230,99%).

Os valores da razão de adsorção de sódio (RAS) foram relativamente baixos em todos os valores médios dos usos estudados, sendo os maiores valores atribuídos, em todas as camadas, aos usos sob aplicação de vinhaça, em ordem de importância, LPV e CPV. Os valores de RAS, em todos os usos, foram reduzidos em profundidade e não representam riscos de sodificação dos diferentes usos do solo, já que esta é uma das variáveis para quantificar a sodicidade conforme, USSL Staff (1954). O maior valor médio observado foi de 1,22 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5} e o máximo de 3,1 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5}, ambos do uso LPV. Porém observa-se que a aplicação da vinhaça tem contribuído para o aumento do Na⁺ na solução do solo (Tabela 3).

No uso CC, pode-se verificar que a RAS é menor em profundidade, com exceção da última camada, quando comparada com o uso MN, indicando uma redução nos teores do íon Na⁺ na solução do solo (Tabela 3). Essa redução parece estar mais ligada à lixiviação do íon Na⁺ do solo e à preferência pelo Ca⁺² no complexo de troca dos solos deste uso (Tabela 2). O maior coeficiente de variação deste atributo foi observado no uso CC (125,76%).

Os valores médios da razão de adsorção de potássio (RAK), assim como os de RAS, diminuíram em profundidade, em todos os usos, e foram superiores nos usos LPV, em maior proporção, e CPV. Esse comportamento reflete a concentração de K⁺ na solução do solo, em função de cada uso e da profundidade (Tabela 3). Todos os valores médios da RAK no uso LPV foram superiores a 1,0 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5} a partir da segunda profundidade, chegando a 2,65 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5} na primeira, e com valor máximo de 8,02 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5}.

4.1.6 Fósforo disponível, carbono orgânico total e estoque de carbono do solo

Observou-se que os solos sob manejo com vinhaça apresentaram maior concentração de fósforo disponível (P) no solo em todas as profundidades, sendo o uso LPV o mais importante neste processo (Tabela 8). De modo geral, houve um decréscimo do P em profundidade em todos os usos.

Tabela 8: Valores de fósforo disponível, carbono orgânico total e estoque de carbono orgânico dos solos em função de cada uso sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Profundidade (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
P (mg kg ⁻¹)	0 – 20	3,53	6,72	0,51	1,53	43,29	23,50	172,09	0,59	38,20	162,52	23,45	135,33	2,73	29,14	124,24	82,73	489,64	2,08	132,19	159,78
	20 – 40	0,95	3,58	0,00	0,83	86,72	6,43	36,35	0,37	9,48	147,58	3,23	17,73	0,21	3,99	123,58	17,37	84,36	0,27	23,52	135,42
	40 – 60	0,62	1,87	0,00	0,54	87,05	1,78	8,94	0,16	2,13	119,37	2,11	9,74	0,09	2,46	116,60	8,01	67,93	0,07	15,02	187,44
	60 – 80	0,32	1,16	0,00	0,33	105,93	1,41	5,59	0,00	1,56	110,31	2,90	24,01	0,09	5,42	186,98	6,96	87,15	0,09	18,77	269,76
	80 – 100	0,27	1,23	0,00	0,32	118,07	1,36	6,09	0,01	1,88	137,91	2,20	19,43	0,00	4,52	206,01	5,87	79,90	0,00	18,58	316,34
COT (dag kg ⁻¹)	0 – 20	2,15	3,17	0,58	0,78	36,04	1,48	2,83	0,85	0,48	32,22	1,16	1,74	0,32	0,30	25,94	1,22	1,70	0,61	0,37	30,60
	20 – 40	1,19	2,54	0,39	0,56	47,56	1,04	2,62	0,33	0,51	49,37	0,91	1,37	0,54	0,18	20,28	0,87	1,73	0,42	0,33	38,06
	40 – 60	0,90	1,91	0,15	0,49	54,61	0,79	1,37	0,29	0,25	31,48	0,87	3,01	0,45	0,54	61,81	0,66	1,22	0,08	0,26	39,71
	60 – 80	0,70	1,52	0,08	0,37	52,38	0,63	0,90	0,22	0,21	33,93	0,79	4,16	0,22	0,79	100,99	0,60	0,87	0,11	0,22	36,82
	80 – 100	0,63	1,59	0,12	0,32	50,90	0,58	0,89	0,07	0,19	32,52	0,57	1,63	0,22	0,30	53,04	0,59	0,97	0,04	0,21	36,13
ECO (Mg kg ⁻¹)	0 – 20	51,60	74,04	16,79	0,17	33,50	40,84	63,49	26,24	0,10	25,50	35,35	49,21	9,97	0,09	24,24	36,31	50,71	18,90	0,10	27,40
	20 – 40	30,88	59,35	10,00	0,13	43,41	29,47	71,62	10,46	0,13	44,70	27,57	37,84	16,77	0,05	17,64	26,79	53,43	12,43	0,10	36,06
	40 – 60	23,25	51,62	4,04	0,12	53,13	21,96	38,38	9,27	0,07	30,73	26,68	97,16	11,27	0,18	66,56	19,97	41,10	2,50	0,08	39,99

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; H+AL – Acidez Potencial; P – Fósforo disponível; COT – Carbono Orgânico Total; ECO – Estoque de Carbono Orgânico.

A grande maioria dos solos que compõem a zona canavieira do Estado de Pernambuco são solos em avançado estado de evolução, predominantemente argilosos, ácidos e pobres quimicamente, inclusive com baixa disponibilidade de fósforo. Os valores médios de P verificados no uso MN refletem a baixa disponibilidade desse elemento nos solos da Zona da Mata. Novais & Smyth (1999), relatam a problemática do fósforo em solos tropicais, aplicando o conceito de dreno ao aumento de cargas positivas em solos mais intemperizados e argilosos.

A distribuição do P em profundidade, observada em todos os usos, pode estar relacionada com o aumento do teor de argila (Tabela 9) e da acidez (Tabela 4), aliada à redução do carbono orgânico total (Tabela 8) em profundidade.

Observa-se que no solo sob o uso CC o P concentra-se nas duas primeiras camadas, com seus valores mantendo-se em todas as camadas superiores em relação ao uso MN. Esse aumento de P no uso CC é oriundo das adubações fosfatadas, prática comum no cultivo da cana-de-açúcar que visa suprir as necessidades da cultura em razão da baixa disponibilidade do elemento nas áreas de cultivo, da exportação por parte da colheita da cana e da adsorção específica. Corrêa et al. (2001), avaliando as alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, causadas pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar por aproximadamente 30 anos, observaram, nas duas primeiras camadas (0-20 e 20-40 cm), aumento significativo de P em relação à área de mata. Maia & Ribeiro (2004), estudando as modificações nas propriedades químicas de um Argissolo Amarelo fragipânico, pelo cultivo contínuo com cana-de-açúcar, verificaram aumento significativo no teor de P com o tempo de cultivo e com a profundidade em função da adubação fosfatada

Com relação às áreas sob aplicação de vinhaça, no uso CPV houve um aumento de P nas três últimas camadas quando comparado como o uso CC. O uso LPV foi o que mais contribuiu para o aumento de P no solo. O incremento de P no solo por meio da fertirrigação com vinhaça também foi observado por Busato et al. (2005), ao avaliar um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo, constatando na área com aplicação de vinhaça, na camada de 0 - 20 cm, aumentos da ordem de 210 e 267 % no compartimento P no solo. Barros et al. (2010), avaliando duas áreas cultivadas com cana-de-açúcar por

um período de 10 anos, observaram que a área sob uso de vinhaça proporcionou aumento significativo do P do solo, em todas as camadas estudadas (0-15, 15-30 e 30-45 cm).

Ribeiro et al. (2011), em estudo sobre o efeito da vinhaça na adsorção de P em amostras da fração argila de dois solos de mineralogia contrastante, concluíram que o tratamento da fração argila com vinhaça reduziu a adsorção de P, possivelmente devido ao bloqueio dos sítios de adsorção de P pelos compostos orgânicos da vinhaça e, também, pelo aumento da carga líquida negativa da fração argila. Estes mesmos autores relatam que em solos com predominância de óxidos de ferro e de alumínio, como os Latossolos, que abrange grande parte do território nacional, a aplicação de vinhaça como fertilizante pode contribuir para o aumento da disponibilidade de P para as plantas. O maior coeficiente de variação deste atributo químico do solo foi constatado no uso LPV (316,34%).

Como era esperado, o teor de carbono orgânico total (COT) variou entre os usos e, em geral, decresceu com a profundidade (Tabela 8). Diferentemente do que ocorre em solos de regiões de clima temperado, a matéria orgânica em solos sob condições tropicais é rapidamente decomposta, o que dificulta seu acúmulo no solo. Mesmo no uso MN, o teor médio de COT não ultrapassou o valor de 2,15 dag kg⁻¹, mas, mesmo assim, este uso possui o maior valor de COT, com exceção da profundidade 60-80, em relação aos demais usos.

Observou-se que o uso CC e aqueles sob aplicação de vinhaça, CPV e LPV, reduziram o COT do solo sendo esta diferença mais acentuada na primeira camada (Tabela 8). Este comportamento também foi observada por Maia & Ribeiro (2004) ao estudarem perfis de Argissolos Amarelos sob cultivo de cana-de-açúcar e mata nativa.

Silva et al. (2006a) não verificaram incremento significativo de COT com vinhaça em relação à mata, mas nas duas primeiras camadas observaram diferença significativa de COT no manejo com vinhaça em relação aos outros. Vasconcelos et al. (2010) não notaram diferenças significativas nas duas últimas camadas entre os manejos, porém na primeira camada houve aumento significativo no teor de COT nas duas áreas sob vinhaça em relação à irrigada. No entanto, estes mesmos autores observaram que a área de mata apresentou os maiores teores de COT. Comentam, também, sobre a dificuldade na manutenção de níveis elevados de carbono nos solos cultivados de regiões

tropicais, devido às elevadas temperaturas, umidade e revolvimento do solo, que estimulam a maior decomposição da matéria orgânica, pela atividade microbiana. Canellas et al. (2003) também enfatizam a dificuldade de aumentar os teores de matéria orgânica no solo. O COT teve maior variação no uso CPV (100,99%)

A quantificação do estoque de carbono orgânico no solo (ECO) foi limitada até a camada de 40-60 cm, por esse atributo ser dependente da densidade do solo que, por sua vez, teve uma coleta limitada às três primeiras camadas avaliadas.

As maiores diferenças médias entre os usos foram observadas na primeira camada, sendo os maiores valores médios atribuídos ao uso MN, refletindo os valores de COT. Ao comparar diferentes sistemas de uso e manejo nos teores de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho, Viana et al. (2011) observaram que nas áreas sob manejo de cana-de-açúcar ocorreu a maior redução do ECO na profundidade 0-10 cm. Esses autores atribuem essa redução ao preparo intensivo do solo e à exposição da matéria orgânica aos fatores degradantes favorecendo sua mineralização. Além disso, as áreas sob cultivo de cana-de-açúcar sofrem queimadas que, por sua vez, reduzem ainda mais o COT.

4.2 Análises de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo

4.2.1 Análises de componentes principais e de agrupamento dos atributos químicos do solo na camada 0-20 cm.

Na análise de componentes principais (ACP) com os atributos químicos do solo da camada de 0-20 cm, etapa esta considerada exploratória, foram extraídos três componentes principais que, somados explicaram 72,1% da variação total dos dados (Tabela 9). O componente principal 1 (CP1) explicou 30% da variação total e é o mais importante na explicação da variabilidade total, pois capta o máximo possível da variabilidade no conjunto de dados, como pode ser observado pelo maior peso que lhe é atribuído, autovalores, e pela variância (%) explicada. O CP2, segundo mais importante, explicou 24% da variação total e o CP3 explicou 18,1%.

Utilizando o critério de seleção das variáveis dentro dos CPs, anteriormente comentado, foram selecionadas aquelas variáveis que apresentaram, com seus respectivos CPs, valores de correlação superiores a 0,7 em módulo. As variáveis selecionadas possuem grande importância no CP, uma vez que seus autovalores ou pesos expressam os maiores valores de correlação com o mesmo, e são consideradas as mais discriminantes na distinção dos usos do solo.

Tabela 9: Correlação entre cada componente principal e os atributos químicos dos solos da camada de 0-20 cm sob os diferentes usos avaliados

Variáveis	Componente		
	CP1	CP2	CP3
pH do solo	0,398	<u>0,714</u>	-0,389
Acidez trocável (Al^{+3})	-0,142	<u>-0,709</u>	0,536
Acidez potencial ($H^+ + Al^{+3}$)	-0,228	-0,554	<u>0,707</u>
Cálcio trocável (Ca^{+2})	-0,033	<u>0,880</u>	0,071
Magnésio trocável (Mg^{+2})	0,367	<u>0,729</u>	0,328
Sódio trocável (Na^+)	<u>0,875</u>	0,244	0,095
Potássio trocável (K^+)	<u>0,881</u>	0,318	-0,044
Fósforo disponível (P)	0,022	0,612	0,057
Capacidade de troca cátions potencial (T)	-0,002	0,167	<u>0,847</u>
Soma de bases (SB)	0,283	<u>0,896</u>	0,131
Saturação por bases (V)	0,307	<u>0,776</u>	-0,445
Saturação por alumínio (m)	-0,154	<u>-0,756</u>	0,393
Percentagem de sódio trocável (PST)	<u>0,762</u>	0,144	-0,320
Percentagem de potássio trocável (PKT)	<u>0,836</u>	0,239	-0,273
Carbono orgânico total (COT)	-0,149	-0,091	<u>0,919</u>
Estoque de carbono orgânico (ECO)	-0,168	0,010	<u>0,887</u>
Condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es})	<u>0,746</u>	0,209	-0,068
pH do extrato de saturação (pH_{es})	0,272	0,571	-0,569
Cálcio solúvel (Ca^{+2})	-0,027	0,257	0,010
Magnésio solúvel (Mg^{+2})	0,102	0,169	0,073
Potássio solúvel (K^+)	<u>0,884</u>	0,142	-0,162
Sódio solúvel (Na^+)	<u>0,896</u>	0,071	-0,061
Relação de adsorção de sódio (RAS)	<u>0,867</u>	-0,018	-0,082
Relação de adsorção de potássio (RAK)	<u>0,885</u>	0,127	-0,158
Autovalores	7,198	5,756	4,355
% variância explicada	30,00	24,00	18,10
% variância acumulada	30,00	54,00	72,10

A Figura 1 representa a distribuição das variáveis em função dos três CPs que, juntos, explicam 72,1% da variação total. A correlação negativa ou positiva das variáveis com seus respectivos CPs, depende de sua posição em relação à

origem de cada CP (0,0), se estiver à direita ou acima a correlação será positiva, à esquerda ou abaixo será negativa, e quanto mais próxima da origem estiver a variável, menor será a importância na discriminação dos usos, sendo assim, as variáveis mais importantes são aquelas que estão localizadas nas extremidades do gráfico. A importância de uma determinada variável num CP implicará em sua perda de importância dentro de outra CP, ou seja, uma mesma variável não poderá ter a mesma importância em dois CPs distintos.

