

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

Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial

Claudio Augusto Uyeda

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

**Piracicaba
2009**

Claudio Augusto Uyeda
Engenheiro Agrícola

Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial

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

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

**Piracicaba
2009**

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

Uyeda, Claudio Augusto

Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial / Claudio Augusto Uyeda. - - Piracicaba, 2009.
66 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Argilas - Dispersão 2. Cana-de-açúcar 3. Fertirrigação 4. Física do solo 5
Permeabilidade do solo 6. Potássio 7. Vinhaça I. Título

CDD 631.432
U97i

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

A meus queridos pais, Harumi e Katsutoshi Uyeda, pelo o amor, dedicação e incentivos morais e financeiros, que sempre tiveram a mim.

OFEREÇO

Ao meu irmão Carlos Eduardo Uyeda e minha amada Tatiana da Silva Santos, pelo carinho e incentivo, em todos os momentos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, pela razão de minha existência e sua presença em todos os momentos da minha vida.

Ao curso de Pós-Graduação da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, pela oportunidade concedida à realização deste doutorado.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia de Irrigação (INCTEI).

Ao meu orientador e co-orientador: Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda e Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte, pela orientação dedicada, estímulo, apoio e amizade a mim oferecida.

Ao idealizador e ex-orientador Prof. Dr. Décio Eugênio Cruciani pela grande inspiração e apoio inicial no começo do curso de doutorado.

Ao colega e amigo Pedro Róbinson Fernandes de Medeiros, pela valiosa contribuição para a realização deste trabalho de tese.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural Hélio de Toledo Gomes, Luis Custódio de Camargo e Antônio Agostinho Gozzo pela dedicação e apoio técnico na montagem e condução do projeto.

Ao funcionário do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Rural (ESALQ/USP) Gilmar Batista Grigolon pela dedicação e empenho nas análises físicas deste trabalho de tese.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Rural (ESALQ/USP) Davilmar Aparecida D. Collevatti, Beatriz Regina Duarte Novaes e Sandra Regina T. Silveira Mello pela simpatia e prestezas nos trâmites pertinentes aos assuntos da pós-graduação.

Ao grande amigo Francisco Valfisio da Silva pela sua paciência e convivência diária dentro e fora da ESALQ.

A todos amigos do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem que com sorrisos, apertos de mão e conversas extra classe me incentivaram para a conclusão das disciplinas e do curso.

Em fim agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para o sucesso deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1 Vinhaça.....	21
2.1.1 Composição química	21
2.1.2 Efeito sobre o solo	22
2.1.3 Dinâmica da vinhaça nos solos.....	24
2.2 Aspecto físico-químico do solo	25
2.2.1 Lei de Coulomb	25
2.2.2 Força de Van der Waals-London.....	25
2.2.3 Dupla camada elétrica	26
2.2.4 Floculação e dispersão.....	28
2.3 Efeito do íon potássio no solo	29
2.4 Condutividade hidráulica.....	31
2.6.1 Considerações gerais	37
2.6.2 Localização e caracterização da área do Experimento I.....	37
2.6.3 Tratamentos e delineamento experimental	38
2.6.4 Instalação do Experimento I.....	39
2.6.5 Condução do Experimento I.....	41
2.6.6 Localização e caracterização da área do Experimento II	43
2.6.7 Tratamentos e delineamentos estatístico	44
2.6.8 Instalação e condução do Experimento II	45
2.6.9 Análises estatísticas.....	47
2.7.1 Condutividade hidráulica do solo saturado tratado com vinhaça	47
2.7.2 Perda de água e solo em uma área cultivada com cana-de-açúcar	52

2.7.3 Perda de potássio e sólidos dissolvidos totais em uma área cultivada com cana-de-açúcar.....	56
3 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	60

RESUMO

Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial

A produção de álcool combustível vem aumentando a cada ano devido à necessidade de substituir as fontes de combustíveis fósseis, que é finita, e por outro lado o álcool que é uma fonte de energia renovável. Porém, a produção deste combustível gera uma grande quantidade de resíduos, sendo a vinhaça o que chama mais atenção, pelo seu alto valor como fertilizante e, principalmente, pela quantidade expressiva de potássio. O íon potássio, por se tratar de um cátion monovalente tem a característica de promover a dispersão das partículas de argila, assim como o sódio, provocando um “entupimento” dos poros do solo e diminuindo a sua permeabilidade, o que pode resultar em encharcamento e aumentar o escoamento superficial. Para avaliar este efeito dispersivo da aplicação de vinhaça no solo foram implementados dois experimentos: O Experimento I teve o objetivo de avaliar o efeito de diferentes doses de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e o Experimento II avaliou diferentes doses de aplicação de vinhaça no escoamento superficial. No Experimento I foram utilizadas colunas de PVC preenchidas com 3 tipos de solos (Latossolo Vermelho-Escuro – LVE, Latossolo Roxo – LR e Nitossolo Vermelho Eutrófico – NVE), nas quais foram aplicadas quatro doses de vinhaça (0, 150, 300 e 450 m³ ha⁻¹), em um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x4 com três repetições. Neste experimento, utilizou-se um permeâmetro de carga constante para obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado. No segundo experimento, montou-se uma estrutura na área pertencente ao Departamento de Engenharia Rural (ESALQ/USP) para avaliação de escoamento superficial em um Nitossolo Vermelho Eutrófico. O delineamento experimental adotado neste experimento foi blocos ao acaso num esquema fatorial 3x3 com três blocos, sendo: 3 variedades de cana-de-açúcar (IAC87-3396, SP81-3250 e RB86-7515) e 3 doses de vinhaça (150, 300 e 450 m³ ha⁻¹). Os parâmetros avaliados foram a perda de água e de solo, perda do potássio e de sólidos dissolvidos totais (SDT). Diante dos resultados obtidos, observou-se que no solo LVE com o aumento das doses de vinhaça diminuiu-se os valores de condutividade hidráulica do solo saturado e para os solos LR e NVE os valores deste parâmetro aumentaram com o acréscimo das doses. Em relação ao escoamento superficial não houve efeito significativo para os fatores em estudo, demonstrando que as doses não contribuíram para o aumento do escoamento superficial como se era suposto.

Palavra-chave: Dispersão da argila; Potássio; Permeabilidade do solo; Cana-de-açúcar; Fertirrigação

ABSTRACT

Influence of vinasse application in saturated hydraulic conductivity and runoff

The production of alcohol used as fuel is increasing every year due to the need to replace the sources of fossil fuels, which is finite, and on the other hand alcohol is a renewable energy source. But the production of this fuel generates large quantities of waste and the vinasse draws most attention by its high value as fertilizer, primarily by the amount of potassium. The potassium ion due to a monovalent feature is to promote the dispersion of the clay particles as well as sodium, clogged the pores of the soil by decreasing the permeability, may cause flooding and increase runoff. For evaluating the dispersive effect of vinasse on the soil were implemented two experiments: Experiment I aimed to evaluate the effect of different doses of vinasse in saturated hydraulic conductivity, and Experiment II, which evaluated different doses of vinasse in runoff. In Experiment I were used PVC columns filled with 3 kinds of soils (Dark Red Latosol - LVE, Dusky Red Latosol- LR and Rhodic Kandiustalf - NVE), and applied four doses of vinasse (0, 150, 300 and 450 m³ ha⁻¹), in a completely randomized design in a 3x4 factorial design with three replications. In this experiment we used a constant load permeameter to obtain the hydraulic conductivity of saturated soil. In the second experiment was mounted in a structure belonging to the Department of Rural Engineering (ESALQ / USP) for evaluation of runoff in a Rhodic Kandiustalf. The experimental design used in this experiment was a randomized block design in a 3x3 factorial with three blocks, and these factors were: 3 varieties of sugarcane (IAC87-3396, SP81-3250 and RB86-7515) and 3 doses of vinasse (150, 300 and 450 m³ ha⁻¹). The parameters evaluated were the loss of water and soil, loss of potassium and total dissolved solids (TDS). Results obtained showed that the soil LVE with increasing doses of vinasse also decreased the values of hydraulic conductivity, and for the LR soil and NVE values of this parameter increased with increased doses. In the runoff no significant effect on the factors under study, showing that the doses did not contribute to the increase in runoff as was supposed.

Keyword: Clay dispersion; Potassium; Soil permeability; Sugarcane; Fertirrigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição dos tratamentos, sendo $D_1 = 150$, $D_2 = 300$, $D_3 = 450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e V_1 – IAC87-3396, V_2 – SP3250 e V_3 – RB86-7515.....	39
Figura 2 - (a) Gradagem, (b) aração, (c) caixas d'água para coleta do run off, (d) vista de um bloco, (e) detalhe das parcelas e (f) fim de cada parcela e conexão com a caixa d'água.	39
Figura 3 – (a) Conexão no final de cada parcela e (b) rebolos (toletes) plantados.	40
Figura 4: (a) Área próxima da usina com aproximadamente 30 anos de aplicação de vinhaça e (b) área mais afastada com aproximadamente 15 anos de aplicação.	44
Figura 5 – (a) Colunas de PVC, (b) alimentação do sistema com água e dreno extravasor da coluna e (c) estrutura montada para avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado.....	45
Figura 6 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Latossolo Vermelho-Escuro (LVE). Piracicaba, SP, 2009.....	49
Figura 7 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Latossolo Roxo (LR). Piracicaba, SP, 2009	50
Figura 8 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Nitossolo Vermelho Eutrófico (NVE). Piracicaba, SP, 2009.....	50
Figura 9 – Perda de água por escoamento superficial em relação as doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico (A) 1º Evento e (B) 2º Evento. Piracicaba, SP, 2009	54
Figura 10 – Perda de solo por escoamento superficial em relação as doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico (A) 1º Evento e (B) 2º Evento. Piracicaba, SP, 2009	55
Figura 11 – Perda de potássio (A) e sólidos dissolvidos totais (B) por escoamento superficial em relação as doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico. Piracicaba, SP, 2009	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (GLÓRIA E ORLANDO FILHO, 1984)	21
Tabela 2 – Características físicas do solo da área experimental.....	38
Tabela 3 – Análise química do solo da área experimental	38
Tabela 4: Análise química dos elementos presente na vinhaça utilizada neste estudo	41
Tabela 4: Data e precipitação durante o tempo do Experimento I	42
Tabela 5 - Características físicas do solo da área experimental	44
Tabela 6 - Análise química do solo da área experimental.....	44
Tabela 7 – Quadro de análise de variância para condutividade hidráulica do solo saturado em colunas de PVC	48
Tabela 8 – Valores médios da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) para cada tipo de solo	48
Tabela 9 – Análise química das amostras composta de cada tratamento	51
Tabela 10 – Quadro de análise de variância para perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva).....	52
Tabela 11 – Quadro de análise de variância para perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva).....	52
Tabela 12 – Valores médios da perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (1ºEvento de chuva).....	53
Tabela 13 – Valores médios da perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva).....	53
Tabela 14 – Quadro de análise de variância para perda de solo no em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva).....	54
Tabela 15 – Quadro de análise de variância para perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva).....	54
Tabela 16 – Valores médios da perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva).....	55
Tabela 17 – Valores médios da perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva).....	55

Tabela 18 – Quadro de análise de variância para perda de potássio em solo cultivado com cana-de-açúcar	56
Tabela 19 – Quadro de análise de variância para perda de sais em solo cultivado com cana-de-açúcar	56
Tabela 20 – Valores médios da perda de potássio em solo cultivado com cana-de-açúcar.....	57
Tabela 21 – Valores médios da perda de sais em solo cultivado com cana-de-açúcar.....	57

1 INTRODUÇÃO

A produção de cana-de-açúcar, para a produção de álcool combustível, tem aumentado nos últimos anos, devido, principalmente, a procura de fontes de energia que diminuam a emissão de gases causadores do efeito estufa, como os combustíveis fósseis. Porém, a produção do açúcar e do álcool produz resíduos líquidos que podem poluir o meio ambiente e causar desastres ecológicos, caso não sejam tratados antes de serem despejados nos cursos d'água.

Em 2005, o Estado de São Paulo foi o maior produtor de cana-de-açúcar, sendo responsável por 60,2% da produção nacional, apresentando um crescimento de 6,4% na produção, principalmente pelo fato de possuir maior área colhida, ultrapassando os 3 milhões de hectares, um aumento de 4,5% em relação ao ano anterior (IBGE, 2006). Por ser o maior produtor de álcool e açúcar, conseqüentemente, é o maior gerador de resíduos líquidos, tais como, a água de lavagem da cana, a água das colunas barométricas, água de refrigeração entre outros.

O resíduo que mais chama atenção é a vinhaça, pelo seu grande volume produzido e por seu valor agrícola como fertilizante. Por exemplo, para cada tonelada de cana-de-açúcar esmagada ocorre a geração de 1066 litros de vinhaça, 82 litros de álcool e 90 quilos de açúcar; assim, em média, para cada litro de álcool produzido tem-se 13 litros de vinhaça como resíduos. A prática mais comum para a utilização deste rejeito é a fertirrigação, devido à presença de nutrientes essenciais (sais) à planta, tal como o potássio. Ou seja, a aplicação da vinhaça implica na adição de sais no perfil do solo.

O efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre, basicamente, pela interação eletroquímica existente entre os cátions presente na solução e a fração argila. A característica principal deste efeito é a expansão da argila quando úmida e a contração quando seca, devido principalmente com o excesso de sódio trocável. Se esta expansão for exagerada, poderá ocorrer a fragmentação das partículas, causando a dispersão da argila e modificando a estrutura do solo. De modo geral, estes solos apresentam problemas de permeabilidade e qualquer excesso de água causará encharcamento na superfície do solo, prejudicando o crescimento da cultura por falta de aeração e aumentando os riscos de erosão do solo pelo escoamento superficial.

Os processos de infiltração de água no solo, projetos de irrigação e drenagem, as perdas de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação estão geralmente relacionados ao fluxo de água no solo, o qual influencia todo o processo de utilização dos recursos solo e água.

Dentre as variáveis que influenciam este fluxo, a condutividade hidráulica do solo destaca-se pela sua importância, pois ela é um parâmetro que representa a facilidade com que o solo conduz a água. De um modo geral, quanto maior a condutividade hidráulica, maior será a “facilidade” com que a água se move no solo. O valor máximo da condutividade hidráulica ocorre quando o solo encontra-se saturado, e é denominado de condutividade hidráulica do solo saturado.

Entre as propriedades que influenciam a condutividade hidráulica estão a textura, a densidade do solo, a estabilidade estrutural, a composição da solução do solo e do complexo de troca, a expansibilidade, a atividade microbiana e a possível presença de ar que possa bloquear a passagem do fluido.

Portanto, a vinhaça pode influenciar diretamente a condutividade hidráulica do solo, pois ela possui alta quantidade de íons que interferem na composição da solução do solo e no complexo de troca e na expansibilidade, além de influenciar na textura, densidade e estabilidade estrutural devido a grande presença de matéria orgânica. Pode até afetar a atividade microbiana devida sua origem tida como “extrato de levedura” diluído que favorece o desenvolvimento de microorganismo. Porém estes efeitos podem ser benéficos ou danosos.

Em relação, aos efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades físicas do solo, principalmente, no que diz respeito à condutividade hidráulica do solo saturado, não há um acordo unânime entre as pesquisas.

Apesar de nos dias atuais já existirem muitos resultados experimentais, no que diz respeito ao reaproveitamento da vinhaça, fica claro, que muito há o que se estudar. Este reaproveitamento no solo não dispõe ainda de informações suficientes para viabilizar com total segurança o seu uso no que diz respeito às questões ambientais.

Então, diante do exposto, partindo do suposto efeito dispersivo do potássio nas partículas de argilas e seus efeitos depreciativos no solo, em relação à sua permeabilidade, essa pesquisa traz como objetivo a necessidade de se averiguar este possível efeito da vinhaça nas propriedades físicas do solo, e principalmente, na condutividade hidráulica do solo saturado, por se tratar de uma característica importante para o processo de infiltração de água no solo.

1.1 Hipóteses

H_0 = A vinhaça não influencia de forma negativa a condutividade hidráulica do solo saturado, não a diminuindo nem causando um aumento de escoamento superficial de água no solo.

H_1 = Com o aumento da dose de vinhaça aplicada em colunas de solo ocorrerá a diminuição da condutividade hidráulica do solo saturado, e também, com o aumento desta ocorrerá o incremento de perda de água, solo e nutrientes causado pelo escoamento superficial (“run off”), devido à possível dispersão das partículas de argila causada pelo íon potássio presente na vinhaça.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Vinhaça

2.1.1 Composição química

A vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107 °C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, qualidade esta que está relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez, provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada, liberando gases fétidos que tornam os ambientes insuportáveis (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Este principal efluente das destilarias de álcool é também conhecida pelos nomes de vinhoto, restilo, garapão, vinhote, caxixi, mosto, vinasse, stillage, etc (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A composição química da vinhaça de cana-de-açúcar é variável e depende da composição do vinho utilizado, e este da natureza e da composição da matéria-prima, do sistema utilizado no preparo do mosto, do método de fermentação adotado e do sistema de condução da fermentação alcoólica, da raça de levedura utilizada, do tipo de aparelho destilatório empregado, da maneira de destilação e do tipo de flegma separado (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984).

Mosto, por definição, são todos os líquidos suscetíveis de sofrer fermentação; vinho são os líquidos já fermentados, e vinhaça é o resíduo líquido da destilação dos vinhos. A composição média química da vinhaça está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (GLÓRIA E ORLANDO FILHO, 1984)

Elementos	Vinhaça de mosto		
	de melação	misto	de caldo
N (kg m ⁻³)	0,77	0,46	0,28
P ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	0,19	0,24	0,20
K ₂ O (kg m ⁻³)	6,00	3,06	1,47
CaO (kg m ⁻³)	2,45	1,18	0,46
MgO (kg m ⁻³)	1,04	0,53	0,29
SO ₄ (kg m ⁻³)	3,73	2,67	1,32
Matéria orgânica (kg m ⁻³)	52,04	32,63	23,44
Fe (ppm)	80,00	78,00	69,00
Cu (ppm)	5,00	21,00	7,00
Zn (ppm)	3,00	19,00	2,00
Mn (ppm)	8,00	6,00	7,00
pH	4,40	4,10	3,70

Apesar da grande variabilidade em sua composição química, em termos gerais, a vinhaça apresenta altos valores de matéria orgânica e de potássio, seguindo-se do cálcio e sulfato (teores razoáveis), do nitrogênio, fósforo e magnésio (baixos teores). Em relação aos micronutrientes, o ferro aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco, em pequenas concentrações (FREIRE; CORTEZ, 2000).

2.1.2 Efeito sobre o solo

As opiniões são variadas quando se diz respeito à aplicação da vinhaça no solo, algumas predizem os riscos da salinidade e do colapso da estrutura do solo em pouco tempo. Enquanto, outras negligenciam tais riscos.

A preocupação com os efeitos da vinhaça sobre o solo data das primeiras décadas do século passado, como constatado em Ross e Froberville (1928). Além de autores, tais como, Almeida et al. (1950), Almeida (1952), Ranzani (1955 e 1956) e Valsechi (1955), os quais são considerados os pioneiros no Brasil.

Ross e Froberville (1928), em Natal (África do Sul), buscando uma solução para a destinação dos efluentes líquidos das destilarias de álcool, afirmaram que qualquer tendência para a formação de poças d'água, deve ser combatida imediatamente, do contrário, os poros serão obstruídos, a percolação será sustada trazendo resultados danosos à cultura e ao solo.

Indícios deste mesmo fenômeno foram relatados por Almeida et al. (1950), quando estes avaliaram o efeito da vinhaça in natura e neutralizada com cal, nas doses de 50, 100, 250, 500, 1000 m³ ha⁻¹, em amostras de solos arenosos. Verificaram que a penetração da vinhaça foi muito lenta em ambos os tratamentos. As últimas doses necessitaram de 35 dias para incorporação total. Além desses resultados, os autores verificaram que o poder de embebição das amostras aumentou progressivamente com a dosagem de vinhaça e que, ao contrário do que se pensava, este resíduo melhorava as propriedades físicas do solo.