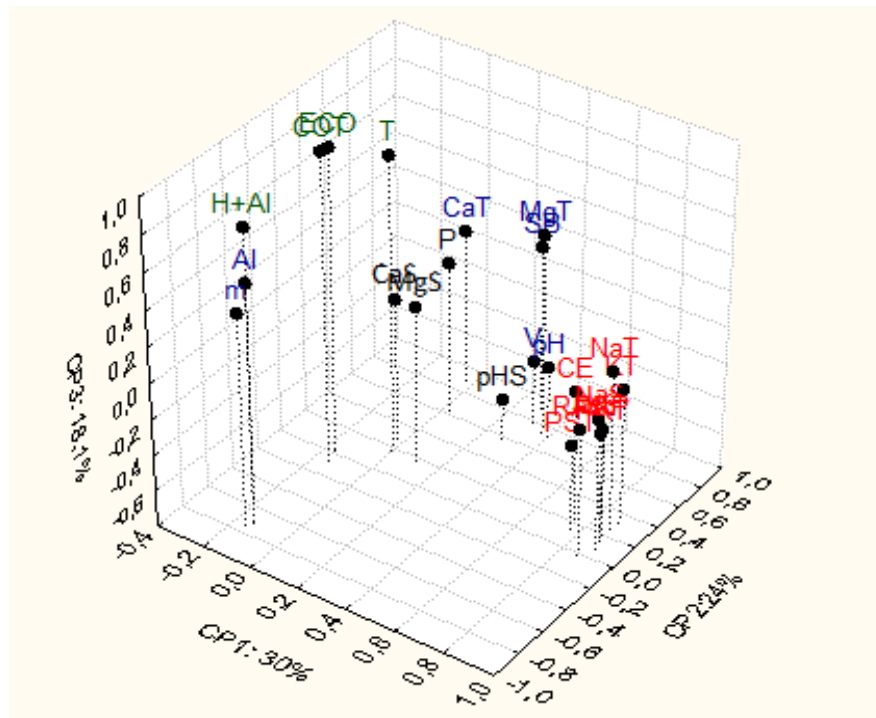


Figura 1: Distribuição das variáveis em função dos CPs. As variáveis em vermelho estão correlacionadas com o CP1; as azuis com o CP2; as verdes com o CP3; e as pretas foram excluídas por terem coeficiente inferior a 0,7 com os componentes.

No CP1 foram retidas nove variáveis, aqui definidas em ordem de importância: Na⁺ solúvel, RAK, K⁺ solúvel, K⁺ trocável, Na⁺ trocável, RAS, PKT, PST e CE_{es}. O CP1 pode ser entendido como uma variável que representa o aumento da concentração eletrolítica do solo, pois as variáveis que a compõem inferem essa observação, principalmente, com os íons sódio e potássio. Analisando estas variáveis que compõem o CP1, pode-se observar que os valores médios de K⁺ e Na⁺ trocáveis (Tabela 2), K⁺ e Na⁺ solúveis (Tabela 3), CE (Tabela 6), RAS, RAK, PST e PKT (Tabela 7) são maiores no uso LPV, seguido do CPV na primeira camada e, portanto, são diretamente influenciados

pela fertirrigação com vinhaça por períodos longos quando comparado com os demais usos. Portanto, o CP1 é importante na discriminação entre os usos.

O aumento da concentração do K^+ no solo pela adição de vinhaça já é conhecido, uma vez que, dentre as substâncias inorgânicas que constituem esse resíduo, o K^+ é o principal íon (ORLANDO FILHO et al. 1983). O Na^+ , no entanto, tem recebido pouca atenção por parte dos pesquisadores, por não ser um elemento essencial para as plantas e encontra-se em baixa concentração na vinhaça, em torno de 52 mg L^{-1} , segundo Elia Neto & Nakhodo (1995).

Este elemento também é facilmente lixiviado, o que foi verificado por Brito et al. (2009) que, ao avaliarem a concentração deste elemento no lixiviado de três tipos de solos diferentes (Argissolo, Espodossolo e Nitossolo) sob uso de vinhaça, constataram aumento do teor Na^+ no lixiviado em relação ao K^+ . No entanto, assim como verificado neste trabalho, Barros et al. (2010) também verificaram aumento no teor de Na^+ na fase trocável na área sob uso de vinhaça. Por fim, a PST, RAS, PKT e RAK, variáveis importantes na CP1, são derivadas da predominância destes dois íons no solo. Lyra et al. (2003) e Bebé et al. (2009), observaram aumento da CE na camada superficial do solo, atribuindo esse comportamento à fertirrigação com vinhaça.

O CP2 foi formado por sete variáveis apresentadas na seguinte ordem de importância: SB, Ca^{2+} trocável, V%, m%, Mg^{2+} trocável, pH do solo e Al^{3+} trocável. As variáveis que formam o CP2 estão associadas à fertilidade do solo, o que confere esta característica ao próprio CP2. Os valores médios das variáveis Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis (Tabela 2), pH do solo (Tabela 4), SB e V% (Tabela 5) no uso LPV são superiores aos demais usos, enquanto que os valores médios de Al^{+3} trocável (Tabela 4) e m% (Tabela 5) são menores neste mesmo uso em relação aos demais. A fertirrigação com vinhaça por longo período tem reduzido o Al^{+3} trocável, assim como, a m% e, ao mesmo tempo, promovido incremento de Ca^{+2} e Mg^{+2} ao solo, mantendo o pH do solo próximo ao ideal para a maioria das culturas. Vasconcelos et al. (2010) também observaram aumento de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis, V% e pH do solo, com redução do Al^{+3} trocável, na camada de 0-20 cm nos usos sob vinhaça e vinhaça+torta de filtro em relação aos usos irrigados e de mata nativa, corroborando com os mesmos resultados aqui apresentados.

Quatro variáveis compõem o CP3, a saber: COT, ECO, T e acidez potencial, dispostas em ordem de importância. O CP3 pode ser tido como uma

variável que reflete a matéria orgânica e o aumento de cargas negativas do solo. Os valores médios de acidez potencial (Tabela 3), T (Tabela 5), COT e ECO (Tabela 8) foram inferiores nos usos fertirrigados com vinhaça em relação aos demais usos. A redução da acidez potencial nos usos CPV e LPV é um efeito positivo promovido pela adição de vinhaça ao solo, por minimizar os problemas causados pelo excesso de cátions ácidos no solo ao promover o aumento de cátions com caráter básico.

Mas a redução da T, nestes usos sob manejo com vinhaça, possui relação direta com a também redução do COT e, conseqüentemente, do ECO, já que o valor deste é derivado do valor do COT. Diferentemente do que é relatado na maioria dos trabalhos que tratam da utilização da vinhaça em áreas de cultivo, neste trabalho houve redução do COT em relação aos demais usos. Silva et al. (2006a) verificaram, assim como neste trabalho, redução do COT das áreas sob cultivo de cana-de-açúcar em relação à área de mata, porém relatou que este efeito foi menos pronunciado nas áreas sob uso de vinhaça. No entanto, estes mesmos autores comentam sobre a dificuldade na manutenção de níveis elevados de carbono nos solos cultivados de regiões tropicais, atribuindo este problema às elevadas temperaturas, umidade e revolvimento do solo, que, por sua vez, estimulam a maior decomposição da matéria orgânica, pela microbiota do solo.

Com a redução do COT, os valores de T também diminuíram nos usos cultivados, principalmente naqueles sob manejo com vinhaça, porém, vale salientar que a T neste trabalho foi estimada e os valores da acidez potencial também contribuíram para o aumento destas diferenças (Tabela 3), o que também foi observado por Vasconcelos et al. (2010).

A Figura 2 representa um dendrograma com os grupos formados a partir das variáveis consideradas discriminantes para os usos estudados, selecionadas dentro de cada CP, caracterizando a etapa conclusiva. Observa-se a formação de três grupos distintos entre si isolados nos elipsóides. Dois grupos foram formados por dois usos, o LPV e o MN, individualmente e um grupo foi formado da junção de dois usos, CPV e CC. Todos os usos sob cultivo de cana-de-açúcar, com ou sem a aplicação de vinhaça nesta primeira camada.

Os usos LPV e MN são os mais distintos e, portanto, são considerados os extremos em termos de concentração de eletrólitos no solo (CP1),

principalmente em Na^+ e K^+ , fertilidade do solo (CP2), matéria orgânica e cargas negativas no solo (CP3). O uso LPV revela que a fertirrigação com vinhaça por muitos anos, 15 a 20 anos, promove mudanças significativas nos atributos químicos do solo, uma vez que este uso é caracterizado no dendograma como o mais distinto entre todos os usos estudados. Já os usos CPV e CC, que compõem um único grupo são intermediários quanto às variáveis anteriormente citadas, o que indica que as áreas de cana-de-açúcar fertirrigadas com vinhaça num curto período de tempo, de três a cinco anos, não diferem daquelas que estão sob o cultivo convencional, pois o pouco tempo de aplicação da vinhaça parece ainda não ter sido suficiente para promover alterações mais significativas nas propriedades dos solos.

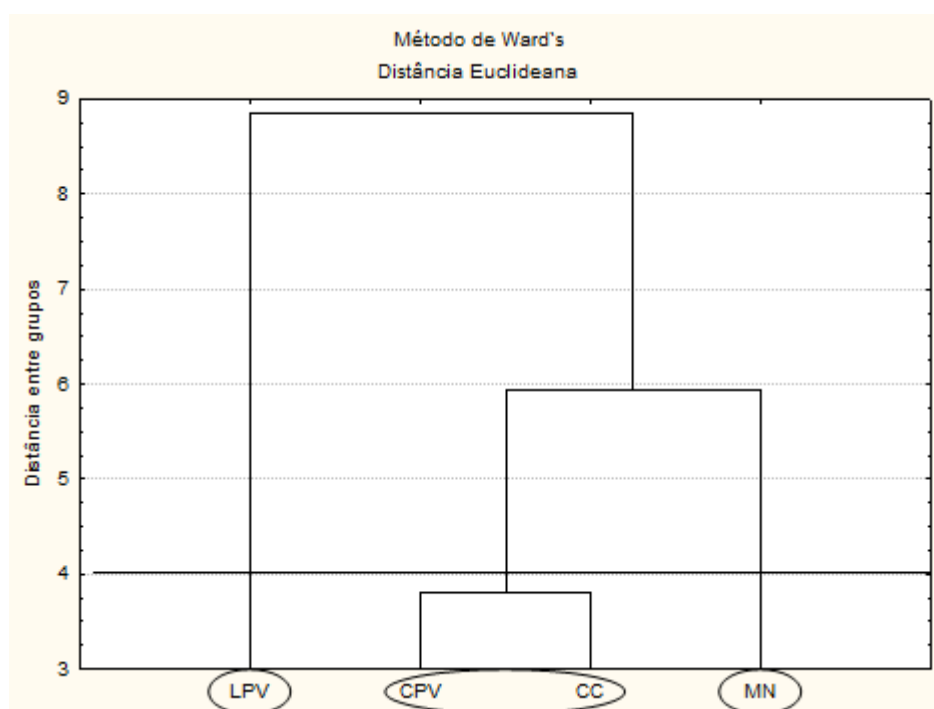


Figura 2: Dendograma resultante da análise de agrupamento dos atributos químicos dos solos na camada de 0-20 cm sob os diferentes usos avaliados (MN: Mata nativa; CC: Cultivo convencional de cana-de-açúcar; CPV: Cultivo com vinhaça por curto período, três a cinco anos; e LPV: cultivo com vinhaça por longo período, 15 a 20 anos) utilizando a distância euclidiana média como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

É possível visualizar a gradação nas modificações dos solos na sequência: MN – CC – CPV – LPV, ou seja, na amplitude se solos estudados da Zona da Mata de Pernambuco ocorreram modificações nas propriedades químicas dos solos que promoveram diferenças entre os quatro usos, que são

distintos entre si pelo grupo de atributos avaliados. Desta forma, é preciso um monitoramento frequente dessas propriedades para evitar que ocorram problemas mais sérios nos solos por meio do uso indiscriminado da fertirrigação com vinhaça.

4.2.2 Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo na camada 20-40 cm.

Para esta camada foram extraídos três componentes principais, através da ACP que, juntos, explicaram 70,19% da variação total dos dados (Tabela 10).

Tabela 10: Correlação entre cada componente principal e os atributos químicos do solo na camada de 20-40 cm sob os usos avaliados com e sem vinhaça

Variáveis	Componentes		
	CP1	CP2	CP3
pH do solo	0,423	<u>0,779</u>	-0,166
Acidez trocável (Al^{+3})	-0,210	-0,663	0,507
Acidez potencial ($H^{+}+Al^{+3}$)	-0,208	-0,416	<u>0,787</u>
Cálcio trocável (Ca^{+2})	0,172	<u>0,903</u>	0,182
Magnésio trocável (Mg^{+2})	0,390	<u>0,734</u>	0,173
Sódio trocável (Na^{+})	<u>0,901</u>	0,243	0,038
Potássio trocável (K^{+})	<u>0,860</u>	0,386	-0,026
Fósforo disponível (P)	0,079	0,685	0,080
Capacidade de troca cátions potencial (T)	0,072	0,162	<u>0,900</u>
Soma de bases (SB)	0,414	<u>0,853</u>	0,160
Saturação por bases (V)	0,396	<u>0,794</u>	-0,249
Saturação por alumínio (m)	-0,273	<u>-0,760</u>	0,227
Porcentagem de sódio trocável (PST)	<u>0,801</u>	0,072	-0,307
Porcentagem de potássio trocável (PKT)	<u>0,843</u>	0,273	-0,201
Carbono orgânico total (COT)	-0,116	-0,065	<u>0,909</u>
Estoque de carbono orgânico (ECO)	-0,057	0,038	<u>0,878</u>
Condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es})	0,562	0,408	0,093
pH do extrato de saturação (pH_{es})	0,200	0,544	-0,206
Cálcio solúvel (Ca^{+2})	-0,091	0,042	0,283
Magnésio solúvel (Mg^{+2})	0,176	0,259	0,224
Potássio solúvel (K^{+})	<u>0,838</u>	0,245	-0,022
Sódio solúvel (Na^{+})	<u>0,774</u>	0,254	0,001
Relação de adsorção de Na^{+} (RAS)	<u>0,750</u>	0,246	-0,057
Relação de adsorção de K^{+} (RAK)	<u>0,807</u>	0,243	-0,005
Autovalores	6,694	6,075	3,838
% variância explicada	28,89	25,31	15,99
% variância acumulada	28,89	54,20	70,19

O CP1 explicou 28,89% da variação total, sendo este o mais importante por explicar a maior parte da variação dos dados, assim como as variáveis que o compõem. O CP2, segundo mais importante, explicou 25,31% da variação total e o CP3 explicou 15,99%. Somente foram retidas, dentro dos CPs, as variáveis que apresentaram correlação com os mesmos superior a 0,7 em módulo. Tais variáveis foram consideradas importantes na discriminação dos usos estudados e, dentre as CPs, apenas a CP2 apresenta correlação negativa com a variável m%.