Almeida (1952) estabeleceu que as doses de vinhaça a serem aplicadas nos solos paulistas deveriam ser de 500 a 1000 m³ ha⁻¹. Salientava que essas deveriam crescer à medida que os solos apresentassem baixa fertilidade.

Valsechi e Gomes (1954), em um experimento conduzido em vasos, estudaram o efeito da aplicação da vinhaça nas seguintes doses: 0, 250, 500, 750 e 1000 m³ ha⁻¹. Concluíram que

elevadas doses de vinhaça aplicadas aos solos colaboram para o aumento da capacidade de troca catiônica e na porcentagem de saturação de bases. Observaram também que a elevação do índice de pH do solo tende a se estabilizar com doses mais elevadas.

Almeida (1955) ressaltava novamente os efeitos positivos da aplicação da vinhaça sobre as propriedades físicas de um solo, notadamente sobre o aumento do seu poder de embebição e como elemento de controle da erosão.

Ranzani (1956) utilizou as mesmas condições de Almeida et al. (1950) e verificou que o volume total de poros aumentou, diminuiu o limite inferior de água disponível, aumentou a capacidade de retenção de água, salientando que houve poucas modificações na permeabilidade do solo.

Os efeitos da vinhaça sobre algumas propriedades físicas do solo, tais como: graus de flocculação das partículas, retenção de água, porosidade e condutividade hidráulica, também foram estudados por Rezende (1979). Este autor realizou um experimento em campo, num solo de textura franco argilo arenosa, utilizando-se dois períodos de incubação (60 e 120 dias) e doses de 0 a 420 m³ ha⁻¹, variando em 60 m³ ha⁻¹ cada dose. O autor admitiu que o estado de flocculação das partículas do solo não se modificou; não houve modificação significativa na capacidade de retenção de água no solo, houve elevação da pressão osmótica da solução do meio, principalmente nos primeiros centímetros do perfil do solo e nenhuma modificação significativa na porosidade do solo (porosidade total, macro e microporosidade). E ainda, devido à inconsistência dos resultados relativos ao efeito da vinhaça sobre a condutividade hidráulica, o referido autor não chegou a uma conclusão significativa a este respeito.

Fontes (1982), em estudo relativo ao efeito da aplicação da vinhaça suplementada com fosfato monoamônico e superfosfato triplo na cultura da mandioca, observou que os teores médios de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio tiveram seus valores aumentados significativamente no solo. Observou ainda que houve aumento da porosidade total e da CTC do solo. Em relação à densidade aparente, equivalente de umidade e grau de flocculação do solo, afirmou não ter havido alteração significativa com a aplicação do referido efluente.

Camargo, Valadares e Geraldo (1983) observaram que a agregação em Latossolo Vermelho-Escuro, textura média, que havia recebido vinhaça, foi maior que a testemunha. Salientaram que isso seria devido ao aumento de matéria orgânica e sua “metabolização” por

organismos. Observaram ainda que não houve alteração no teor de água disponível em solos tratados com vinhaça.

De acordo com Ribeiro; Sengik; Novais (1983), normalmente se aceita, embora com base em reduzido número de dados experimentais, que a vinhaça tenha efeito dispersante sobre a argila do solo, o que pode resultar na compactação deste. Na busca de resposta para tal afirmativa, esses autores avaliaram o efeito em amostras de argila de latossolos, em condições de laboratório. Em comparação com a água, as vinhaças atuaram como flocculantes, nos solos de texturas mais argilosas, e como dispersante nos solos de textura mais arenosa. Os resultados sugerem que o efeito da vinhaça na dispersão e flocculação da argila segue em linhas gerais os modelos clássicos, dependendo da concentração e do balanço de cátions nas vizinhanças, além da natureza da fração de argila. Ribeiro e Sengik (1983), nas mesmas condições experimentais, concluíram que tanto no Latossolo Vermelho-Amarelo quanto no Latossolo Vermelho-Escuro, as menores doses promoveram flocculação da argila, ao passo que as maiores provocaram dispersão; no Latossolo Vermelho-Escuro, porém, estes efeitos foram menos evidentes.

2.1.3 Dinâmica da vinhaça nos solos

Segundo Freire e Cortez (2000), a massa específica da vinhaça in natura é muito próxima a da água limpa. Por esse motivo pode-se, então, utilizar dados disponíveis da Hidráulica na literatura clássica para fins de projeto de bombeamento da vinhaça.

Coutinho Júnior e Domingos (1981) comparando os valores de penetrabilidade para água pura e água da vinhaça infiltrada em colunas de solo no horizonte B de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, verificaram que as equações de difusividade e da penetrabilidade podem ser utilizadas na descrição do processo de infiltração horizontal da água da vinhaça nos solos. Verificaram também que, para um mesmo valor de temperatura (40°C), a variação de penetrabilidade para a infiltração de água e vinhaça foi de 55%.

Della Libera e Corsini (1982) citados por Andrioli (1982), utilizando amostras de horizonte Ap de solo Podzolizado Lins e Marília var Marília, concluíram também que as equações empíricas que descrevem o processo de infiltração do referido sub-produto apresentam coeficientes dependentes da sua temperatura inicial.

Silva, Okura e Freire (1982) em estudos de caracterização de propriedades físicas da vinhaça e do seu processo de infiltração horizontal em diferentes solos, afirmam também que as equações normalmente usadas para descrever o processo da difusão em solo não saturado descreve também o processo de difusão da vinhaça. Verificaram ainda que infiltrações repetitivas de vinhaça em Latossolo Vermelho Amarelo promoveram uma acentuada diminuição nos valores de penetrabilidade. No que se refere às propriedades físicas, observaram que a densidade e a viscosidade variam com a temperatura, e que no intervalo de 17 à 50°C a densidade é função linear da temperatura.

2.2 Aspecto físico-químico do solo

2.2.1 Lei de Coulomb

A Lei de Coulomb trata do princípio fundamental da eletricidade. Em particular, diz que o módulo da força entre duas cargas elétricas puntiformes (q_1 e q_2) é diretamente proporcional ao produto dos valores absolutos (módulos) das duas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância (d) entre elas (eq. 1).

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (1)$$

em que: q_1 e q_2 - cargas elétricas puntiformes, C;

d - distância entre elas, m;

ϵ - permissividade do meio, $C N^{-1} m^{-2}$.

Esta força pode ser atrativa ou repulsiva dependendo do sinal das cargas. É atrativa se as cargas tiverem sinais opostos. E será repulsiva quando as cargas tiverem o mesmo sinal.

2.2.2 Força de Van der Waals-London

Força de Van der Waals é aquela existente entre moléculas neutras ou apolares e, portanto, não depende de um excesso de carga elétrica. Antes do advento da mecânica quântica, a

atração entre moléculas era explicada pela física clássica como uma atração eletrostática entre pólos opostos de moléculas bipolares ou um dipolo induzido.

Segundo Kirkham e Powers (1972), London usou a mecânica quântica, em 1930, para obter uma expressão quantitativa da força de Van der Waals que passou a ser denominada de Força de Van der Waals-London. Esta força atrativa ocorre porque os elétrons de um átomo oscilam de tal modo (10¹⁵ a 10¹⁶ Hz) que o fazem rapidamente flutuar como átomo bipolar o qual, por sua vez, polariza um átomo adjacente resultando em uma atração entre eles.

A força de atração (F) gerada entre os átomos varia inversamente com a sétima potência da distância (eq. 2).

$$F \propto \frac{1}{d^7} \Rightarrow F = \frac{1}{d^7} \quad (2)$$

Isto é, atua num campo menor que 100 Å (Angstroms). Isto significa que a uma distância superior a 100 Å um átomo não pode polarizar outro átomo.

Verweg e Overbeek (1948) afirmam que essas forças são aditivas, ou seja, no caso das partículas coloidais do solo que possuem muitos átomos, as forças atrativas entre elas podem ser muito grandes. Segundo Adamson (1960), as forças atrativas entre as partículas coloidais, laminar e esférica, variam segundo o inverso da distância entre elas elevadas da terceira à sétima potência. Assim, as forças atrativas entre partículas coloidais atuam a uma maior distância do que entre átomos individuais.

Sabe-se que as forças de Van der Waals-London exercem papel desprezível relativo à atração água-argila e água-água, porém essa força é muito importante para a floculação de partículas de argila no sistema solo-água (FERREIRA, 1997).

2.2.3 Dupla camada elétrica

Quando uma partícula coloidal de argila está relativamente seca, os cátions neutralizantes estão fortemente presos a superfície, e quando úmida alguns íons se dissociam e entram na solução do solo. Uma partícula coloidal hidratada de argila ou húmus forma uma miscela, na qual os íons adsorvidos estão espacialmente separados, a uma maior ou menor distância em relação à miscela carregada negativamente. Junto da superfície da miscela agindo como um ânion múltiplo e o aglomerado de cátions flutuando ao seu redor, formando uma camada dupla elétrica.

Os cátions fortemente adsorvidos formam uma camada relativamente fixa junto à superfície da partícula, conhecida como Camada de Stern, e os cátions que se difundem a maiores distâncias, relativamente à superfície das partículas, formam a camada difusa, cuja concentração é decrescente na medida em que a distância à partícula aumenta. Juntas formam a Camada Dupla Difusa. A qual decorre do equilíbrio entre duas tendências opostas:

- I. Atração eletrostática das cargas negativas da micela para com os cátions, a qual tende a puxá-lo para junto da partícula (Lei de Coulomb);
- II. e o movimento cinético (Browniano) das moléculas, induzindo no sentido da difusão dos cátions adsorvidos, isto é, no sentido de igualar a concentração através da fase líquida.

O tratamento teórico da camada dupla difusa eletrostática tem sido fundamentado na Teoria de Gouy-Chapman, segundo a qual as cargas negativas são consideradas constantes e uniformemente distribuídas sobre a superfície da micela. A força conseqüente das cargas superficiais da partícula é proporcional à densidade de carga.