A disposição das variáveis em relação a seus respectivos CPs pode ser visualizada na Figura 3. A variável m% da CP2, por correlacionar-se com o mesmo negativamente, encontra-se abaixo da origem do eixo do CP2.

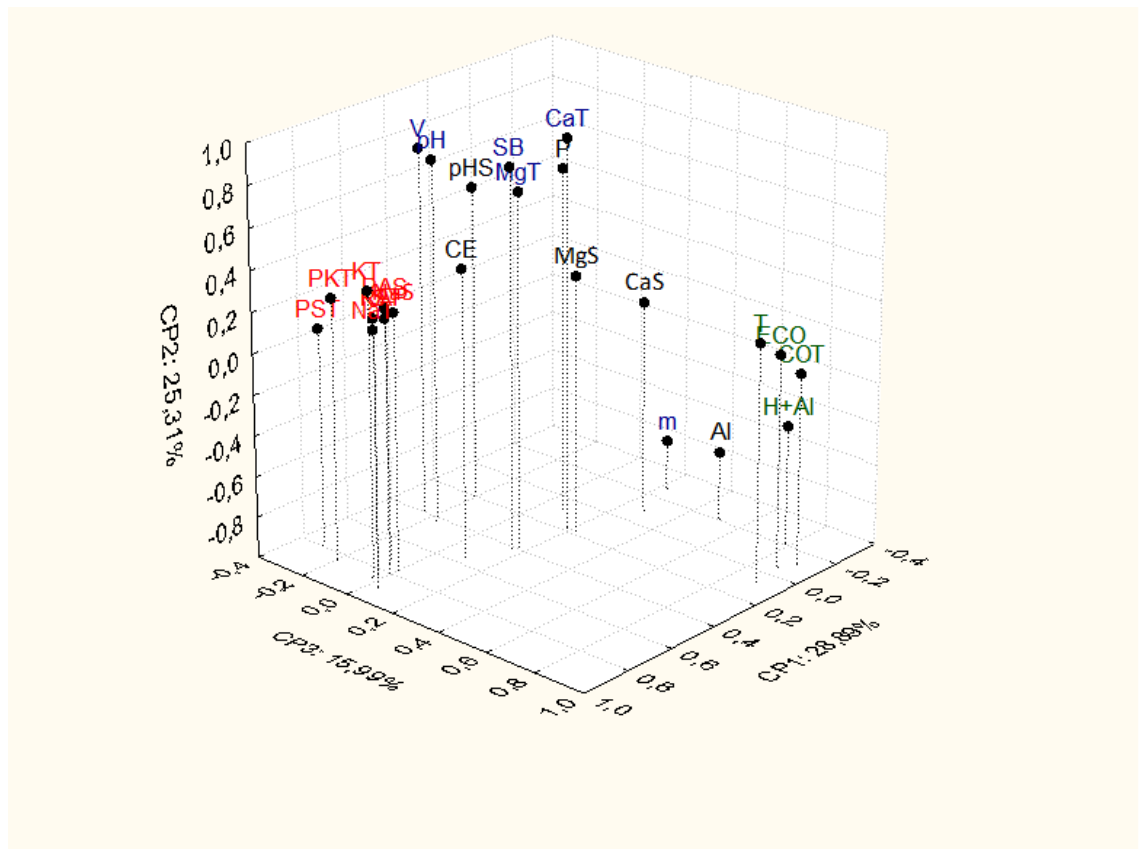


Figura 3: Distribuição das variáveis em função dos componentes principais (CP) dos solos na camada de 20-40 cm. As variáveis em vermelho estão correlacionadas com o CP1; as azuis com o CP2; as verdes com o CP3; e as pretas são as excluídas por terem coeficiente inferior a 0,7 com os componentes.

No CP1 houve alta correlação com oito variáveis, sendo colocadas na seguinte ordem de importância: Na^+ trocável, K^+ trocável, PKT, K^+ solúvel, RAK, PST, Na^+ solúvel e RAS. Assim como no CP1 da primeira camada (0-20

cm), o CP1 desta camada também pode ser interpretado como uma variável que representa a concentração eletrolítica do solo com os íons sódio e potássio. Os valores médios de K^+ e Na^+ trocáveis (Tabela 2), K^+ e Na^+ solúveis (Tabela 3), RAS, RAK, PST e PKT (Tabela 7) tem se mantido maiores no uso LPV, seguido do CPV, nesta segunda camada. Ou seja, a fertirrigação com vinhaça tem promovido o incremento destes íons tanto na fase trocável quanto na fase solúvel, quando comparados com os demais usos, fazendo com que ocorra um aumento da relação de adsorção e da percentagem de saturação destes dois íons no solo.

Barros et al. (2010) também observaram aumento nos teores de Na^+ e de K^+ trocável na área sob uso de vinhaça nas camadas de 15-30 e 30-45 cm, em relação à área que não foi fertirrigada com vinhaça. Semelhantemente, Bébé et al. (2009) observaram aumento no teor de Na^+ e K^+ trocáveis nas áreas sob diferentes períodos de aplicação vinhaça em todas as camadas estudadas (0-40 cm). No entanto, Vasconcelos et al. (2010) não constataram diferenças na PST das áreas sob uso de vinhaça em relação às demais para a mesma camada aqui estudada (20-40 cm). O aumento na concentração destes íons no solo reflete na RAS, na RAK, na PST e na PKT, por serem variáveis proporcionais derivadas das anteriores.

O CP2 foi constituído pelas seguintes variáveis dispostas em ordem de importância: Ca^{+2} trocável, SB, V%, pH do solo, m% e Mg^{+2} trocável. O CP2 possui o mesmo sentido de fertilidade do CP2 da camada superficial (0-20 cm). Ao se observar os valores destas variáveis em relação a cada uso, verifica-se que o uso LPV tem incrementado ao solo Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis (Tabela 2), aumentando o pH do solo (Tabela 4) e reduzido a m% (Tabela 4) e, aumentado também a SB e a V% (Tabela 5). Ou seja, a fertirrigação com vinhaça ao longo dos anos também promoveu modificações nesta camada, melhorando sua fertilidade.

O aumento dos cátions básicos do solo pela adição de vinhaça contribui diretamente para o aumento da SB e V% como foi verificado por Barros et al. (2010) de forma significativa em relação à área sem uso de vinhaça. No entanto, Vasconcelos et al. (2010) não observaram diferenças estatísticas nos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis entre os sistemas de manejo com vinhaça e os demais sob cultivo de cana-de-açúcar, embora os valores destes elementos fossem maiores nos sistemas sob uso de vinhaça. Com relação ao pH do solo,

estes mesmos autores não verificaram diferenças entre todos os sistemas de uso do solo, mas observaram o mesmo comportamento em relação aos íons Ca^{+2} e Mg^{+2} .

O CP3, formado pelas variáveis COT, T, ECO e acidez potencial, dispostas em ordem de importância, remete à matéria orgânica e ao aumento de cargas negativas do solo. Os valores médios de acidez potencial (Tabela 3), T (Tabela 5), COT e ECO (Tabela 8) apresentam-se abaixo nos usos LPV e CPV em relação aos demais usos. A redução da acidez potencial nesta camada, nos usos CPV e LPV indica que a fertirrigação com vinhaça continua atenuando os efeitos negativos dos cátions ácidos e contribuindo para o enriquecimento de cátions básicos, o que pode favorecer o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em subsuperfície.

Medina et al. (2002), avaliando a influência de doses de vinhaça no crescimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho, observaram que a dose de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça resultou em maior enraizamento na camada de 0,25 a 0,50 m de profundidade. Silva et al. (2006) observaram que na área sob uso de vinhaça houve maior concentração de raízes, nesta mesma camada, que nos outros sistemas de uso e manejo estudados, atribuindo esta diferença à melhor condição química promovida pela aplicação da vinhaça.

Embora as diferenças entre os teores de COT nos usos sejam relativamente pequenas, com diferença máxima de $0,32 \text{ dag kg}^{-1}$ de solo, elas tornam-se discrepantes quando analisa-se o ECO, chegando a $4,09 \text{ Mg ha}^{-1}$ nesta camada (Tabela 8). Brito et al. (2009), estudando o comportamento de diferentes classes de solos que receberam aplicação de vinhaça, não observaram diferenças entre os tratamentos. Essa redução do COT afeta negativamente a T do solo, principalmente, pelas características naturais dos solos da região canavieira cuja fração argila é formada, predominantemente, por caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Na figura 4, observa-se o dendograma com os grupos formados a partir da análise de agrupamento (AA) utilizando as variáveis que foram selecionadas dentro das CPs e, portanto, as mais discriminantes entre os usos. Três grupos foram formados, sendo dois deles constituídos por um único uso cada e outro formado por dois diferentes usos. Nota-se que os usos LPV e CPV formam grupos isolados, sendo LPV considerado o grupo mais distinto entre todos os

outros, confirmando os resultados dos valores médios das variáveis selecionadas. O CPV constituiu o grupo intermediário e diferenciou-se do uso CC nesta profundidade, o que evidencia a influência da fertirrigação com vinhaça em profundidade em relação ao cultivo convencional da cana-de-açúcar. A prática da fertirrigação, mesmo em curto período de aplicação, tem proporcionado melhorias nos atributos químicos, apesar de redução do COT, ECO e da T, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo.

O grupo constituído pelos usos CC e MN expressa a similaridade que há entre estes dois usos, embora sejam usos completamente antagônicos. Esta semelhança entre esses dois usos, diferentemente da avaliação da camada anterior, reflete a limitação das práticas de correção do solo através do uso de fertilizantes nesta camada, principalmente, a calagem, conforme Sousa et al. (2007).

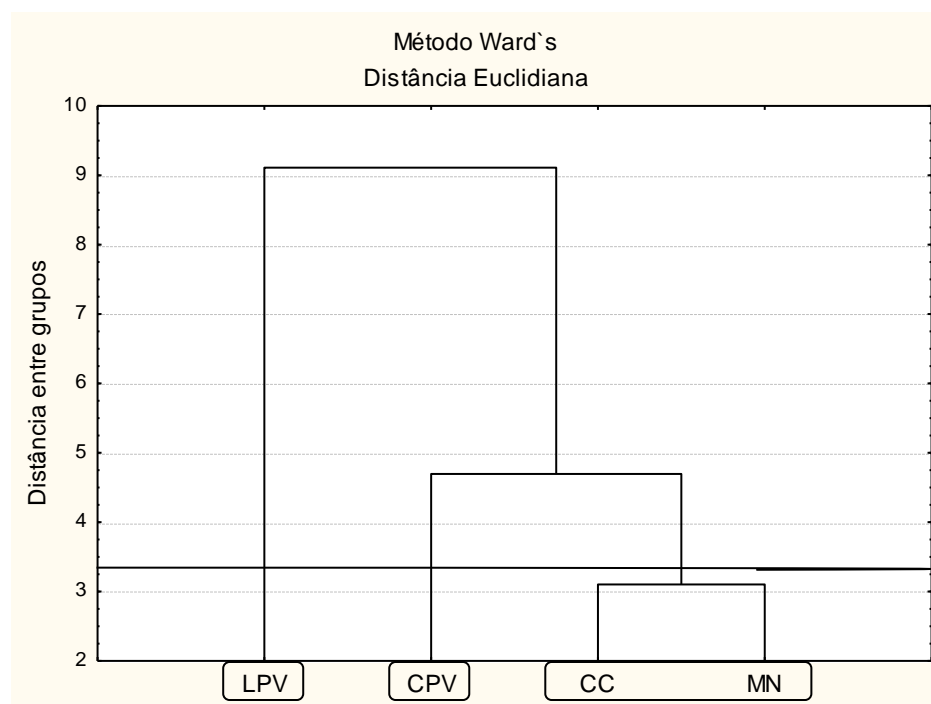


Figura 4: Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos atributos químicos dos solos na camada de 20-40 cm sob os diferentes usos avaliados (MN: Mata nativa; CC: Cultivo convencional de cana-de-açúcar; CPV: Cultivo com vinhaça por curto período, três a cinco anos; e LPV: cultivo com vinhaça por longo período, 15 a 20 anos) utilizando a distância euclidiana média como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

4.2.3 Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo na camada 40-60 cm.

Na ACP para esta camada foram extraídos três CPs que somados explicam 70,67% da variabilidade total dos dados (Tabela 11). O CP1 foi responsável por explicar 31,27% da variação total, o CP2 explicou 23,66% e o CP3 explicou 15,74%.

Tabela 11: Correlação entre cada componente principal e os atributos químicos dos solos na camada de 40-60 cm sob os usos avaliados e manejo com e sem vinhaça

Variáveis	Componentes		
	CP1	CP2	CP3
pH do solo	0,429	0,780	-0,148
Acidez trocável (Al^{+3})	-0,250	-0,617	0,449
Acidez potencial ($H^{+}+Al^{+3}$)	-0,145	-0,276	0,869
Cálcio trocável (Ca^{+2})	0,176	0,914	0,115
Magnésio trocável (Mg^{+2})	0,409	0,760	0,069
Sódio trocável (Na^{+})	0,829	0,308	-0,017
Potássio trocável (K^{+})	0,901	0,344	-0,061
Fósforo disponível (P)	0,092	0,665	0,067
Capacidade de troca cátions potencial (T)	0,054	0,096	0,916
Soma de bases (SB)	0,461	0,858	0,074
Saturação por bases (V)	0,402	0,782	-0,301
Saturação por alumínio (m)	-0,364	-0,779	0,170
Percentagem de sódio trocável (PST)	0,695	0,176	-0,330
Percentagem de potássio trocável (PKT)	0,851	0,309	-0,200
Carbono orgânico total (COT)	-0,118	0,030	0,904
Estoque de carbono orgânico (ECO)	-0,060	0,115	0,876
Condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es})	0,645	0,380	0,027
pH do extrato de saturação (pH_{es})	0,005	0,201	-0,246
Cálcio solúvel (Ca^{+2})	0,107	0,047	0,089
Magnésio solúvel (Mg^{+2})	0,688	0,296	0,013
Potássio solúvel (K^{+})	0,885	0,198	-0,022
Sódio solúvel (Na^{+})	0,830	0,208	-0,044
Relação de adsorção de sódio (RAS)	0,817	0,197	-0,037
Relação de adsorção de potássio (RAK)	0,870	0,212	-0,009
Autovalores	7,505	5,678	3,778
% variância explicada	31,27	23,66	15,74
% variância acumulada	31,27	54,93	70,67

A disposição das variáveis dentro das CPs está representada graficamente na Figura 5.