A espessura da dupla camada difusa é estimada pela equação:

$$z = \frac{1}{e v} \sqrt{\frac{\epsilon k T}{8 \pi n_0}} \quad (3)$$

em que: z - espessura da camada, Å;

e - carga elementar de um elétron, $4,77 \cdot 10^{-10}$ esu;

v - valência do íon em solução;

ϵ - constante dielétrica;

k - constante de Boltzmann ($k=R/n$, onde R é a constante dos gases e n é o número de Avogadro);

T - temperatura, K;

n_0 - concentração de íons na solução ambiente, íons cm^{-3} .

De acordo com esta equação, o valor de z varia inversamente com a valência do íons e com o inverso da raiz quadrada da concentração. Por exemplo, se uma solução de cátions monovalentes for substituída por outra de cátions bivalente, a camada dupla reduzirá à metade do seu valor inicial. Por outro lado, aumentando-se em 4 vezes a concentração da solução ambiente, a espessura da camada difusa ficará reduzida à metade.

2.2.4 Floculação e dispersão

Os solos contêm grandes quantidades de cátions, tanto adsorvidos quanto em solução; predominantemente há presença de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K). A origem e os mecanismos no qual os íons entram na solução do solo incluem: introdução de água contendo sais pela irrigação e ascensão capilar, fertilizantes, intemperismo primário e secundário dos minerais no solo, hidrólise iônica e decomposição da matéria orgânica. A importância de cada origem dependerá do tipo do solo e do manejo agrícola.

O efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre, basicamente, pela interação eletroquímica existente entre os cátions presentes na solução e a argila. A característica principal deste efeito é a expansão da argila quando úmida e a contração quando seca, devido principalmente ao excesso de sódio trocável. Se esta expansão for exagerada, poderá ocorrer a fragmentação das partículas, causando a dispersão da argila e modificando a estrutura do solo. De modo geral, estes solos apresentam problemas de permeabilidade e qualquer excesso de água causará encharcamento na superfície do solo prejudicando o crescimento da cultura por falta de aeração e aumentando os riscos de erosão do solo pelo escoamento superficial.

Quanto maior a carga, maior também será a força de atração, razão pela qual os cátions bivalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) são atraídos pela superfície da argila com maior força eletrostática que os monovalentes (Na^+ e K^+).

A força de atração entre as cargas oposta (positiva e negativa) é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as cargas, ou seja, quanto maior o raio iônico, menor será a espessura da dupla camada, porém a hidratação dos cátions é um fator importante a se considerar quando se refere ao raio iônico, por exemplo, o potássio que possui um raio iônico não hidratado de $1,33\text{Å}$ (angstrom) passará a ter um raio de $5,32\text{Å}$ quando hidratado, sendo que o cátion bivalente magnésio possui um raio hidratado de $5,37\text{Å}$.

Quando as partículas da argila interagem, podem atuar tanto forças de atração quanto forças de repulsão. Isto dependerá das condições físicas e químicas. Se a dupla camada possuir espessura maior do que a distância sobre a qual a força de Van der Waals-London, então a força repulsiva dos cátions das duas camadas duplas irão prevalecer e as partículas de argila serão mantidas distantes entre si ou dispersas.

Essa expansão da dupla camada causa o fechamento dos poros interagregados reduzindo a condutividade hidráulica do solo; além disso, a obstrução dos poros reduz também a permeabilidade à água e ao ar, podendo reduzir o rendimento da cultura e aumentar os riscos de erosão do solo.

2.3 Efeito do íon potássio no solo

Existem algumas evidências que argilas montmorilonita saturadas de potássio não se comportam como prediz a teoria da dupla camada. De acordo com Rowell (1963), a montmorilonita saturada de sódio é bastante dispersa e na expansão se apresenta como um gel homogêneo, enquanto no caso do potássio este gel não é homogêneo, existindo várias regiões onde as partículas não se expandem, mas seu comportamento se equivale ao comportamento da illita.

Estudando o efeito de vários cátions na estabilidade de agregados, Ahmed; Swindale; El-Swaif (1969) concluíram que a porcentagem de agregados estáveis foi afetada por quatro cátions ordenados em $Ca = Mg > K > Na$. Seus resultados confirmaram que o Na é o íon mais deletério e o íon K tem um efeito intermediário. Martin e Richards (1959) também encontraram que aumentando ligeiramente o nível de K pode-se reduzir a agregação do solo.

O limite líquido, grau de dispersão e retenção de umidade para um solo montmorilonítico é também dependente no tipo de cátion trocável (EL-SWAIFY; AHMED; SWINDALE, 1970). Em contraste com estabilidade agregado, os efeitos de cátions trocáveis na saturação, seguem a ordem $Na > Mg = Ca > K$. O efeito benéfico de K foi explicado assumindo que os íons de K em um sistema homoiônico é parcialmente fixo. Porém, em misturas de cátions, e particularmente onde o PPT (porcentagem de potássio trocável) é menor que 50, o efeito da fixação não é aparente e o K se comporta como um cátion de monovalente como predito pela regra de Schulze-Hardy.

Estudando a retenção de umidade de um solo de “grumusol” (montmorilonita) a dois níveis de PPT (4 e 25), Ravina e Markus (1975) acharam que a umidade do solo com o maior nível de PPT é maior do que o nível mais baixo na amplitude de 0-6 atm, e a mudança nas umidades com pressões crescentes é mais gradual nos solos com o PPT mais alto. Eles também encontraram que entre a saturação e uma sucção de 150 cm água, mais água escoou do solo onde o

PPT é mais alto em relação ao mais baixo. Isto indicou-lhes que o K adsorvido melhora a aeração neste solo.

Desde que o aumento da PPT fora associado, principalmente, com o decréscimo de Mg e Ca adsorvidos; estas melhoras nas propriedades físicas do solo contradiz o que foi dito anteriormente. Isto indica que os efeitos do K trocável nas propriedades do solo não são compreendidos o bastante.

A permeabilidade das argilas à água varia intensamente, dependendo dos cátions trocáveis. Em K-Ca caolinita, Elgabaly e Elghamry (1970), com o aumento do K^+ como complemento para o íon Ca^{2+} , encontraram o decréscimo da permeabilidade, mas sempre permanecendo acima do valor da permeabilidade das argilas Na-Ca. A uma PPT de 15, a permeabilidade foi reduzida para um quarto em relação ao Ca-saturado, enquanto que abaixou 21 vezes quando o K foi substituído por Na ao mesmo nível de Ca. A diminuição da permeabilidade foi pronunciada até mesmo quando foram testados argilas homoiônicas. A permeabilidade da caulinita K-saturado foi 14 vezes menor que o do sistema Ca-saturado, considerando que a argila Na-saturado foi 950 vezes menor. Concluiu-se que a permeabilidade do solo também é sensível ao tipo de íon trocável. Quirck e Schofield (1955) afirmaram que uma lama siltosa que contém caulinita, ilita e vermiculita requereu concentrações de eletrólito diferentes para cátions adsorvidos diferentes, para manter uma permeabilidade satisfatória. A concentração requerida decresce na ordem $Na > K > Ca$. Com bases nas observações deles definiram a concentração limiar de sal que causa uma diminuição de 10 a 15% na permeabilidade do solo, e propôs usando isto, em combinação com equações de troca de íon, para predizer o efeito de água de irrigação na permeabilidade do solo.

Conforme Quirck e Schofield (1955); Ahmed, Swindale e El-Swaif (1969) encontraram, para dois solos tropicais, que o efeito da saturação de cátion na condutividade hidráulica seguiu a sucessão $Ca > K > Na$. Martin e Richards (1959) também acharam que o acréscimo de K reduziu a condutividade hidráulica em comparação com o solo-Ca. Em contrapartida, a taxa de infiltração em um solo “grumusol” (solo montmorilonítico) foi aumentada quando os níveis de PPT aumentaram de 4 a 26 (RAVINA e MARKUS 1975).

Os resultados indicam que em alguns solos o K leva uma posição de intermediário (entre Na e Ca), porém em outros solos o K melhora a permeabilidade (em comparação com solo-Ca). Ou seja, o efeito prejudicial ou benéfico da alta concentração do potássio no solo ainda não tem

uma teoria consolidada, apenas pode-se dizer que, a fixação do potássio é um possível mecanismo que interfere na permeabilidade do solo.

2.4 Condutividade hidráulica

Em 1856, o engenheiro hidráulico Henry Darcy, estudando o processo de infiltração vertical de água em filtros (colunas) de areia homogênea, sob condições de saturação, concluiu que a vazão (Q), isto é, o volume de solução que passa pela coluna por unidade de tempo, é proporcional à área (A) de sua seção transversal, à diferença de carga piezométrica através do filtro ($h_1 - h_2$), e inversamente proporcional ao seu comprimento (L), o que originou a primeira equação, denominada Lei de Darcy, que possibilitou a quantificação do movimento da água em meios porosos saturados (eq. 4):

$$Q = K A \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (4)$$

sendo K uma constante de proporcionalidade.

A constante K diz respeito à maior ou menor facilidade de movimento do líquido através do meio poroso, isto é, para um filtro constituído de areia grossa, o valor de K deve ser maior do que para um filtro de areia fina, permanecendo constantes os demais termos da equação. Portanto, K, é uma variável do meio, que traduz a rapidez com que determinado líquido o atravessa e foi denominada por Darcy de condutividade hidráulica (REICHARDT, 1990; LIBARDI, 2005).

Em meios porosos não saturados, a primeira modificação da equação de Darcy foi feita, em 1907, por Buckingham, que considerou a condutividade hidráulica como uma função da área do espaço poroso do solo não ocupado por ar, tornando-se dependente, portanto, do conteúdo de água do meio e do gradiente de potencial. Richards (1928) definiu um potencial total como força motriz para o movimento da água no solo que considera a influência da matriz do solo e da gravidade. A equação geral que descreve o movimento de água nos solos é dada pela (eq. 5):

$$\vec{q} = -K(\theta) \overline{\text{grad}}\phi_t \quad (5)$$

em que q é o vetor densidade de fluxo, K(θ) a condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica (θ) e $\overline{\text{grad}}\phi$ o vetor gradiente de potencial total. O produto dos fatores, condutividade hidráulica e gradiente de potencial total é que determina, portanto, o fluxo de água no solo.