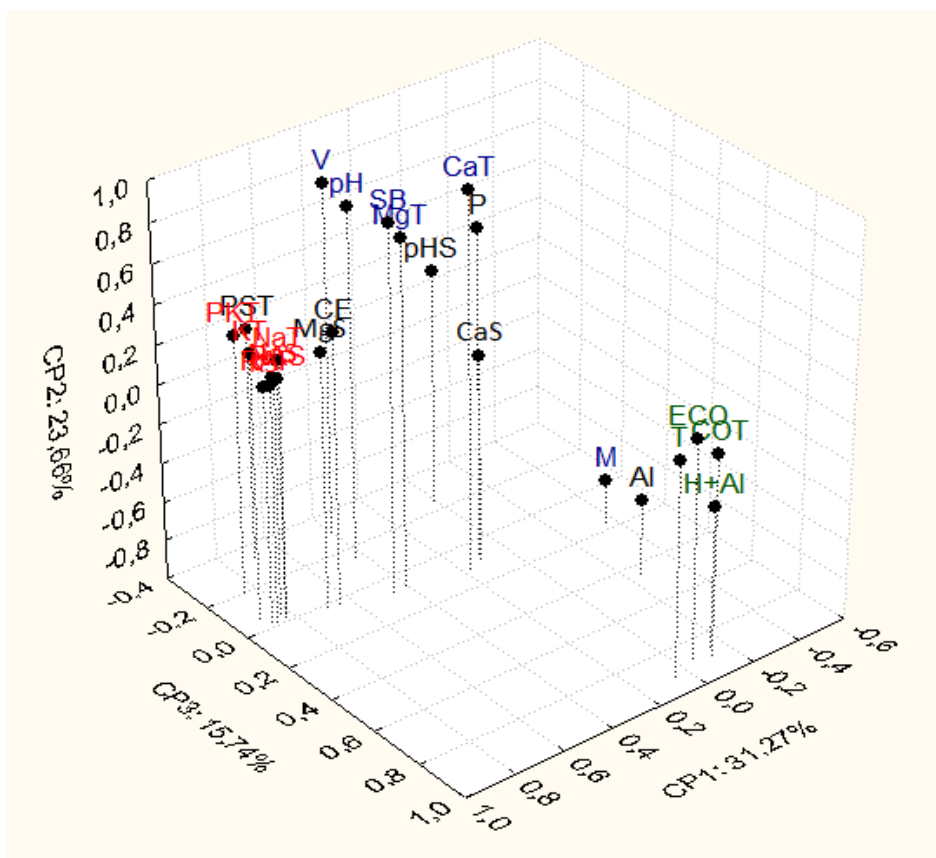


Figura 5: Distribuição das variáveis em função dos componentes principais (CP) da camada de 40-60 cm. As variáveis em vermelho estão correlacionadas com o CP1; as azuis com o CP2; as verdes com o CP3; e as pretas são as excluídas por terem coeficiente inferior a 0,7 com os componentes.

No CP1, as variáveis que apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,7 com o mesmo foram: K^+ trocável e solúvel, RAK, PKT, Na^+ solúvel e trocável, e RAS, definidos, assim, em ordem de importância. A CP1 continua como uma variável que representa a concentração destes dois íons no solo. Observa-se uma particularidade na CP1 desta camada em relação as CPs1 das camadas anteriores, que é a sequência de importância atribuída ao íon K^+ e demais variáveis dependentes de sua quantificação. Esse comportamento reflete a importância deste íon na discriminação dos usos estudados em profundidade. Os valores médios de K^+ e Na^+ trocáveis (Tabela 2), K^+ e Na^+ solúveis (Tabela 3), RAK, PKT e RAS (Tabela 7) foram sempre maiores no uso LPV em relação os demais usos em função da presença destes íons na composição química da vinhaça.

O aumento na concentração de K^+ trocável no solo, nesta mesma camada, em áreas sob uso de vinhaça também foi verificado por Vasconcelos et al. (2010). Porém, estes autores não observaram mudanças importantes na

saturação por sódio nos manejos avaliados, muito embora o sistema de uso com vinhaça apresentasse o maior valor médio de saturação por este íon. Brito et al. (2009) observaram aumento no teor de K^+ trocável no horizonte Bt1 de um Nitossolo após 60 dias da aplicação de vinhaça, mas também não verificaram nenhuma alteração no teor de Na^+ trocável.

O uso CC foi o que teve os menores valores médios destas variáveis que compõem a CP1 quando comparado com os demais usos (Tabelas 2, 3 e 7). Estes resultados corroboram com os de Maia & Ribeiro (2004), que verificaram redução destes íons no horizonte Bt1 de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar por curto e longo período em relação ao de mata nativa.

O CP2 apresentou como variáveis importantes na discriminação entre os usos as seguintes: Ca^{+2} trocável, SB, V%, pH do solo, m% e Mg^{+2} trocável, mantendo a mesma sequência da CP2 da camada anterior, e a mesma importância na representação da fertilidade do solo. Dentre os usos, o LPV, seguido do CPV nesta camada tiveram os maiores valores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis (Tabela 2), pH do solo (Tabela 4), SB e V% (Tabela 5), e os menores valores médios de m% (Tabela 4). Isso expressa a contribuição da adição de vinhaça ao solo para o aumento de sua fertilidade em profundidade. Para as variáveis Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis não foi encontrada diferença estatística entre os diferentes sistemas de uso estudados por Vasconcelos et al. (2010).

Porém, o uso CC teve o menor teor de Mg^{+2} trocável e SB, e maior pH do solo, entre os usos estudados nesta camada (Tabelas 2, 5 e 4). A redução no teor de Mg^{+2} trocável e SB também foi observada por Maia & Ribeiro (2004) no horizonte Bt1 de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar em relação ao de mata nativa.

O CP3 foi formado pelas mesmas variáveis da camada anterior e, portanto, possui a mesma representação como variáveis: T, COT, ECO e acidez potencial do solo, assim dispostas em ordem de importância, que definem a CP3 desta camada. O uso LPV apresentou os menores valores médios de acidez potencial (Tabela 3), COT e ECO (Tabela 8), ou seja, assim como nas camadas anteriormente avaliadas, a vinhaça não contribuiu para o incremento de COT e, portanto, nem para o ECO, mas tem reduzido a acidez potencial em profundidade. Porém, o uso CPV teve o maior valor médio de ECO, embora não apresentando o maior valor de COT, o que pode estar ligado à amostragem do solo em um horizonte de acumulação de matéria orgânica,

que contribuiu para os elevados valores máximos de COT e ECO observados neste uso (Tabela 8).

Vasconcelos et al. (2012), estudando a compactabilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros cultivados com cana-de-açúcar, avaliaram o teor de matéria orgânica dos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar e não observaram, com exceção da área de mata nativa, mudanças significativas no teor COT entre os estudados. Com relação à T, no presente estudo verificou-se o menor valor médio nos solos sob o uso CC, com uma pequena diferença quando comparado com os usos sob manejo de vinhaça por curto e longo período (Tabela 5), o que também foi observado por Vasconcelos et al. (2010).

A Figura 6 representa a etapa de confirmação dos resultados através da análise de agrupamento (AA). Pode-se observar a formação de três grupos distintos, dois grupos formados por um único uso cada e outro constituído por dois diferentes usos. O uso LPV continua sendo o mais diferente dentre os usos, conforme verificado pelos valores médios das variáveis discriminantes selecionadas pela ACP.

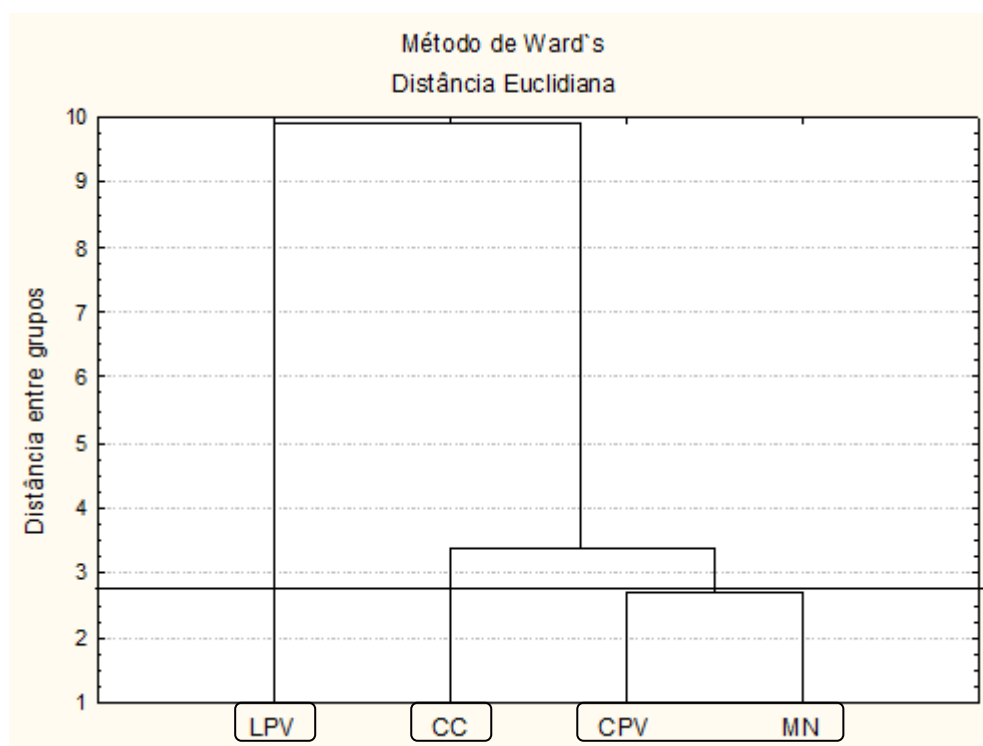


Figura 6: Dendrograma resultante da análise agrupamento dos atributos químicos da camada de 40-60 cm dos solos sob os usos avaliados (MN: Mata nativa; CC: Cultivo convencional de cana-de-açúcar; CPV: Cultivo com vinhaça por curto período, três a cinco anos; e LPV: cultivo com vinhaça por longo período, 15 a 20 anos) utilizando a distância euclidiana média como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

A união dos usos CPV e MN indica que esses dois usos não são quimicamente diferentes, ou seja, os atributos químicos que os constituem possuem valores semelhantes o suficiente para uni-los num único grupo. O fato do uso CPV igualar-se ao uso MN não indica que ele tornou-se o uso mais pobre quimicamente dentre os usos sob cultivo, pois o uso CC apresentou-se com menor fertilidade que o uso MN, ao observarmos os valores médios das variáveis selecionadas pela ACP. Ou seja, a fertilidade dos solos sob o uso MN nesta camada foi melhor que a do uso CC e igual ao do uso CPV, porém a fertilidade dos solos sob todos estes usos foi inferior aos do uso LPV em função da distribuição dos nutrientes no perfil promovida ao longo dos anos de fertirrigação com vinhaça.

4.2.4 Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo na camada 60-80 cm.

Através da aplicação da ACP foram extraídos três CPs que, juntos, explicaram 70,35% da variação total dos dados (Tabela 12)

O CP1, responsável por explicar 32,98% da variação total, não apresentou dentre as variáveis selecionadas nenhuma correlação negativa e foi formada por: K^+ solúvel e trocável, RAK, PKT, Na^+ solúvel e trocável, RAS e CE_{es} , variáveis organizadas em ordem de importância. Caracterizando este CP1 como uma variável relacionada à concentração eletrolítica do solo com os íons K^+ e Na^+ . Os teores de K^+ e Na^+ trocáveis (Tabela 2), K^+ e Na^+ solúveis (Tabela 3), CE (Tabela 6), RAS, RAK e PKT (Tabela 7) são superiores no uso LPV, seguido do CPV, em relação aos demais usos. Assim como na avaliação da camada anterior, a importância na discriminação dos usos conferida ao íon K^+ reflete claramente o efeito da fertirrigação com vinhaça.

Silva et al. (2006) observaram aumento no teor de K^+ e Na^+ trocáveis, na camada de 40-80 cm, no sistema sob uso de vinhaça, porém o aumento da PST só foi observado no manejo irrigado cuja água utilizada possuía elevada concentração de Na^+ ($1,76 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$). Estes mesmos autores não observaram mudanças na CE nesta mesma camada.

Tabela 12: Correlação entre cada componente principal e os atributos químicos dos solos na camada de 60-80 cm sob os usos avaliados com e sem vinhaça

Variáveis	Componentes		
	CP1	CP2	CP3
pH do solo	0,448	0,755	0,010
Acidez trocável (Al^{+3})	-0,252	-0,628	-0,348
Acidez potencial ($H^{+}+Al^{+3}$)	-0,116	-0,304	-0,917
Cálcio trocável (Ca^{+2})	0,152	0,900	-0,137
Magnésio trocável (Mg^{+2})	0,275	0,798	0,009
Sódio trocável (Na^{+})	0,806	0,334	0,032
Potássio trocável (K^{+})	0,902	0,289	0,022
Fósforo disponível (P)	-0,076	0,623	-0,184
Capacidade de troca cátions potencial (T)	0,096	0,113	-0,968
Soma de bases (SB)	0,439	0,863	-0,073
Saturação por bases (V)	0,389	0,800	0,279
Saturação por alumínio (m)	-0,358	-0,797	-0,135
Percentagem de sódio trocável (PST)	0,679	0,235	0,316
Percentagem de potássio trocável (PKT)	0,880	0,256	0,155
Carbono orgânico total (COT)	-0,142	0,025	-0,879
Condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es})	0,770	0,302	-0,002
pH do extrato (pH_{es})	0,082	0,274	0,064
Cálcio solúvel (Ca^{+2})	0,057	0,117	-0,025
Magnésio solúvel (Mg^{+2})	0,688	0,173	-0,032
Potássio solúvel (K^{+})	0,903	0,153	0,004
Sódio solúvel (Na^{+})	0,836	0,239	0,066
Relação de adsorção de sódio (RAS)	0,799	0,265	0,053
Relação de adsorção de potássio (RAK)	0,881	0,175	-0,022
Autovalores	7,585	5,632	2,965
% variância explicada	32,98	24,48	12,89
% variância acumulada	32,98	57,46	70,35

As variáveis que formaram o CP2 foram: Ca^{+2} trocável, SB, V%, Mg^{+2} trocável, m% e pH do solo, e estas inferem sobre a fertilidade do solo, por, geralmente, serem determinadas em análises de fertilidade. O uso LPV, seguido do CPV nesta camada teve os maiores valores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis (Tabela 2), pH do solo (Tabela 4), SB e V% (Tabela 5), e os menores valores médios de m% (Tabela 4), comportamento este influenciado pela fertirrigação com vinhaça. O aumento nos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis também foi verificado por Silva et al. (2006) no sistema de manejo com vinhaça na camada de 40-80 cm, em relação aos demais usos. Porém, estes mesmos autores não observaram mudanças significativas nos valores de pH do solo.

O CP3 correlacionou-se negativamente com as variáveis selecionadas dentro do conjunto de variáveis que o formam. Estas variáveis que formam o

CP3 são: T, acidez potencial do solo e COT, definidas em ordem de importância. O uso LPV apresentou os menores valores médios de acidez potencial (Tabela 3), confirmando a influência da aplicação de vinhaça sobre esse tipo de acidez do solo também nesta camada. Já os maiores valores médios de COT (Tabela 8) e T (Tabela 5) foram encontrados no uso CPV que, além de serem influenciados pelo uso da vinhaça, podem ter tido a interferência da amostragem dos solos.

A disposição das variáveis em relação aos CPs está representada na Figura 7. Da mesma forma que ocorreu nas camadas anteriormente avaliadas, no CP2 a única variável selecionada correlacionada com o mesmo negativamente é a m%, que se encontra abaixo da origem no eixo correspondente à CP2. Enquanto que na CP3 todas as três variáveis selecionadas estiveram correlacionadas negativamente, concentrando-se do lado esquerdo da origem do eixo que corresponde ao CP3.

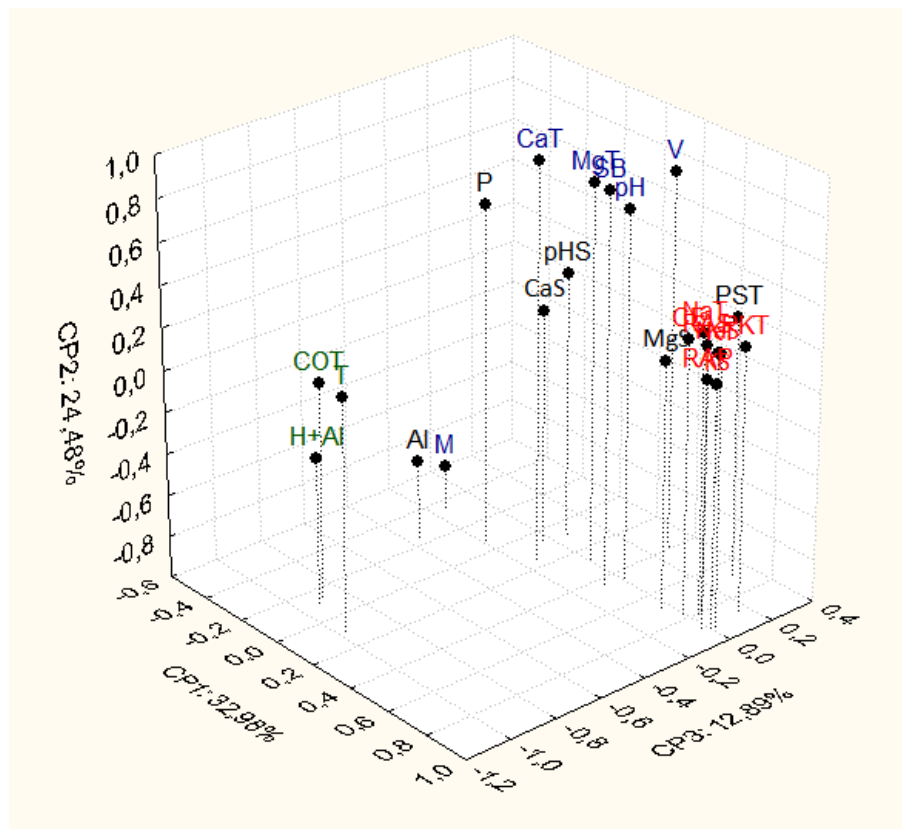


Figura 7: Distribuição das variáveis em função dos componentes principais (CP) dos solos na camada de 60-80 cm. As variáveis em vermelho estão correlacionadas com o CP1; as azuis com o CP2; as verdes com o CP3; e as pretas são as excluídas por terem coeficiente inferior a 0,7 com os componentes.

Na Figura 8 observa-se a formação de três grupos distintos a partir das variáveis selecionadas pela ACP. Dois grupos são constituídos por um único uso cada e o outro por dois diferentes usos. Mais uma vez, os solos sob o uso LPV formaram um grupo, sendo este o mais diferente entre os grupos por possuir a maior distância entre todos, o que reflete os resultados dos valores médios observados das variáveis selecionadas pela ACP. O uso CPV também formou um grupo isolado e, neste caso, apresentou-se quimicamente melhor que os usos CC e MN que, por sua vez, formaram um único grupo. A formação de grupos distintos dos solos sob os usos com manejo de vinhaça nesta camada confirma a importante influência da fertirrigação com vinhaça sobre os atributos químicos do solo em profundidade, mesmo em curto período de aplicação do resíduo ao solo.

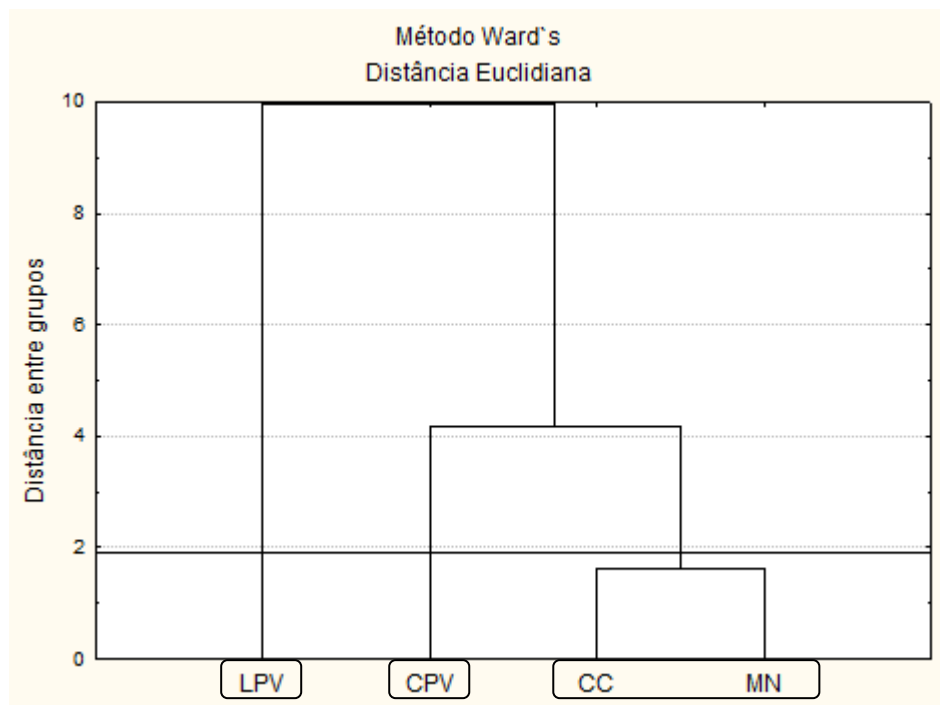


Figura 8: Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos atributos químicos dos solos na camada de 60-80 cm dos usos avaliados (MN: Mata nativa; CC: Cultivo convencional de cana-de-açúcar; CPV: Cultivo com vinhaça por curto período, três a cinco anos; e LPV: cultivo com vinhaça por longo período, 15 a 20 anos) utilizando a distância euclidiana média como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

4.2.5 Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo na camada de 80-100 cm

Diferentemente dos CPs extraídos anteriormente pela ACP, nesta camada foram quatro CPs retidos que, somados, explicam 72,51% da variação total dos dados (Tabela 13). O CP1 explicou a maior parte da variação (28,45%), o CP2 respondeu por 23,51%, o CP3 por 13,67% e o CP4 explicou 6,88% da variação total dos dados. Por apresentar quatro CPs, a representação gráfica da distribuição das variáveis em função dos usos não foi realizada.

Tabela 13: Correlação entre cada componente principal e os atributos químicos dos solos na camada de 80-100 cm sob os usos avaliados e manejos com e sem vinhaça

Variáveis	Componentes			
	CP1	CP2	CP3	CP4
pH do solo	0,392	0,784	-0,098	-0,030
Acidez trocável (Al^{+3})	-0,234	-0,570	0,464	-0,319
Acidez potencial ($H^+ + Al^{+3}$)	-0,067	-0,283	0,882	0,117
Cálcio trocável (Ca^{+2})	0,262	0,880	0,112	-0,125
Magnésio trocável (Mg^{+2})	0,108	0,788	0,004	0,123
Sódio trocável (Na^+)	0,724	0,405	-0,179	-0,022
Potássio trocável (K^+)	0,861	0,273	-0,106	-0,140
Fósforo disponível (P)	-0,059	0,679	0,263	-0,120
Capacidade de troca cátions potencial (T)	0,226	0,335	0,858	0,059
Soma de bases (SB)	0,423	0,879	0,042	-0,075
Saturação por bases (V)	0,316	0,737	-0,478	0,060
Saturação por alumínio (m)	-0,339	-0,731	0,322	-0,221
Percentagem de sódio trocável (PST)	0,484	0,233	-0,557	0,164
Percentagem de potássio trocável (PKT)	0,782	0,207	-0,321	0,007
Carbono orgânico total (COT)	-0,145	0,116	0,627	0,085
Condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es})	0,718	0,299	0,145	0,327
pH do extrato de saturação (pH_{es})	0,031	0,159	0,074	-0,197
Cálcio solúvel (Ca^{+2})	-0,153	0,039	0,126	0,847
Magnésio solúvel (Mg^{+2})	0,484	0,145	0,214	0,642
Potássio solúvel (K^+)	0,887	0,077	0,069	0,030
Sódio solúvel (Na^+)	0,795	0,198	-0,140	0,115
Relação de adsorção de sódio (RAS)	0,803	0,171	-0,159	-0,127
Relação de adsorção de potássio (RAK)	0,912	0,090	0,063	-0,043
Autovalores	6,545	5,407	3,146	1,583
% variância explicada	28,45	23,51	13,67	6,88
% variância acumulada	28,45	51,96	65,63	72,51

O CP1 apresentou apenas correlação positiva com as variáveis selecionadas e dispostas na ordem: RAK, K^+ solúvel e trocável, RAS, Na^+ solúvel, PKT, Na^+ trocável, e CE_{es} . Este CP1 também representa a concentração eletrolítica do solo com os íons K^+ e Na^+ . Os valores médios de K^+ e Na^+ trocáveis (Tabela 2), K^+ e Na^+ solúveis (Tabela 3), CE (Tabela 6), RAS, RAK e PKT (Tabela 7) são indiscutivelmente superiores nos solos sob o uso LPV e indicam como a fertirrigação com vinhaça ao longo do tempo pode aumentar a concentração eletrolítica do solo com os íons K^+ e Na^+ .

Brito et al. (2009), avaliando de três diferentes tipos de solo (Argissolo, Nitossolo e Espodossolo) em colunas de PVC (1 m de comprimento) em função da adição de vinhaça ao solo, observaram aumento nos teores de K^+ trocável em todas as camadas avaliadas após 60 dias da aplicação de vinhaça. Estes mesmo autores avaliaram o Na^+ trocável após 60 dias da aplicação da vinhaça e não verificaram variações importantes no Nitossolo, no Argissolo observaram redução do Na^+ trocável apenas no primeiro horizonte, e no Espodossolo observaram aumento do Na^+ trocável em todos os horizontes. Em outro trabalho, Brito et al (2005), estudando os teores de Na^+ e K^+ no lixiviado destes mesmos solos, observaram maior concentração de Na^+ do que de K^+ .

O CP2 foi constituído pelas variáveis: Ca^{+2} trocável, SB, Mg^{+2} trocável, pH do solo, V% e m%, definindo a CP2 como uma variável que representa a fertilidade do solo. A m% foi a única variável que se correlacionou negativamente com o CP nesta camada (Tabela 13). O uso LPV, seguido do CPV, nesta camada, apresentaram os maiores valores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis (Tabela 2), pH do solo (Tabela 4), SB e V% (Tabela 5), e os menores valores médios de m% (Tabela 4). Observa-se, com isso, que a influência da fertirrigação com vinhaça, principalmente por longos períodos, não se limita às primeiras camadas, pois esta atua em profundidade. Brito et al. (2009) observaram na última camada avaliada, após 60 dias da aplicação da vinhaça, que houve aumento nos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis no Espodossolo, no Argissolo apenas de Ca^{+2} trocável e no Nitossolo não verificaram mudanças importantes. Segundo estes autores, essas diferenças são atribuídas às características intrínsecas de cada solo.

O CP3 foi definido apenas por duas variáveis, acidez potencial e T, que apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,7 com o mesmo CP nesta camada. Os valores médios da acidez potencial (Tabela 4) foram menores no

uso LPV, que se justifica pelo aumento na concentração de cátions básicos proporcionado pela fertirrigação com vinhaça, enquanto que os maiores valores de T (Tabela 5) para esta camada também foram atribuídos ao uso LPV que, neste caso, parece estar associado às características dos solos, uma vez que o teor de COT (Tabela 8) deste uso é o menor registrado.

O CP4, por sua vez, representa o teor de Ca^{+2} solúvel no solo, pois é formado apenas por esta variável. O uso MN possui o maior valor médio desta variável dentre todos os usos (Tabela 3).

A Figura 9 apresenta a formação de dois grupos distintos, onde um é formado por um único uso, o LPV, e o outro da junção dos três usos restantes, CPV, CC e MN. A fertirrigação com vinhaça por longo período promoveu alterações nos atributos químicos do solo em todas as camadas avaliadas mantendo-se constante como um grupo distinto dos demais usos até 100 cm de profundidade.

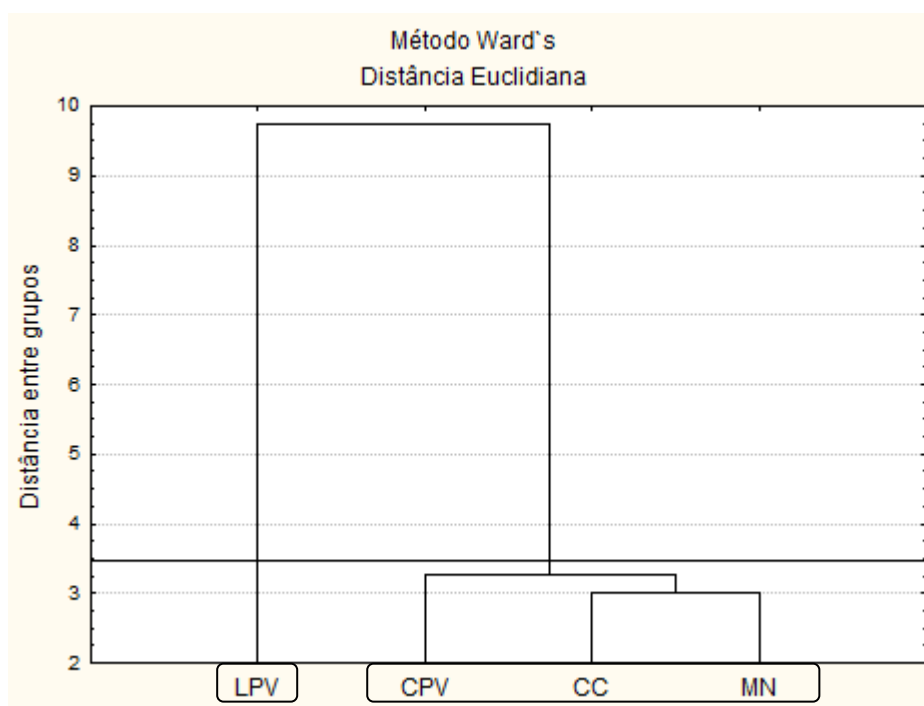


Figura 9: Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos atributos químicos dos solos na camada de 80-100 cm sob os usos avaliados (MN: Mata nativa; CC: Cultivo convencional de cana-de-açúcar; CPV: Cultivo com vinhaça por curto período, três a cinco anos; e LPV: cultivo com vinhaça por longo período, 15 a 20 anos) utilizando a distância euclidiana média como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

A influência do uso CPV foi limitada até a camada de 60-80 cm de profundidade, enquanto que a do uso CC foi limitada até a segunda camada. A

partir desta camada os usos CPV, CC e MN são iguais como pode ser observado na Figura 9, a representação destes usos compondo um único grupo no dendograma.