Para um dado solo, a condutividade hidráulica (K) é tanto maior quanto maior sua umidade (θ). O valor máximo de K ocorre quando o solo se encontra saturado ($\theta = \theta_s$), e é denominado de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat} ou K_o). Diversos pesquisadores propuseram modelos matemáticos e metodologias para determinação da condutividade hidráulica dos solos e do fluxo de água, destacando-se os trabalhos de Gardner, 1956; Hillel, Krentos, Stylianou, 1972; Mualem, 1976; Libardi et al., 1980; Sisson, Ferguson, VanGenuchten, 1980; Jones e Wagenet, 1984, entre outros.

A equação que descreve o fluxo de água no solo é função da condutividade hidráulica (K) do solo e esta por sua vez é calculada em função da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), residindo aí a necessidade de se determinar o mais precisamente o valor de K_{sat} .

A importância de K_{sat} pode ser justificada, então, pela sua participação na determinação do fluxo de água nos solos e, do ponto de vista prático, para tomada de decisão sobre projetos de irrigação, drenagem, quantificação da erosão, lixiviação de substâncias químicas, com conseqüências na poluição e contaminação de camadas mais profundas do solo e até mesmo do lençol freático. Assim, a K_{sat} tem influência marcante nestas e na maioria de outras práticas de manejo do solo.

Os fatores complicadores que interferem na determinação do fluxo de água no solo são discutidos por Youngs (1995). Estes incluem a influência da fase gasosa; os efeitos da heterogeneidade das propriedades do solo; o fenômeno da expansão e contração; a agregação e dispersão; desvios da lei de Darcy; efeitos térmicos; e relações de histerese da água.

Entre as propriedades que influenciam a condutividade hidráulica, estão a textura, a densidade, a estabilidade estrutural, a composição da solução do solo e do complexo de troca, a expansibilidade, a atividade microbiana e a possível presença de ar que possa bloquear a passagem do fluido (HILLEL, 1970). A textura determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água e as proporções de poros de diferentes tamanhos. A estrutura determina o arranjo das partículas e assim a distribuição de poros (FERREIRA; DIAS JUNIOR, 1996). Portanto, ambas as propriedades têm influência sobre o espaço poroso do solo, sua porosidade total e distribuição de poros, dificultando em maior ou menor intensidade o movimento da água.

A condutividade hidráulica do solo saturado pode descrever o sistema poroso de um solo, englobando propriedades tais como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Têm-se utilizado seus valores para caracterizar a estrutura e a estabilidade de

agregados em água. Os maiores valores de K_{sat} são encontrados, geralmente, onde se tem um maior grau de estruturação, a qual pode ser alterado por processos de agregação das partículas e formação de macroporos, os quais dependem da textura e demais condições do solo, além das práticas culturais adotadas. Ao aumentar o grau de agregação, a distribuição dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado toma-se cada vez menos variável (ELLIES; GREZ; RAMIRES, 1997).

Em relação à granulometria, devem-se considerar influenciando a condutividade hidráulica do solo saturado, além da quantidade das partículas, também suas relações com a fase líquida do solo. Em solos com apreciável conteúdo de argila, a composição da solução do solo pode afetar significativamente a condutividade hidráulica devido a interações entre a solução e a matriz (KLUTE; DIRKSEN, 1986).

Valores de condutividade hidráulica do solo saturado de acordo com a textura dos solos são classificados por Youngs (1991) como: $< 10 \text{ mm dia}^{-1}$, solos com textura fina; $10-1000 \text{ mm dia}^{-1}$, solos com textura intermediária; $> 1000 \text{ mm dia}^{-1}$ solos com textura grosseira. Em seu estudo, Bosch e West (1998) encontraram que valores calculados de K_{sat} variaram de $0,000001944$ a $0,325 \text{ cm s}^{-1}$ e as diferenças estatísticas entre resultados de K_{sat} coincidiram com a textura do solo, encontrando menor valor de K_{sat} em sítios mais argilosos.

Nielsen, Biggar e Erh (1973) encontraram também grande variabilidade para o tamanho de partículas (textura), pressão da água no solo, densidade, e condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado.

2.5 Processo erosivo e erosão hídrica

A erosão consiste no processo de desprendimento e arraste das partículas do solo causado pela ação da água e do vento, constituindo a principal causa de degradação das terras agrícolas. Quanto ao tipo de agente causador, a erosão pode ser classificada em eólica ou hídrica. Na erosão eólica, o agente responsável pelo processo erosivo é o vento, enquanto na erosão hídrica é a água.

Segundo Barroso e Silva (1992), o processo erosivo também causa problemas em cursos e reservatórios d'água, podendo-se destacar: redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios devido à sedimentação de material transportado; redução do potencial de geração de energia elétrica; elevação dos custos de tratamento da água; desequilíbrio no balanço de oxigênio

dissolvido na água, proporcionando prejuízos para o crescimento de espécies aquáticas; e aumento dos custos de dragagem dos cursos e reservatórios d'água.

O processo erosivo constitui-se na principal causa de degradação dos solos, trazendo como consequência, prejuízos ao setor agrícola e ao meio ambiente, com reflexos não só econômicos, mas também sociais. Dentre os prejuízos causados pela erosão, provavelmente o mais maléfico seja a própria perda de solo, uma vez que a natureza leva cerca de 100 anos para formar uma camada de solo de 1 cm de espessura (BENNETT, 1955), a qual, muitas vezes, poderá ser perdida com uma única chuva.

Para Amaral (1984), não se estará fazendo uso racional do solo quando os dois princípios básicos da agricultura, quais sejam a mecanização e a conservação do solo, não estiverem aliados equilibradamente no interesse imediatista da produção, com os cuidados exigidos para a conservação de sua fertilidade.

A chuva é o fator climático de maior importância na erosão hídrica do solo, devido à ação erosiva provocada pelo impacto das gotas e pelo escoamento superficial produzido. Os solos, em geral, possuem variabilidade espacial muito grande das suas propriedades químicas, físicas e morfológicas. Com isso, é esperado que o seu comportamento em relação ao processo erosivo seja bastante diferenciado. Entretanto, quanto menores a estabilidade dos agregados e a capacidade de infiltração da água no solo, maior será a suscetibilidade do solo à erosão. Solos ricos em silte e areia e pobres em matéria orgânica são mais propensos ao processo erosivo, em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação. A baixa capacidade de infiltração da água em um solo torna-o mais propenso ao escoamento superficial e, conseqüentemente, ao transporte de sedimentos. Além disso, quanto mais íngreme e longa for a encosta, tanto maior será a concentração do escoamento superficial e, por consequência, maiores devem ser a velocidade e a vazão correspondentes, o que aumentará a capacidade de transporte de sedimentos (PRUSKI, 1998).

O processo associado à erosão hídrica pode ser descrito da seguinte forma: com o início da chuva, parte do volume precipitado é interceptada pela vegetação e parte atinge a superfície do solo, provocando o umedecimento dos agregados do solo e reduzindo suas forças coesivas. Com a continuidade da ação da chuva, pode ocorrer a desintegração dos agregados, com conseqüente desprendimento de partículas menores. A quantidade de solo desestruturado aumenta com a intensidade da chuva, a velocidade e o tamanho das gotas.

As perdas de solo por erosão hídrica sofrem influência de fatores relacionados à chuva (erosividade), ao solo (erodibilidade), à topografia (comprimento e grau de declive) e ao manejo do solo (cobertura vegetal, preparo de solo, práticas conservacionistas de suporte) (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), o produto da erosividade e erodibilidade equivale à máxima perda de solo e esta perda pode ser reduzida em função de fatores topográficos ou de manejo de solo.

Além de ocasionar a liberação de partículas que obstruem os poros do solo, o impacto das gotas tende, também, a compactá-lo, ocasionando o selamento de sua superfície e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de infiltração da água. O empoçamento da água nas depressões da superfície do solo começa a ocorrer somente quando a intensidade de chuva excede à velocidade de infiltração de água no solo ou quando a sua capacidade de acumulação for excedida. Esgotada a capacidade de retenção superficial, a água começa a escoar. Associado ao escoamento superficial ocorre o transporte de partículas do solo, as quais podem sofrer deposição quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida (PRUSKI, 1997).

Juntamente com as partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas que, além de causarem prejuízos diretos à produção agropecuária, causam a poluição dos recursos hídricos. Assim, as perdas por erosão tendem a elevar os custos de produção, em vista da necessidade de aumento do uso de corretivos e fertilizantes e da redução no rendimento operacional das máquinas agrícolas (PEREIRA, 2000).

Os nutrientes existentes no solo, especialmente na sua camada superficial, são transportados tanto adsorvidos aos sedimentos do solo quanto solubilizados na água, o que faz com que este processo se torne uma das maiores fontes de poluição difusa da água (SCHAEFER et al., 2002; BERTOL et al., 2003). A estimativa prévia da quantidade de sedimentos e de nutrientes que podem ser transportados pelo escoamento superficial pode ser um indicativo dos danos que estão sendo ocasionados pela erosão hídrica ao solo.

Em média, cerca de 30% dos sedimentos perdidos por erosão hídrica chegam aos mananciais, podendo causar o comprometimento da qualidade da água e assoreamento (HERNANI et al., 2002). Os sedimentos são, provavelmente, o mais significativo de todos os poluentes em termos de sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes (MACHADO E VETTORAZZI, 2003).

BERTOL et al. (2004a e 2004b), com base em revisão bibliográfica, afirmam que as perdas de nutrientes por erosão hídrica são influenciadas pela sua concentração na água e nos sedimentos e pela perda total de água e de sedimentos por erosão. A concentração de nutrientes na água e nos sedimentos, por outro lado, varia com sua concentração no solo, a qual é influenciada pelas adubações e pela cobertura e manejo do solo. Assim, as concentrações de nutrientes no material transportado, mesmo que relativamente pequenas para alguns nutrientes, podem representar grandes quantidades de adubos perdidos em decorrência da erosão, e que devem ser adicionados ao solo para que a sua capacidade produtiva se mantenha em níveis adequados (CASSOL et al., 2002).

O solo cultivado, exposto às chuvas, recebe a maior parte da energia cinética da precipitação, quebrando os agregados e iniciando o processo de erosão. Com a destruição dos agregados, as partículas menores são transportadas e, juntamente com elas, nutrientes como o fósforo, nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio (SCHAEFER et al., 2002). O transporte de elevados teores de nutrientes pelo escoamento superficial se tornou cada vez mais comum, em virtude das grandes quantidades de adubos que vêm sendo aplicados, durante um longo período, na camada superficial do solo das lavouras (SCHICK et al., 2000; LEITE, 2004; BERTOL et al., 2004).

As precipitações pluviais são, em grande parte, as responsáveis pela geração das cargas difusas de poluição no meio rural, ou seja, aquelas geradas em extensas áreas, a partir de solos agrícolas e que chegam aos corpos de águas superficiais de forma intermitente, sendo associada aos sedimentos, carregados quando há erosão do solo, aos nutrientes (nitrogênio e fósforo), aos defensivos agrícolas e aos resíduos da criação animal (MANSOR, 2005).

A perda de nutrientes através do escoamento superficial é favorecida pela aplicação de dejetos animais na superfície do solo se comparada à sua incorporação, devido à interação que ocorre com a água da chuva (PIERSON et al., 2001). O início da perda de nutrientes pelo escoamento superficial se dá pelos processos de dessorção e dissolução dos nutrientes, originários da adubação orgânica e mineral e dos restos culturais. Estes dois processos são responsáveis pela extração dos nutrientes do solo e ocorrem a partir da interação da chuva com a superfície do solo, antes do início do escoamento superficial. As partículas finas ou colóides presentes na água do escoamento superficial podem adsorver estes nutrientes dissolvidos na água e reduzir sua concentração na forma solúvel reativa e, conseqüentemente, elevar sua concentração na forma

particulada, principalmente de nutrientes com elevada capacidade de retenção no solo, como por exemplo o fósforo. Desta forma, a reação de adsorção favorece a presença do elemento na forma particulada e a reação de dessorção a presença do elemento na forma dissolvida (SHARPLEY et al., 1994).

A perda total de nutrientes na água e nos sedimentos transportados do solo, em decorrência do escoamento superficial, depende do volume total de água e da quantidade total de sedimentos transportados, além da concentração destes nutrientes na água e nos sedimentos (SCHICK et al., 2000). Assim, as concentrações de nutrientes no material transportado, mesmo que relativamente pequenas, podem representar grandes quantidades de adubos perdidos e que devem ser adicionados ao solo para que a sua capacidade produtiva se mantenha em níveis adequados (CASSOL et al., 2002; BERTOL et al., 2004).

2.6 Material e métodos

2.6.1 Considerações gerais

Para testar os efeitos da vinhaça no solo foram feitos dois experimentos denominados Experimento I e Experimento II. No Experimento I instalou-se em campo uma estrutura com a finalidade de quantificar a perda de água e de solo por meio do escoamento superficial. No Experimento II avaliou-se o efeito de diferentes doses de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado, que é um dos parâmetros que influenciam a capacidade de erosão do solo. Em ambos os experimentos levaram-se em conta a norma técnica da CETESB P4.231 de dezembro de 2006, onde se diz que a dose máxima anual não pode exceder a $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Logo foram testadas doses iguais ou superiores a esta norma.

2.6.2 Localização e caracterização da área do Experimento I

O experimento foi conduzido na Área Experimental de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Rural, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba – SP, que tem como coordenadas $22^\circ 42' 30''$ de latitude sul e $47^\circ 30' 00''$ de longitude oeste e altitude de 576 m.

O clima, segundo classificação de Koppen, é do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido com estiagem no inverno, com precipitação pluviométrica média de 1247 mm, temperatura média mensal de 21,1° C, umidade relativa média do ar de 74% e velocidade do vento de 2,2 m s⁻¹.

O solo é classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico (série “Luiz de Queiroz”), de textura argilosa, com declividade média de 9,2%. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 – 0,20 m, para obtenção das características físicas e químicas do solo (Tabelas 2 e 3, respectivamente).

Para a condutividade hidráulica, foram coletadas 3 amostras indeformadas de solo, na profundidade de 15 cm, utilizando anéis de Uhland (1949). No laboratório, foi utilizado o permeâmetro de carga constante para medida da condutividade hidráulica do solo saturado, conforme descrito por Libardi (2005). A média das 3 amostras indeformadas de solo forneceu uma condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) de 1,52 cm h⁻¹, ou seja, uma condutividade hidráulica moderadamente lenta

Tabela 2 – Características físicas do solo da área experimental

Granulometria (%)			Classe	Densidade (g cm ⁻³)	
argila	silte	areia	Textural	global	partículas
41,23	13,68	45,09	argilosa	1,45	2,43

Tabela 3 – Análise química do solo da área experimental

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	CTC
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³					
5,1	27	6	6,9	29	11	28	46,9	74,9

2.6.3 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento utilizado foi em blocos casualizados com 9 tratamentos e 3 repetições, num arranjo fatorial de 3x3. Os tratamentos foram constituídos pela combinação de dois fatores: três doses de vinhaça ($D_1 = 150$, $D_2 = 300$ e $D_3 = 450$ m³ ha⁻¹) e três variedades de cana-de-açúcar (V_1 – IAC87-3396, V_2 – SP3250 e V_3 – RB86-7515). O arranjo dos tratamentos, distribuídos aleatoriamente nas parcelas estão dispostos na Figura 1.

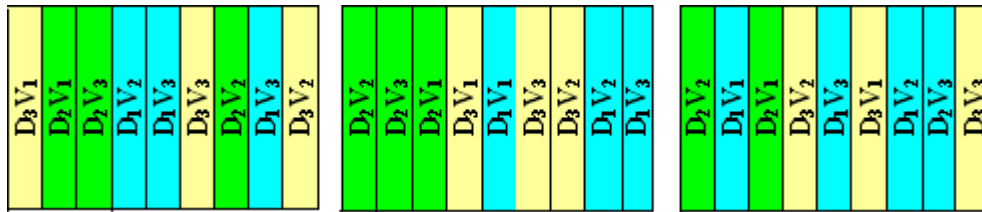


Figura 1 – Disposição dos tratamentos, sendo $D_1 = 150$, $D_2 = 300$, $D_3 = 450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e V_1 – IAC87-3396, V_2 – SP3250 e V_3 – RB86-7515

2.6.4 Instalação do Experimento I

As atividades de instalação ocorreram de Agosto a Setembro de 2008, nas quais foram realizadas as seguintes etapas: preparo do solo (gradagem, terraplanagem e aração), delimitação das parcelas experimentais, acomodação das caixas d'água (em um nível abaixo das parcelas), conexão da parcela à caixa d'água com tubos de PVC de 2 polegadas (Figura 2).

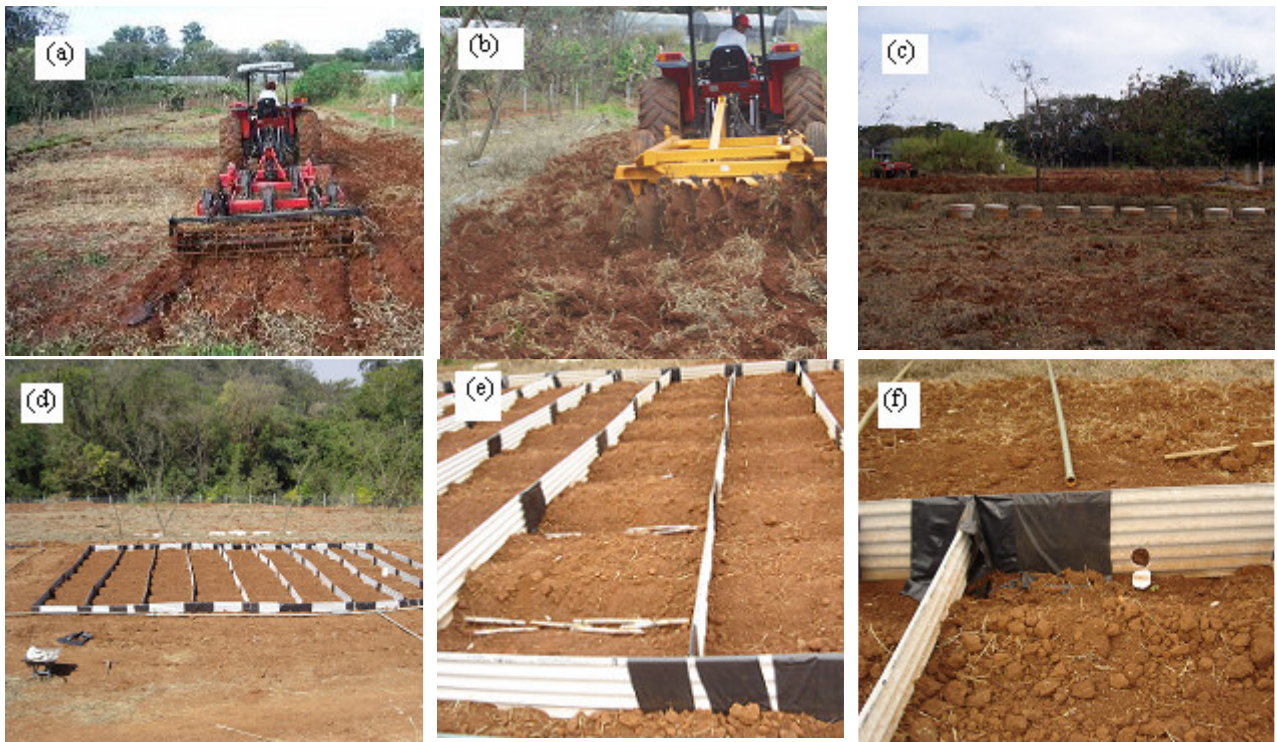


Figura 2 - (a) Gradagem, (b) aração, (c) caixas d'água para coleta do run off, (d) vista de um bloco, (e) detalhe das parcelas e (f) fim de cada parcela e conexão com a caixa d'água

As 27 parcelas experimentais foram montadas diretamente no campo utilizando telha de fibrocimento (“eternit”), sendo 3 blocos com 9 parcelas, cada uma medindo 12 m de comprimento por 1,5 m de largura, estando o comprimento da parcela no sentido de maior declividade do terreno.