Ou seja, a aplicação de vinhaça a uma grande gama de solos da Zona da Mata de Pernambuco tem promovido alterações significativas nas propriedades químicas dos mesmos, modificando-as até 100 cm de profundidade, quando forem realizadas por longos períodos de tempo. Algumas destas alterações melhoram propriedades, como pH, acidez trocável e potencial, no entanto, também podem estar promovendo aumentos nos teores de sais, bem como desbalanços nutricionais pela elevação nos teores de K^+ e Na^+ nos solos, em detrimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Para que estas alterações não venham a promover a degradação dos solos, será preciso realizar um monitoramento por meio de análises dos solos em profundidade, pela interferência da vinhaça até camadas profundas. Por outro lado, é preciso destacar que existem diferenças na reatividade de cada solo à aplicação deste resíduo e, portanto, as respostas são diferenciadas entre os tipos de solos e manejos adotados (dose, tipo de vinhaça, período de aplicação etc.).

Só com o entendimento de cada situação em particular, é que o manejo pode ser realizado sem riscos de degradação dos solos e do ambiente como um todo.

4.3 Estatística descritiva dos atributos físicos

O conjunto dos atributos físicos dos solos estudados neste trabalho está representado, por meio da estatística descritiva a partir dos valores originais calculados das variáveis, resumidos nas Tabelas 14, 15 e 16.

4.3.1 Composição granulométrica

Na Tabela 14 observa-se que dentre os diferentes usos, as áreas sob curto período de aplicação de vinhaça (CPV) apresentaram maior teor de areia grossa em todas as profundidades, seguidos das áreas de cultivo convencional (CC), das áreas sob longo período de aplicação de vinhaça (LPV) e mata nativa (MN). Em relação ao teor de areia fina que, assim como a areia grossa decresce em profundidade, o LPV apresentou o maior teor seguido do CPV, CC e MN.

O silte, dentre as frações granulométricas estudadas, foi a que apresentou o maior coeficiente de variação (CV%) chegando a valores próximos de 99%, enquanto que nas demais frações esses valores foram inferiores a 54%. O silte decresceu em profundidade, mas nas duas últimas camadas avaliadas houve um aumento dessa fração granulométrica, com exceção da MN onde o aumento ocorreu apenas na última. Esse aumento pode estar associado a profundidade efetiva dos solos, uma vez que, em alguns casos a coleta de solo foi limitada a camada de 60-80 cm.

. Diferentemente do comportamento decrescente da areia grossa e areia fina em profundidade, os teores de argila aumentaram, principalmente na área de MN. De acordo com a Embrapa (2006) a média dos teores de argila dos solos de cada uso sob os diferentes manejos com vinhaça em todas as camadas avaliadas, com exceção da primeira camada do CC, CPV e LPV que são de textura média, enquadra-se no grupamento de textura argilosa. Segundo Koffler et al. (1986), os solos que compõem as diferentes Zonas canavieiras do estado são predominantemente argilosos, com textura um pouco mais grosseira nos horizontes superficiais dos solos das Zonas Norte e Central, apenas a Zona do Litoral Norte são de textura média

Tabela 14: Composição granulométrica de cada uso de solo sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliada

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	0 – 20	315,3	492,7	73,7	119,5	37,9	383,6	701,0	163,5	147,4	38,4	400,1	794,7	221,3	163,2	40,8	357,2	566,3	160,8	123,9	34,7
	20 – 40	261,8	408,4	45,2	103,5	39,5	337,3	759,3	109,4	167,7	49,7	338,6	712,2	126,0	162,0	47,7	311,7	513,9	145,8	117,1	47,8
	40 – 60	230,3	363,1	36,8	91,5	39,7	295,6	723,3	90,0	156,7	53,0	304,9	685,2	130,5	153,2	50,2	278,0	443,2	133,6	102,2	36,7
	60 – 80	224,5	358,2	38,2	94,7	42,2	286,6	665,8	80,7	136,7	47,7	294,7	664,3	107,1	152,9	51,9	269,	463,9	112,4	104,0	38,7
	80 – 100	215,1	347,7	34,0	94,1	43,7	281,4	672,9	58,8	137,1	48,7	279,1	671,6	90,1	142,5	51,1	244,4	486,6	64,8	103,6	42,4
Areia Fina (g kg ⁻¹)	0 – 20	178,5	267,3	129,3	36,7	20,6	194,9	278,1	92,2	46,7	24,0	222,3	417,7	131,5	89,5	40,2	241,0	426,0	121,5	82,0	34,0
	20 – 40	159,7	244,9	88,2	38,4	24,1	168,2	245,7	67,8	43,8	26,1	194,7	416,2	99,8	82,0	42,1	199,1	383,4	91,6	70,1	35,2
	40 – 60	140,0	231,3	63,9	43,8	31,3	149,0	250,3	66,8	48,2	32,4	176,6	409,7	70,4	85,1	48,2	181,1	370,0	75,9	76,5	42,2
	60 – 80	131,8	214,1	65,3	41,3	31,3	148,5	298,1	59,2	58,5	39,4	161,2	415,1	61,1	83,1	51,5	161,8	400,7	95,8	74,5	46,1
	80 – 100	128,3	237,5	75,8	47,6	37,1	141,2	296,6	60,6	52,6	37,3	144,9	341,8	64,9	64,0	44,1	140,4	192,5	77,7	40,4	28,8
Silte (g kg ⁻¹)	0 – 20	127,1	364,2	10,2	93,1	73,2	100,9	180,6	25,8	40,3	40,0	108,9	255,1	17,2	71,1	65,3	128,3	274,9	33,2	68,9	53,7
	20 – 40	116,4	289,5	34,0	74,5	64,0	78,4	169,9	15,8	40,3	51,4	106,0	306,1	10,5	77,9	73,4	105,0	269,3	23,9	76,8	73,2
	40 – 60	104,5	293,8	24,7	81,8	78,3	68,0	155,3	20,2	41,9	61,6	105,3	322,6	28,5	82,2	78,1	104,5	287,7	29,0	83,8	80,1
	60 – 80	100,5	286,9	8,9	81,8	81,4	66,2	187,9	30,0	38,3	57,9	123,4	320,3	7,1	107,1	86,8	122,0	323,7	20,8	86,3	70,7
	80 – 100	137,5	592,2	13,2	135,7	98,7	68,1	213,4	13,3	43,3	63,6	149,4	533,4	23,4	141,1	94,4	134,7	264,2	15,3	83,0	61,7
Argila (g kg ⁻¹)	0 – 20	379,0	502,7	219,3	73,6	19,4	320,6	541,0	26,2	140,5	43,8	268,7	497,7	42,4	146,1	54,4	273,4	551,7	68,3	149,8	54,8
	20 – 40	462,1	596,6	347,1	74,5	16,1	416,2	670,5	11,7	161,0	38,7	360,7	577,7	28,4	175,6	48,7	384,2	623,0	84,3	175,8	45,7
	40 – 60	525,2	634,5	383,7	63,9	12,2	487,4	686,3	6,3	165,8	34,0	413,2	610,1	28,1	184,3	44,6	436,4	659,3	77,7	183,4	42,0
	60 – 80	543,3	633,6	411,0	67,8	12,5	498,7	670,9	3,4	164,4	33,0	420,7	605,6	61,2	175,5	41,7	447,0	701,6	53,8	183,9	41,1
	80 – 100	519,1	659,7	282,3	83,6	16,1	509,3	714,9	4,0	161,3	31,7	426,5	582,7	89,6	155,7	36,5	480,5	737,6	129,8	131,4	27,3

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio Padrão e; CV – Coeficiente de Variação.

A distribuição granulométrica do solo possui grande importância no direcionamento da adoção de práticas agrícolas racionais. Pois por meio de seu prévio conhecimento é possível inferir sobre a dinâmica da água no solo, bem como, sua reatividade em relação aos atributos químicos (BRADY & WEIL, 2007).

4.3.2 Argila dispersa em água e índice de dispersão

Na Tabela 15 são apresentadas as medidas estatísticas descritivas da argila dispersa em água (ADA) e do índice de dispersão (ID). A quantidade de ADA diminuiu em todas as camadas de cada uso, mas apenas no uso do CC houve um sensível aumento da ADA nas duas últimas camadas.

Dentre os usos, o CC apresenta, em relação aos demais usos até as camadas 60-80 cm, o menor valor médio de ADA. Essa redução na quantidade de ADA pode estar relacionada à prática da calagem, que tem por objetivo elevar o pH do solo e, por sua vez, aumentar a disponibilidade de nutrientes para a planta, principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} . De acordo com Meurer et al. (2000), o Ca^{2+} promove a floculação das argilas e favorece o aumento da atividade biológica, o que contribui para a agregação das partículas do solo. Silva & Mendonça, (2007) relatam que em solos tropicais, com elevado grau de evolução, a matéria orgânica possui efeito secundário no processo de agregação em razão da forte ação cimentante entre as partículas primárias, proporcionada pelos óxidos hidróxidos de ferro e alumínio e pela forte interação com a caulinita.

O CPV apresentou-se semelhantemente ao CC, porém com o menor valor médio de ADA na última camada. Na primeira camada, 0-20 cm, o maior valor médio de ADA é atribuído ao uso de MN, porém deve-se ressaltar que o uso de MN também possui o maior teor de argila. Apesar de naturalmente o uso de MN possuir maior teor de matéria orgânica os teores de cátions básicos, como o Ca^{2+} que favorece a agregação, são relativamente baixos e, por isso, o efeito de agregação do solo é minimizado (Tabelas 3 e 15).

Tabela 15: Valores de argila dispersa em água e índice de dispersão dos solos em função de cada uso de solo sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
ADA (g kg ⁻¹)	0 – 20	212,8	305,7	113,2	46,6	21,9	170,8	331,1	2,4	81,6	47,7	179,9	316,9	17,3	94,6	52,6	193,9	385,2	53,6	99,5	51,3
	20 – 40	167,5	357,8	3,7	127,0	75,8	81,0	343,7	3,8	106,8	131,8	139,6	427,4	3,1	139,9	100,3	238,4	496,8	1,1	150,8	63,2
	40 – 60	69,0	290,6	1,3	110,1	159,6	32,8	187,2	0,4	59,1	180,0	93,8	431,0	0,6	144,4	153,9	238,6	481,2	2,1	162,2	68,0
	60 – 80	65,2	298,6	1,5	109,7	168,2	33,6	233,7	0,2	63,8	189,9	34,2	400,4	0,6	87,5	255,9	160,1	452,6	2,2	166,1	103,8
	80 – 100	55,1	346,2	0,2	107,3	194,8	35,6	250,0	0,4	76,7	215,3	13,6	90,7	0,4	25,8	190,2	104,5	438,9	1,0	144,1	137,9
ID (kg kg ⁻¹)	0 – 20	0,56	0,66	0,40	0,07	13,43	0,53	0,75	0,09	0,18	34,05	0,67	0,97	0,41	0,13	19,99	0,73	0,97	0,59	0,11	14,54
	20 – 40	0,37	0,74	0,01	0,27	73,44	0,26	0,75	0,01	0,29	111,67	0,46	0,85	0,01	0,33	71,73	0,67	0,94	0,00	0,28	42,16
	40 – 60	0,15	0,70	0,00	0,25	163,00	0,13	0,69	0,00	0,23	175,78	0,27	0,77	0,00	0,32	118,28	0,61	0,92	0,00	0,31	50,58
	60 – 80	0,14	0,63	0,00	0,24	170,62	0,13	0,94	0,00	0,25	190,73	0,13	0,72	0,00	0,24	176,80	0,44	0,87	0,00	0,37	83,43
	80 – 100	0,12	0,64	0,00	0,22	193,14	0,13	0,94	0,00	0,27	203,73	0,07	0,67	0,00	0,16	232,31	0,27	0,89	0,00	0,35	130,46

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; ID – Índice de dispersão e; ADA – Argila dispersa em água.

No entanto, os maiores valores médios para ADA a partir da segunda camada é observado no uso LPV, devido a elevação do pH (Tabela 4) e dos cátions K^+ e Na^+ , tanto em solução quanto no complexo de troca (Tabelas 2 e 3). Segundo Meurer et al. (2000), a predominância de Na^+ ou K^+ no complexo sortivo favorece a dispersão dos colóides reduzindo a estabilidade dos agregados.

Além disso, o aumento do pH pode promover o aumento da dispersão de argila em solos de carga variável por favorecer a formação de cargas negativas nas partículas do solo (SPARKS, 1995). Por ser um líquido rico em bases, principalmente o K^+ , que favorece o aumento no pH do solo, a vinhaça pode agir como agente dispersante no solo e em profundidade.

Estes resultados diferem dos encontrados por Vasconcelos et al. (2010), que avaliaram o efeito do aporte de matéria orgânica pelos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Estes autores observaram menores valores de ADA para mata nativa nas três camadas avaliadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm) em comparação com o sistema de manejo com vinhaça+torta de filtro, apenas com vinhaça e área irrigada. No entanto, os valores de ADA, nas duas últimas camadas, do manejo com vinhaça foi o mais próximo da área irrigada, cujos valores de ADA foram os mais elevados, muito embora fossem significativamente diferentes.

Silva et al. (2006), ao estudarem os efeitos dos sistemas de manejo na dispersão de argila do solo, evidenciaram a redução da ADA em todas as camadas estudadas (0-20, 20-40 e 40-80 cm) para a área de mata em comparação com as demais áreas, corroborando com Vasconcelos et al. (2010). Porém, as áreas sob uso de vinhaça, neste mesmo estudo, tiveram o segundo menor valor de ADA nas duas últimas camadas, sendo que na primeira os valores foram significativamente semelhantes com os da área de mata. No entanto, neste estudo, a área com vinhaça, a cada renovação do canal recebe cerca de 20 Mg ha^{-1} de torta de filtro.

Os valores médios do ID também são apresentados na Tabela 15, onde se verifica um decréscimo dos valores médios com relação a profundidade em todos os usos. Este atributo esclarece melhor o comportamento da dispersão das argilas, pois deriva da relação da ADA e o teor de argila total de cada uso.

Os menores valores de ID até a camada 40-60 cm mantendo-se

constante, a partir desta, até a última camada é observado no CC. Já os maiores valores de ID, em todas as camadas estudadas, em relação aos demais usos são atribuídos ao LPV, resultados semelhantes ao da ADA. Estes resultados diferem dos de Camargo et al. (1988), que, ao avaliar um Latossolo Vermelho Escuro que recebeu vinhaça ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por um período de três anos, verificaram que os teores de argila dispersa do solo diminuíram em relação ao solo testemunha, atribuindo a redução de ADA ao aumento da concentração salina que reduz a dupla camada difusa, contribuindo para a aproximação das partículas. Vasconcelos et al. (2010) também estudaram o grau de floculação, que é o inverso do ID, e verificaram a mesma tendência observada para ADA em todos os sistemas de manejo avaliados.

Os elevados ID nas duas primeiras camadas do CPV e nas quatro primeiras do LPV promovem o adensamento do solo, acarretando o aumento da densidade do solo, afetando a distribuição de poros e, até mesmo, reduzindo-a, além de interferir na dinâmica da água e dos gases que permeiam o solo. Além disso, o elevado ID nas camadas superiores pode favorecer o processo erosivo, em função da redução da agregação das partículas.

Os valores de coeficiente de variação (CV%) destes dois atributos são bem elevados, no entanto, vale salientar que este trabalho não se trata de experimentação, mas sim de uma amostragem.

4.3.3 Densidade de partículas sólidas do solo e do solo

A amplitude entre os valores mínimos e máximos de densidade de partículas do solo (D_p) de todos os usos de solo sob os diferentes manejos de aplicação de vinhaça variou entre $2,49 \text{ g cm}^{-3}$ a $2,86 \text{ g cm}^{-3}$, apresentando baixo CV% conforme a Tabela 16. Este atributo físico do solo está relacionado com a composição mineralógica do solo e, embora ocorra uma variabilidade muito grande de solos na Zona da Mata, esse atributo não apresentou grandes variações em seus valores médios ($2,67 \text{ g cm}^{-3}$ a $2,75 \text{ g cm}^{-3}$), considerados normais para a maioria dos solos minerais (BRADY & WEIL, 2007).

A variabilidade dos dados de densidade do solo (D_s), representadas pelo coeficiente de variação (CV%), foram inferiores a 11% em todas as camadas de cada uso de solo, conforme a Tabela 16. Os valores de D_s foram, em todas as três camadas estudadas, definitivamente menores no uso de MN, em

relação aos demais usos, seguido do CC. Semelhantemente, Mota et al. (2011), avaliando os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico, em diferentes camadas (0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m), sob sistemas de pastagem extensiva, cana-de-açúcar e mata nativa, também verificaram que a área de mata nativa apresentou o menor valor de Ds em todas as camadas estudadas.

Os solos de MN preservam sua estrutura original em equilíbrio, por isso apresentam-se, em geral, fisicamente mais estáveis que os solos cultivados. O aumento da Ds pelo uso agrícola está associado ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas, ao pisoteio animal, intensidade de cultivo e sistema de manejo inadequado (HAMZA & ANDERSON, 2005). O aumento da Ds dos solos cultivados, também pode estar relacionado com o menor teor de matéria orgânica (ARAÚJO et al., 2004).

Na primeira camada observa-se que o maior valor médio de Ds é atribuído ao CPV e, nas duas últimas camadas, o maior valor médio é verificado no uso LPV. Esses dois usos, CPV e LPV, influenciaram negativamente os valores de Ds, que por sua vez, estão relacionados com os elevados teores de ADA e do ID (Tabela 15) destes mesmos usos, que contribuem para o aumento da Ds. Além disso, a elevação do pH e a redução do Al^{+3} trocável (Tabela 4) favorecem a dispersão das argilas no solo sob estes usos.

Oliveira et al., (2010), avaliando a susceptibilidade de um Argissolo Distrocoeso à compactação em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, verificaram que o sistema de manejo com vinhaça diferiu, estatisticamente, apenas na camada 20-40 cm, dentre as três camadas avaliadas, em relação a área de mata, com aumento nos valores de densidade do solo.

Por outro lado, Camilloti et al. (2006), avaliando a influência da aplicação anual de lodo de esgoto e de vinhaça em um Latossolo Vermelho, em cinco camadas, não observaram nenhuma modificação significativa, em função dos tratamentos, na densidade do solo após as colheitas do 3º e 4º cortes da cultura.

Tabela 16: Valores de índice de dispersão, densidade do solo e de partículas, condutividade hidráulica e distribuição de poros dos solos em função de cada uso de solo sob os diferentes manejos com e sem vinhaça nas camadas avaliadas

Atributo	Camada (cm)	Usos																			
		Mata Nativa (MN)					Cultivo Convencional (CC)					Curto Período com Vinhaça (CPV)					Longo Período com Vinhaça (LPV)				
		\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV	\bar{x}	Máx	Mín	S	CV
Dp (g cm ⁻³)	0 – 20	2,69	2,78	2,59	0,05	1,68	2,68	2,79	2,55	0,06	2,38	2,70	2,78	2,51	0,07	2,63	2,67	2,78	2,49	0,07	2,56
	20 – 40	2,71	2,79	2,62	0,05	1,67	2,70	2,80	2,61	0,06	2,07	2,71	2,83	2,55	0,08	2,81	2,70	2,78	2,54	0,06	2,37
	40 – 60	2,73	2,80	2,60	0,05	1,93	2,71	2,79	2,59	0,05	1,98	2,71	2,82	2,55	0,08	2,84	2,71	2,82	2,54	0,07	2,52
	60 – 80	2,75	2,82	2,65	0,05	1,91	2,71	2,79	2,55	0,06	2,12	2,71	2,86	2,51	0,09	3,41	2,72	2,82	2,56	0,07	2,39
	80 – 100	2,74	2,85	2,65	0,05	1,92	2,73	2,80	2,61	0,05	1,82	2,72	2,85	2,54	0,08	2,90	2,74	2,82	2,61	0,06	2,03
Ds (g cm ⁻³)	0 – 20	1,23	1,45	0,98	0,12	10,09	1,41	1,62	1,10	0,14	9,99	1,53	1,74	1,32	0,10	6,47	1,50	1,66	1,28	0,09	6,14
	20 – 40	1,32	1,49	1,11	0,12	8,74	1,45	1,67	1,12	0,14	9,94	1,53	1,70	1,20	0,13	8,61	1,57	1,84	1,32	0,15	9,54
	40 – 60	1,32	1,55	1,07	0,14	10,92	1,40	1,59	1,09	0,12	8,87	1,52	1,74	1,24	0,13	8,66	1,54	1,84	1,24	0,16	10,39
Ma (cm ³ cm ⁻³)	0 – 20	0,09	0,18	0,02	0,04	48,85	0,04	0,12	0,02	0,02	46,32	0,04	0,09	0,02	0,02	36,24	0,05	0,12	0,03	0,02	44,63
	20 – 40	0,07	0,13	0,02	0,03	47,78	0,06	0,11	0,03	0,02	43,65	0,05	0,14	0,02	0,03	53,05	0,04	0,06	0,02	0,01	28,13
	40 – 60	0,05	0,11	0,02	0,02	43,86	0,06	0,13	0,03	0,03	54,82	0,05	0,08	0,02	0,02	32,60	0,05	0,14	0,02	0,03	54,03
Me (cm ³ cm ⁻³)	0 – 20	0,11	0,17	0,04	0,04	39,18	0,10	0,26	0,03	0,06	61,42	0,09	0,25	0,01	0,07	74,96	0,07	0,11	0,01	0,03	44,80
	20 – 40	0,09	0,19	0,02	0,05	56,48	0,08	0,26	0,02	0,06	76,97	0,08	0,30	0,02	0,08	99,02	0,05	0,12	0,02	0,03	59,26
	40 – 60	0,08	0,25	0,01	0,05	65,43	0,08	0,26	0,01	0,06	73,32	0,07	0,26	0,01	0,07	89,91	0,05	0,11	0,01	0,03	57,93
Mi (cm ³ cm ⁻³)	0 – 20	0,37	0,56	0,26	0,10	27,91	0,36	0,47	0,13	0,06	17,55	0,32	0,42	0,16	0,08	23,52	0,35	0,46	0,26	0,06	17,99
	20 – 40	0,39	0,57	0,30	0,08	19,55	0,37	0,51	0,12	0,08	21,16	0,34	0,46	0,10	0,09	27,26	0,36	0,48	0,27	0,08	21,42
	40 – 60	0,42	0,58	0,31	0,08	18,82	0,37	0,54	0,09	0,08	22,08	0,35	0,47	0,10	0,11	30,13	0,37	0,51	0,27	0,08	22,30
Pt (cm ³ cm ⁻³)	0 – 20	0,57	0,66	0,48	0,05	8,49	0,50	0,61	0,40	0,06	12,77	0,46	0,57	0,39	0,04	8,18	0,47	0,57	0,40	0,05	11,53
	20 – 40	0,54	0,66	0,46	0,05	8,64	0,50	0,62	0,39	0,07	13,59	0,47	0,58	0,38	0,06	13,17	0,45	0,58	0,32	0,08	18,60
	40 – 60	0,55	0,67	0,44	0,06	10,38	0,51	0,68	0,38	0,07	14,01	0,47	0,60	0,35	0,07	14,33	0,47	0,59	0,32	0,08	17,66
Ksat (cm h ⁻¹)	0 – 20	41,94	173,07	3,01	45,80	109,20	17,22	53,05	0,93	15,99	92,84	10,73	32,91	0,20	10,98	102,35	9,73	39,54	0,44	10,52	108,11
	20 – 40	19,71	84,25	1,92	21,00	106,56	13,80	60,16	0,62	15,37	111,32	10,44	44,46	0,04	14,35	137,46	5,50	27,00	0,13	7,06	128,37
	40 – 60	11,08	45,48	1,21	11,35	102,48	8,42	31,25	0,00	9,26	109,92	10,48	33,15	0,00	11,08	105,69	6,13	29,30	0,35	8,12	132,38

\bar{x} – Média; Máx – Máximo; Mín – Mínimo; S – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Dp – Densidade de partículas; Ds – Densidade do solo; Ksat – Condutividade hidráulica em meio saturado; Ma – Macroporosidade do solo; Me – Mesoporosidade do solo; Mi – Microporosidade do solo e; Porosidade total do solo.

4.3.4 Distribuição de poros do solo

Os diferentes usos do solo e de manejo de aplicação de vinhaça afetaram a distribuição de poros representada pela macroporosidade (Ma), mesoporosidade (Me), microporosidade (Mi) que, por fim, compõem a porosidade total do solo (Pt). Conforme Hillel (1980), a porosidade total do solo, isoladamente, não demonstra a distribuição dos poros. O conhecimento do comportamento da distribuição de poros em relação aos usos e manejos adotados é importante na compreensão da dinâmica da água no solo.

A Ma, também conhecida como porosidade drenável, fração da porosidade total do solo na qual a água se move livremente (Pizarro, 1978), é normalmente discutida somada a Me nos trabalhos científicos. Por isso, neste trabalho, seus valores são menores do que aqueles encontrados na literatura. A variação deste atributo do solo foi inferior a 55%.

No uso MN, os valores médios de Ma diminuíram em profundidade sendo maior e mais expressivo, entre os usos, na primeira e na segunda camada (Tabela 16). Semelhantemente aos resultados encontrados neste trabalho, Mota et al. (2011) encontraram diferenças significativas em todas as camadas avaliadas (0-10 a 20-30 cm) na Ma, em relação aos demais tratamentos. Viana et al. (2011), em trabalho semelhante ao anterior, verificaram alterações, na camada avaliada (0-10 cm), em menor proporção na Ma do que na Ds.

Nos demais usos, nota-se menores variações nos valores médios de Ma em profundidade. Porém os usos CPV e LPV, apresentaram, na segunda camada, maior redução da Ma em função dos elevados teores de ADA (Tabela 15).

Os valores médios de Me foram maiores, em todas as camadas, no uso de MN, enquanto que no uso LPV verifica-se os menores (Tabela 16). Assim como na Ma, a redução nos valores da mesoporosidade do uso LPV, em relação aos demais usos, podem ser atribuídos aos elevados teores de ADA. O uso CC apresentou os valores mais próximos aos de MN, e o CPV, por sua vez, mais próximo do CC. Esse tipo de poro possui grande importância na drenagem, pois são quantificados como Ma, e na distribuição de água no solo. A redução da Ma e Me em solos cultivados é um indicativo de compactação e, conseqüente, redução do espaço explorado pelas raízes, bem como, a difusão de gases, além de favorecer o escoamento superficial. A variação deste

atributo foi bem maior que a referente a Ma, chegando a um coeficiente de variação de 99,02%.

A Mi, ou porosidade capilar, representa a proporção de poros existentes no solo, responsáveis pela retenção e armazenamento da água (Kiehl, 1979). Os valores de Mi aumentaram em profundidade para os usos MN, CPV e LPV, e no CC aumentaram da primeira para a segunda camada, mantendo-se nas duas últimas (Tabela 16). Esse comportamento pode ser associado ao, também, aumento do teor de argila total em profundidade destes usos (Tabela 14). O uso MN apresentou os maiores valores médio de Mi, aumentando a diferença em profundidade, em relação aos demais usos, enquanto que os menores valores de Mi são observados no uso CPV. Araújo et al. (2004), não observou diferença significativa nos valores de microporos na profundidade 0-20 cm, ao avaliarem a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa. Resultados semelhantes foram observados por Viana et al. (2011).

Camilloti et al. (2006), estudando áreas de cultivo de cana-de-açúcar sob uso de vinhaça e de lodo de esgoto, não constataram nenhum efeito entre os tratamentos sobre a Mi em todas as camadas avaliadas, após as colheitas do 3º e 4º cortes da cana-de-açúcar.

Embora ocorra uma pequena diferença nos valores de Mi entre as áreas cultivadas neste estudo, o comportamento da Mi é bastante semelhante em todos os usos. O coeficiente de variação para este atributo foi inferior a 31%.

Os valores de Pt do solo foram maiores no uso MN em todas as camadas estudadas em relação aos demais usos (Tabela 16). Mota et al. (2011), também verificaram maiores valores de Pt nas áreas de mata em relação as de cana-de-açúcar em todas as camadas. Araújo et al. (2004) e Viana et al. (2011) também observaram redução da Pt nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação as áreas sob vegetação nativa nas camadas 0-20 e 0-10 cm, respectivamente.

Dentre os solos sob cultivo de cana-de-açúcar, os que estão sob manejo de vinhaça, CPV e LPV, apresentaram maior redução da Pt. Esses resultados corroboram os de Zolin et al. (2011), em seu estudo exploratório de aplicação de vinhaça, ao longo dos anos, onde apresentaram resultados que indicam redução da Pt, em relação a testemunha, nas áreas sob uso de vinhaça a quatro e vinte anos, em todas as profundidades (0-15, 15-30 e 30-50 cm).

Os diferentes manejos dos solos cultivados com cana-de-açúcar reduziram a Pt em relação ao seu estado original, embora as diferenças verificadas na distribuição de poros fossem relativamente baixas. A porosidade é um atributo físico do solo que pode ser modificado pelo manejo do mesmo (Hillel et al., 1972). Segundo Reichardt & Timm (2012), quanto maior a Ds menor a Pt. Ao compararmos os valores médios de Ds de cada uso com os respectivos valores de Pt verificamos a relação entre esses dois atributos. É importante ressaltar que a redução da Pt dos solos cultivados afetou a distribuição de poros como um todo, sendo maior sobre a porosidade drenável (Ma e Me) da primeira camada e mais distribuídas nas demais camadas avaliadas. Os valores de coeficiente de variação foram inferiores a 19% para este atributo.