As 27 caixas d’água de 500 litros foram niveladas em terreno de chão batido, com desnível aproximado de 1 metro em relação à área das parcelas. Assim que dispostas foram escolhidas uma caixa de cada bloco para a calibração de sua altura em relação ao volume, colocando-se um volume conhecido de 10L de cada vez e medindo sucessivamente a altura da lâmina d’água com ajuda de uma trena até 450L, plotando-se um gráfico Volume x Altura. De posse desta curva utilizou-se a mesma trena para a avaliação do volume coletado em cada caixa.

O tubo de PVC, que leva por gravidade o escoamento superficial gerado na parcela para a caixa d’água, foi conectado ao final da parcela, por um furo na telha e colado com cimento para não permitir vazamentos Figura 3a.

Para o plantio da cana foram abertos sulcos de 30 cm de profundidade com espaçamento de 1,5 m entre eles, simulando um plantio comercial com colheita mecanizada. As variedades IAC87-3396 (V_1) e SP81-3250 (V_2) foram cedidas pela APTA e a RB86-7515 (V_3) foram cedidas pela Usina Furlan. Os rebolos (toletes) foram retirados da parte apical, deixando-os com três gemas. Em cada sulco foram colocados 6 rebolos dando, assim, 12 gemas por metro linear de sulco conforme Barbieri et al (1981). Após a colocação uniforme dos toletes nos sulcos, estes foram cobertos com uma camada de aproximadamente 10 cm de solo.

O plantio das variedades (V_1 e V_2) foi feito no dia 5 de setembro de 2008, e da variedade V_3 foi feito dez dias após, devido as dificuldades de encontrar estas mudas para ser cedidas (Figura 3b).



Figura 3 – (a) Conexão no final de cada parcela e (b) rebolos (toletes) plantados

Em relação à aplicação de insumos, apenas efetuou-se a aplicação de P_2O_5 na forma de superfosfato simples de 180 Kg ha^{-1} de P_2O_5 (RAIJ et al, 1991), não sendo necessária a calagem de acordo com as análises químicas do solo.

2.6.5 Condução do Experimento I

Após o plantio da cana-de-açúcar foram aplicados os tratamentos com a vinhaça. Esta vinhaça foi cedida pela Usina Costa Pinto do Grupo COSAN e armazenadas em caixas d'água de 5000 L para a sua aplicação em cada parcela. Como cada parcela tinha uma área de 18 m^2 , ou seja, $0,0018 \text{ ha}$, calculou-se a lâmina a ser aplicada multiplicando-se as doses requeridas (150 , 300 e $450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por esta área útil de cada parcela. Na Tabela 4 estão apresentadas os elementos da análise química da vinhaça.

Tabela 4 - Análise química dos elementos presente na vinhaça utilizada neste estudo

Elementos											
N	P	K	Ca	Mg	S	C	Na	Cu	Fe	Zn	Mn
g L ⁻¹						mg L ⁻¹					
0,35	0,06	1,91	0,97	0,20	0,47	5,20	122,00	0,40	17,00	0,70	6,00

A vinhaça foi aplicada em meados de dezembro com a ajuda de uma moto-bomba e mangueira com um chuveiro no final para aplicar esta vinhaça de forma homogênea.

A capina para limpeza das linhas foi manual e com ajuda de enxadas dentro de cada parcela, enquanto que fora dos blocos foram utilizadas cortadeira a motor e herbicidas a base de glifosato.

Durante o período de Novembro de 2008 a Fevereiro de 2009, foram feitos trabalhos de medição da precipitação pluviométrica pelo pluviômetro, leitura das lâminas acumuladas nas caixas d'água (com trena) logo após o término da chuva; homogeneização do volume captado pela caixa d'água e retirada de uma amostra (aproximadamente 1000 mL). Após a retirada da alíquota fazia-se a desgota e limpeza das 27 caixas d'água para a viabilidade da leitura seguinte. No laboratório foram retiradas alíquotas de 100 mL da amostra de cada caixa, que em seguida foi colocada 24 horas na estufa à 105° C dispostas em latinhas de alumínio com peso já conhecido, para se determinar o peso da matéria seca carregada em $\text{g } 100 \text{ mL}^{-1}$, além de se fazer leituras de

CE (condutividade elétrica da água em dS m^{-1}) mediante um condutivímetro com calibração automática de temperatura (à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a quantificação do potássio, pelo leitor rápido (*card*) Horiba apropriado para este elemento, do restantes da amostra. Durante o período de Novembro a Dezembro apenas em dois eventos de chuvas ocorreram o escoamento superficial, e esta baixa ocorrência pode ser explicada devido à prática de cultivo adotado antes do plantio com as aberturas de sulcos seguindo a curva de nível do terreno. E em apenas um evento foi avaliado a CE e o potássio carregado, pois o primeiro evento ocorreu logo após a aplicação de vinhaça, onde houve o escoamento desta em algumas parcelas, fato que poderia mascarar os resultados deste trabalho. Na Tabela 4 estão descritos os valores das precipitações recorrentes neste período e os escoamentos coletados.

Tabela 4 - Data e precipitação durante o tempo do Experimento I

nov/08		dez/08		jan/09		fev/09	
1	0,1	2	32,2	1	1,0	2	21,7
2	0,1	3	0,6	2	4,1	3	12,9
3	0,5	10	13,1	3	0,9	4	9,8
6	10,8	11	19,5	4	2,5	5	0,2
7	1,0	12	1,3	6	0,1	8	4,4
11	0,4	16	18,1	9	12,7	9	11,7
12	0,1	17	2,8	10	16,7	10	0,2
14	3,5	20	19,1	11	1,5	11	10,6
22	0,2	21	0,4	12	8,3	12	9,1
23	2,8	22	1,9	13	0,8	13	0,3
26	4,8	24	5,4	14	14,6	14	3,3
		25	26,3*	16	6,9	15	15,2
		31	2,9	17	4,3	16	15,3*
				18	8,9	22	3,5
				20	5,2	23	0,3
				23	0,1	24	16,2
				25	7,3	25	1,0
				26	17,3	26	0,2
				27	7,2		
				28	21,7		
				29	13,7		
				30	3,4		
				31	0,1		
24,3		117,3		159,3		120,6	

* Dia e precipitação em que ocorreu escoamento superficial.

A CE foi transformada em sólidos totais dissolvidos (STD) pela equação 6. Para um melhor entendimento desta variável, pois esta variável tem uma unidade (mg L^{-1}) que seria mais compreensível do que a unidade de condutividade elétrica da água, pois tendo o volume de cada evento de escoamento superficial pode-se obter a massa de sais que são perdidos pela erosão hídrica do solo.

$$\text{STD (mg L}^{-1}\text{)} = 640 \times \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

2.6.6 Localização e caracterização da área do Experimento II

Foram coletados dois tipos de solo na USINA IRACEMA localizada no município de Iracemápolis, Estado de São Paulo, a $22^{\circ}34'50''$ de latitude sul e a uma longitude de $47^{\circ}31'07''$ oeste, estando a uma altitude de 608 metros. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa: subtropical com inverno seco. A temperatura média é de 22°C , tendo temperatura máxima absoluta de $37,7^{\circ}\text{C}$ e mínima absoluta de $3,1^{\circ}\text{C}$. A pluviosidade média anual oscila entre 1100 e 1400mm. A cultura na área de coleta é a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*).

Segundo o engenheiro agrônomo Rafael Dinardi¹, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro (LVE) e foi coletado nas proximidades da usina, sendo esta com mais ou menos 30 anos de aplicação de vinhaça (Figura 4a). O outro solo (Figura 4b) foi coletado a aproximadamente 8 km da usina e é um solo classificado como Latossolo Roxo (LR) com 15 anos de aplicação da vinhaça (informação pessoal).

¹ Engenheiro Agrônomo Rafael Dinardi, responsável dos tratamentos culturais da USINA IRACEMA



Figura 4 - (a) área próxima da usina com aproximadamente 30 anos de aplicação de vinhaça e (b) área mais afastada com aproximadamente 15 anos de aplicação

O terceiro solo foi proveniente da área experimental do Experimento I, logo sua classificação e análises físico-químicas estão descritos anteriormente. E as análises físico-químicas dos solos LVE e LR estão referenciadas nas Tabela 5 e 6.

Tabela 5 - Características físicas do solo da área experimental

Solo	Granulometria (%)			Classe Textural	Densidade (g.cm^{-3})	
	argila	silte	areia		global	partículas
LVE	61,54	11,73	26,72	argilosa	1,22	2,25
LR	63,49	12,97	23,54	argilosa	1,22	2,82

Tabela 6 - Análise química do solo da área experimental

Solo	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	CTC
	CaCl_2	g dm^{-3}	mg dm^{-3}			mmolc dm^{-3}			
LVE	4,5	33	94,5	7,7	27,5	8,7	72	44	116
LR	5,0	33	35	11,8	31	11	47	53,8	100,8

As análises de condutividade hidráulica do solo saturado foram procedidas no Laboratório de Física do Solo pertencente ao Departamento de Engenharia Rural (ESALQ/USP).

2.6.7 Tratamentos e delineamentos estatístico

O delineamento estatístico utilizado para os solos da usina foi o inteiramente casualizado num esquema fatorial de 2×4 , sendo os fatores: duas idades diferentes de aplicação de vinhaça em campo e 4 doses de vinhaça ($0, 150, 300$ e $450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), com três repetições. Para o solo do

Experimento I, foi utilizado o inteiramente casualizado com três repetições e os tratamentos com vinhaça foram os mesmo utilizados anteriormente.

2.6.8 Instalação e condução do Experimento II

As amostras dos solos da Usina Iracema foram retiradas em “grid”, espaçadas entre si de 10 m; os pontos de coletas foram as intersecções de cada grid, sendo coletadas amostras deformadas dos solos, na camada de 0 a 0,20 m de profundidade. As amostras de cada área junto com as amostras do solo da área experimental I foram secas ao ar e peneiradas na peneira de 2 mm, sendo os materiais de solos LVE e LR misturados para formar duas amostras compostas e homogêneas.