4.3.5 Condutividade hidráulica saturada do solo

Na tabela 16, os maiores valores de condutividade hidráulica saturada do solo (Ksat), em todas as profundidades, são atribuídos ao uso MN, refletindo a influência dos menores valores de Ds e do aumento nos valores da Ma e Me nas duas primeiras camadas, deste mesmo uso, em relação aos demais usos. Segundo Reichert et al. (2007), a condutividade hidráulica possui forte associação com a Ma, o que faz com que pequenas alterações no valor desta alterem consideravelmente os valores daquela, uma vez que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro. Hillel et al. (1972) aponta alguns fatores que influenciam na condutividade hidráulica como: textura, tortuosidade dos poros, porosidade, Ds, estabilidade estrutural, tamanho dos agregados, atividade de microrganismos, presença de ar e composição química do solo.

O aumento da densidade do solo aliada a redução da porosidade drenável do uso CPV nas duas primeiras profundidades e, principalmente, do uso LPV, em todas as profundidades, reduziram a condutividade hidráulica saturada. Lobato et al. (1998), trabalhando com amostras remoldadas de um Latossolo Roxo distrófico, também verificaram diminuição da condutividade hidráulica saturada dos solos com o aumento das doses de vinhaça, sendo os valores mais expressivos a partir da dose de 400 m³. Estes autores explicam que esse decréscimo pode estar ligado ao fato de haver uma acumulação dos

sólidos em suspensão no líquido ao longo do perfil, formando uma camada de alta impedância hidráulica.

O uso CC apresenta, dentre todos os usos sob cultivo estudados, a maior quantidade de poros drenáveis (macro+mesoporos) e o menor valor de densidade do solo na última profundidade, no entanto, nesta última profundidade o valor da condutividade hidráulica é inferior ao do uso CPV que possui menor porosidade drenável e maior valor de densidade do solo. É importante salientar que a maior quantidade de poros drenáveis de um solo em relação a outro não, necessariamente, implicará numa maior condutividade hidráulica. A tortuosidade dos poros, baixa conectividade entre eles e o predomínio horizontal da porosidade drenável no perfil do solo, influenciada pelo manejo do solo, pode resultar na redução da condutividade hidráulica.

O coeficiente de variação dessa variável foi bastante elevado (137,46%). Entretanto, apesar disso, Reichardt (1996) reitera que a condutividade hidráulica varia enormemente de um solo para outro e dentro de um mesmo solo, em função das variações estruturais, compactação, teor de água no solo, expansão e contração do solo, migrações de partículas de argila entre outras características do meio.

4.4 Análise de componentes principais dos atributos físicos

Não foi possível ser realizada a análise de componentes principais (ACP) para os atributos físicos, pois ao serem submetidos a ACP o valor que expressa a medida de adequação da amostra, Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), foi inferior a 0,5 para todas as profundidades avaliadas, inviabilizando a discussão dos dados conforme Field, (2009). Neste caso, o autor recomenda a coleta de mais variáveis, bem como, uma avaliação sobre quais variáveis incluir.

O fato dos dados físicos de cada uso de solo sob os diferentes manejos de vinhaça, em cada profundidade avaliada, não serem processados, pode estar ligado a amplitude de solos sob cultivo de cana-de-açúcar. Como não foi possível realizar a ACP para os atributos físicos, a análise de agrupamento (AA) também não foi feita, pois não é possível identificar as variáveis, dentro dos atributos físicos do solo, discriminantes para compor a AA.

5 CONCLUSÕES

- O uso de vinhaça por longo período foi o mais distinto dentre os usos estudados em todas as camadas avaliadas, contribuindo para o aumento da concentração de eletrólitos no solo sem risco de salinização.
- Os usos sob fertirrigação com vinhaça não contribuíram para o incremento de COT e, conseqüentemente, ECO em nenhuma das camadas estudadas.
- O uso sob cultivo convencional de cana-de-açúcar promoveu maior perda de fertilidade do solo.
- Todos os usos sob cultivo da cana-de-açúcar incrementaram efeitos negativos sobre os atributos físicos do solo nas camadas avaliadas, sendo mais pronunciados no uso de vinhaça por longo período.
- Atributos químicos mais importantes na distinção entre os diferentes usos são: K^+ e Na^+ trocáveis e solúveis; PKT e PST; RAK e RAS; pH do solo; Ca^{+2} e Mg^{+2} trocáveis, SB; V% e M%; CTC; COT e ECOT.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.R. Ação da vinhaça na saúde pública. **Revista de agricultura**. Piracicaba, v.27, n.9, p.269-274, 1952a.
- ALMEIDA, J.R. O problema da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, v.46, n.2, p. 72-277, 1955.
- ALMEIDA, J.R. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba: ESALQ, Instituto Zimotécnico, 1952b. 9p. (Boletim, 3)
- ANDRADE, Manuel Correa de. **Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco**. Estud. av. [online]. 2001, vol.15, n.43, p. 267-280. ISSN 0103-4014.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A. & SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.
- ARAÚJO FILHO J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; MELO FILHO, H. F. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; RODRIGUES E SILVA, F. B.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G. & BARROS, A. H. C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 382 p. (Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa; 11).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos: classificação**; NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 63 p.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB. 1991. 153p. Estudos da FAO Irrigação e Drenagem, 29.
- BAKER, A. S. Colorimetric determination of nitrate in soil and plant extracts with brucine. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 15., n. 5, p.802-806, 1967.

- BALDOTTO, M. A.; CANELLAS, L. P.; REZENDE, C. E.; VELLOSO, C. X. Propriedades redox de ácidos húmicos isolados de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 1043-1052, 2008.
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.6, p. 781-787, 2009.
- BRASIL. Departamento de Solos. **Relatório anual de 1980: utilização de vinhaça como fertilizante em solos da região canavieira de Campos**. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1981. 347p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: Sudene, 1973. v.1, 359p. (MA. DNPEA-DPP. Boletim Técnico, 26; SUDENE-DRN. Série Pedologia, 141).
- BRADY, N. & WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 14 ed. Prentice Hall, 2007. 980p..
- BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência Agrária**, v.4, n.4, p.456-462, 2009.
- BRITO, F.L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.52-56, 2005. (Suplemento)
- BUENO, C. P.; RUBÍ, J. M.; GIMÉNEZ, R. G.; BALLESTA, R. J. Impacts caused by the addition of wine vinasse on some chemical and mineralogical

- properties of a Luvisol and a Vertisol in La Mancha (Central Spain). **Journal of Soils and Sediments**, v.9, p.121-128, 2009.
- BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I - Fracionamento seqüencial. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa: v.29, n.6, p 945-953, 2005.
- CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; BERTON, R.S. & TEÓFILO SOBRINHO, J. **Características físicas de solo que recebeu vinhaça**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1988. (Boletim Científico, 14)
- CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; BERTON, R. S.; TEÓFILO SOBRINHO, J.; MENK, J. R. F. **Alteração de características químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico pela aplicação de vinhaça**. Campinas: Instituto Agronômico, 1987. 23 p. (Boletim, 9)
- CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; GERALDI, R. N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 30 p. (Boletim técnico, 76)
- CAMARGO, R. **O desenvolvimento da flora microbiana nos solos tratados com vinhaça**. Piracicaba: ESALQ, Instituto Zimotécnico, 1954. 44p. (Boletim, 9)
- CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.3, p.738-747, 2006.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDEG, C. E.; SANTOS, A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 935-944, 2003.
- CERRI, C.C.; POLO, A.; ANDREUX, F. ET AL. **Resíduos orgânicos da indústria canvieira: 1. Características físicas e químicas**. STAB: açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v.6, p. 34-37, 1988.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DE SÃO PAULO – CETESB. **Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo, 2006. 12 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar, Terceiro Levantamento**, Brasília, dez. 2013. Disponível em <<http://www.conab.gov.br>>. Acessado em 11 de fevereiro de 2014.

COPERSUCAR – COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aproveitamento da vinhaça: viabilidade técnico-econômica**. Copersucar, Piracicaba, p. 1-66, 1978. (Boletim Técnico)

CORRÊA, M. C. M.; CONSOLINI, F.; CENTURION, J. F. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Maringá**, v. 23, n. 5, p. 1159-1163, 2001.

ELIA NETO, A & NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça projeto nº 9500278. Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia**. Copersucar, Piracicaba, 1995. 26p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Embrapa Informação Tecnológica. **Manual de análises de químicas de solos plantas e fertilizantes**. Brasília, 2009. 627 p.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012. <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> acessado em 11 de fevereiro de 2014.

- FIELD, ANDY. **Descobrimo a estatística usando SPSS**. Tradução Lorí Viali. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 688 p.
- FREIRE, M. B. G. dos S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H. & FREIRE, F, J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 45- 52, 2003.
- FREIRE, W. J.; Cortez, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.
- GLÓRIA N. A. **Emprego da vinhaça para fertilização**. Piracicaba, CODISTIL, 1975b.
- GLÓRIA, N. A da. Utilização agrícola da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, v.86, n.5, p.11-17, 1975a.
- GLÓRIA, A.; MATTIAZZO, M. E. Efeito da matéria orgânica na solubilização de fosfatos no solo. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.5, p.22-31, 1976.
- GLÓRIA, N. & ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: Um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool Açúcar**, n.16, p.32-39, 1984.
- GOMES, F. P.; CARDOSO, E. M. **A adubação da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editora Agrônômica “Ceres”, 1958. p 116.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, jun. 2005.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press. 1980. 413 p.
- HILLEL, D., KRENTOS, V.D. & STILIANOU, Y. Procedure and Test of on Internal Drainage Method for Meãs pring Soil Hydraulic Conductivity in situ. **Soil Science**. v.114, p.395-400, 1972.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo agropecuário brasileiro**. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/brasil_2006/Brasil_censoagro2006.pdf>. Acesso em 12/02/2014.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KOFFLER, N.P.; LIMA, J.F.W.F.; LACERDA, J.F.; SANTANA, J.F.; SILVA, M.A. **Caracterização edafoclimática das regiões canavieiras do Brasil: Pernambuco**. Piracicaba: Ed. Planalsucar, 1986. 78p.

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

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

MACEDO, I. C. **A Energia da Cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. 2ª Ed. São Paulo: Berlendis Editores Ltda, 2007. 235 p.

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

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editorial 2006. p. 369-375.

MATOS, D. S. S.; PEDROSA, E. M. R.; GUIMARÃES, L. M. P.; RODRIGUES, C. V. M. A.; BARBOSA, N. M. R. Relações entre a nematofauna e atributos químicos de solo com vinhaça. **NEMATROPICA**, v. 41, n. 1, 2011.

MEDINA, C. C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. B.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de

- doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, n. 2, p. 179-184, jul./dez. 2002
- MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107 p.
- MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, ed. Gênese, 2000. 174p.
- MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, p. 295, 2005.
- MINISTÉRIO DO INTERIOR. **Portaria/Gm nº 323, de 29 de novembro de 1979**. Disponível em: <<http://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>> acesso em 11/02/2014.
- MOTA, M. S.; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; SILVA, W. M.; MAGALHÃES, W. A.; CREMON, T. Qualidade e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em diferentes sistemas de manejo. **Revista Agrarian**, v.4, n.12, p.105-112, 2011.
- NOVAIS, R.F; SMYTH, T.J. **Fósforo em solos e plantas em condições tropicais**. Viçosa, MG.: UFV, 1999, 399 p.
- NUNES, M. R.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.16, n.2, p.171-176, 1981.
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.914-920, 2010.
- ORLANDO FILHO, J. BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. C.; BEAUCLAIR, E. G. F. **Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar**. STAB, Piracicaba, v.14, n.5, p.13-17, 1996.

- ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. A.; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: PROGRAMA NACIONAL DE MELHORAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, Coleção Planalsucar 2, 1983. p. 229-264.
- ORLANDO FILHO, J.; MURAOKA, T.; RODELLA, A. A.; ROSSETTO, R. Fontes de potássio na adubação da cana-de-açúcar: KCl e K₂SO₄. In: **CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL**, 5., Águas de São Pedro, 1993. Anais. Piracicaba: Stab, 1993, p.39-43.
- ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JUNIOR, E.; RODELLA, A.A. Calibração do potássio no solo e recomendação de adubação para cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, v.97, p.18-24,1981.
- ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR, E. Distribuição e conservação dos solos com cana-de-açúcar no Brasil. In: PROGRAMA NACIONAL DE MELHORAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, Coleção Planalsucar 2, 1983. p. 41-73.
- OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. de C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1137-1145, 2010.
- PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II Características da cana-de-açúcar, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.244-249, 2011.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid, Editorial Agrícola España, 1978, 521p.
- PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1988.
- PRADO JÚNIOR, Caio. **Formação do Brasil contemporâneo**. São Paulo, Martins, 1942.

- PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Degradação e sorção de ametrina em dois solos com aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 975-981, 2001.
- QADIR, M.; OSTER, J. D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A. D.; SAHRAWAT, K. L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. **Advances in Agronomy**, v. 96, p. 197-247, 2007.
- RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1991, 343 p.
- RAIJ, B. VAN. Calibração de potássio trocável no solo para feijão, algodão e cana-de-açúcar. **Ciência e Cultura**. v.26, p.575-579, 1974.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L, E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v. 5, p. 49-134.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole, 2012. 500 p.
- RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M.; CURTI, N.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciada pela vinhaça e fósforo. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p.5-10, 2011.
- RODELLA, A.A.; ZAMBELLO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração das análises de fósforo e potássio do solo em cana-de-açúcar – 2ª Aproximação. **Saccharum**, v.28, p. 39-42, 1983.
- ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S. & CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1033-1040, 2006.

- RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.29, p. 297-300, 2005. (NOTA)
- SENGIK, E.; RIBEIRO, A. C.; CONDE, A. R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades, amostras de dois solos de viçosa – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 11-12, 1988.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. F. W. F. Alterações físicas e químicas de um Argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.10, n.1, p.76–83, 2006a.
- 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 Engenharia Agrícola Ambiental**, v.10, n.3, p.579–585, 2006b.
- SILVA, A. P. M; BONO, J. A. M; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.18, n.1, p.38-43, 2014.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.11, n.1, p. 108-114, 2007.
- SOUSA, D. M. G; MIRANDA, L. M.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. New York: Academic Press, 1995. 267p.

- USSL STAFF - **United States Salinity Laboratory. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: United States Department of Agriculture, 1954. 160p. Handbook 60.
- VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; MOURA, G. B. A.; ROLIM, M. M.; MONTENEGRO, C. E. V. Compactabilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de alagoas sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.537-545, 2012.
- VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, A. J. N.; OLIVEIRA, V. S.; SILVA, Y. J. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.34, p.639-648, 2010.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.
- VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.35, p.2105-2114, 2011.
- VIEIRA, P. R. C.; RIBAS, J. R. **Análise multivariada com uso do SPSS.** Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna. 2011. 272 p.
- ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.15, n.1, p.22–28, 2011.