Montou-se junto ao Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Engenharia Rural, colunas de PVC, para serem preenchidas com os diferentes tipos de solo, com as dimensões de 25 cm de altura e 5 cm de diâmetro (Figura 5a). Visando proteger as amostras de perdas de solo, sem no entanto interferir no processo de fluxo da água pela amostra, na parte inferior da coluna havia um circulo de manta sintética geotêxtil (Bidim OP-20) sobre uma tela fixada por um “cap” com rosca. E para manter uma lâmina constante de 1 cm, na parte superior da coluna, montou-se um dreno extravasor que retirava todo o excesso (Figura 5b).

Para as avaliações de condutividade hidráulica montou-se uma estrutura para conduzir estes testes, constando de um vaso com capacidade de 60 L, braçadeiras de 60 cm, tubos de 16 mm e microtubos para alimentar o sistema com água dessalinizada (Figura 5c).

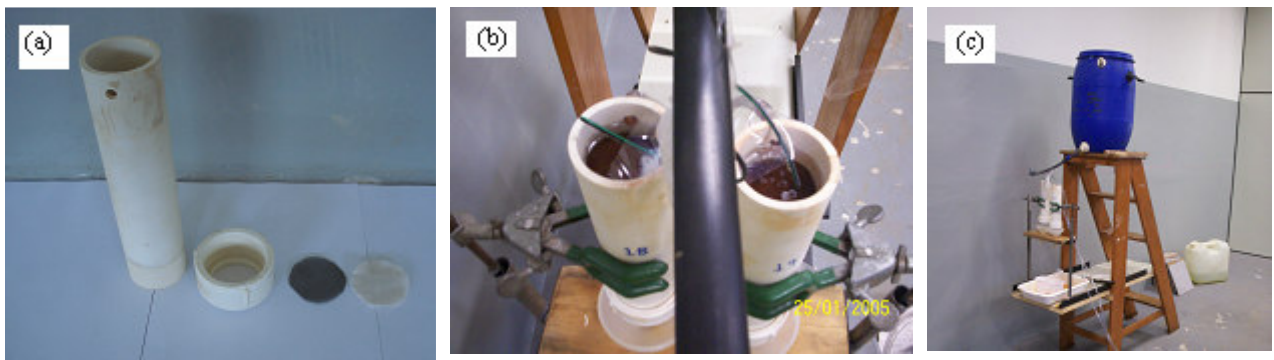


Figura 5 – (a) Colunas de PVC, (b) alimentação do sistema com água e dreno extravasor da coluna e (c) estrutura montada para avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado

Após o preenchimento das colunas com os respectivos solos, foram aplicadas as doses de vinhaça para cada tratamento, sendo o volume estimado por meio da relação entre as doses de 150, 300 e 450 m³ ha⁻¹ e a área da seção transversal das colunas. Esperou-se um tempo de 30 dias para que houvesse um período de incubação da vinhaça no solo, e assim, iniciaram-se as avaliações.

Para o início do teste foi necessário primeiramente saturar a coluna com água dessalinizada, processo esse realizado de forma lenta, no qual a coluna foi colocada inclinada dentro de um recipiente e por gotejamento adicionou-se água até a uma altura aproximada de 2/3 da coluna. Em seguida o conjunto ficou em repouso por um período de 24 horas para completar a saturação e, após esse prazo, o teste era realizado. Este processo foi realizado para evitar o problema de formação de bolsas de ar e para facilitar a dissolução do ar contido dentro da amostra, conforme discutido por Faybishenko (1995) e Moraes (1991).

Para os inícios dos testes as colunas eram fixadas às braçadeiras e colocadas em níveis com a ajuda de um nível de pedreiro comum, e logo após foram colocados e colados microtubos que gotejavam a água dessalinizada dentro delas. De acordo com EMBRAPA (1997), deixaram-se as colunas sobre a carga constante de água durante 8 h, e depois se começou a proceder a coleta dos volumes drenados. O volume de água a ser coletado foi medido em intervalos de tempo determinados e quando de 3 medições consecutivas de vazão com resultados semelhantes, considerou-se que o fluxo estava estacionário, ou seja, que tinha sido atingido o equilíbrio dinâmico e portanto não haveria variação no teor de água na amostra. Este volume de água coletado foi levado a uma balança de precisão, determinando-se a massa de água (m_a).

Assumindo-se a densidade da água (ρ_a) como sendo 1 g cm⁻³, determinou-se o fluxo de água pela amostra, ou seja, o volume de água (V) pela equação:

$$V = \frac{m_a}{\rho_a} \quad (7)$$

Ao mesmo tempo em que se obteve a m_a , tomou-se a medida da carga hidráulica (CH) na face superior da amostra. Conhecendo-se previamente as dimensões dos cilindros (diâmetro d e comprimento L), a condutividade hidráulica do solo saturado K_{sat} (cm h⁻¹) foi determinada a partir da equação de Darcy aplicada ao permeâmetro de carga constante:

$$K_{\text{sat}} = \frac{V L}{A \Delta t (CH + L)} \quad (8)$$

em que: V - volume de água que passou pela amostra, cm³;

L - altura da amostra, cm;

A - área da superfície da amostra, cm²;

Δt - tempo gasto pelo volume de água (V) passar pela amostra, horas;

CH - altura da carga hidráulica sobre a amostra, cm.

Ao final do experimento as colunas de solo foram desmontadas e os solos de cada repetição foram juntados para compor uma amostra composta, respeitando cada tratamento. Estas amostras foram analisadas pelo Laboratório de Análises Químicas de Solo pertencente ao Departamento de Solos (ESALQ/USP).

2.6.9 Análises estatísticas

Os dados obtidos neste experimento foram submetidos à análise de variância simples e análise de regressão polinomial (FERREIRA, 2000). Foram testadas apenas as regressões polinomiais de 1º, 2º e 3º graus. Em todo o procedimento de cálculos estatísticos empregou-se o software Statistical Analysis System (SAS,2003).

2.7 Resultados e discussão

2.7.1 Condutividade hidráulica do solo saturado tratado com vinhaça

Em relação aos valores obtidos de condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) houve um efeito significativo a 1% de probabilidade entre os solos avaliados (Latossolo Vermelho-Escuro – LVE, Latossolo Roxo – LR e Nitossolo Vermelho Eutrófico – NVE), não havendo efeito significativo para as doses de vinhaça e a interação entre os solos e as doses (Tabela 7).

Tabela 7 – Quadro de análise de variância para condutividade hidráulica do solo saturado em colunas de PVC

Causa de variação	GL	F
Solo (S)	2	197,15**
Doses de vinhaça (D)	3	0,49 ^{ns}
Interação (S x D)	6	0,32 ^{ns}

** = 1% de significância e ns = não significativo

Pelo Teste de Tukey (Tabela 8), os solos LVE e LR não diferenciaram entre si, diferenciando apenas o NVE. Fato que era esperado, pois o NVE apresentou uma diferença em sua composição granulométrica em relação ao LVE e ao LR, no que se refere a quantidade de areia. Solos arenosos, possuem maior quantidade de macroporos que os argilosos e, conseqüentemente, apresentam maior condutividade hidráulica e taxa de infiltração (FIORIN, 2008).

Tabela 8 – Valores médios da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) para cada tipo de solo

Solo	Média da K_0
LVE	1,915A
LR	3,168A
NVE	22,23B

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

Salienta-se ainda que o solo LR teve um valor maior de condutividade hidráulica que o LVE, e apesar de que eles tenham a mesma textura e, praticamente, as mesmas quantidades de argila, silte e areia; o solo LR teve um K_0 de aproximadamente 65% maior que o LVE.

Segundo Hillel (1970), entre as propriedades que influenciam a condutividade hidráulica, além da textura, estão a densidade, a estabilidade estrutural, a composição da solução do solo e do complexo de troca, a expansibilidade, a atividade microbiana e a possível presença de ar que possa bloquear a passagem do fluido.

Como a interação dos tratamentos e as regressões não foram significativas, plotou-se os gráficos utilizando, apenas, a estatística descritiva com as médias e em formas de linhas.

O solo LVE obteve um decréscimo de sua condutividade hidráulica com o aumento das doses de vinhaça (Figura 6). Demonstrando que, para este solo a vinhaça tem um efeito prejudicial no que diz respeito a esta importante variável. Lobato (1984) avaliou a condutividade

hidráulica do solo saturado de um Latossolo roxo distrófico com doses de vinhaça de 0 até 1000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, concluindo que com os acréscimos das doses houve decréscimo desta variável.

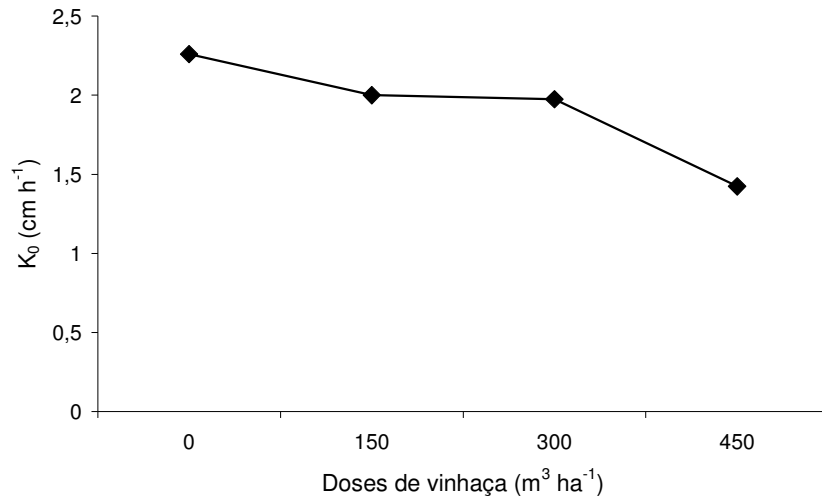


Figura 6 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Latossolo Vermelho-Escuro (LVE). Piracicaba, SP, 2009

No solo LR (Figura 7) ocorreu um acréscimo na condutividade hidráulica do solo saturado a partir da dose de $150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, ou seja, houve uma diminuição da condutividade hidráulica até esta dose e, posteriormente, um aumento desta variável nas maiores doses de vinhaça. Ribeiro, Novais e Bahia Filho (1983) trabalharam em condições de laboratório e determinaram o efeito de duas amostras de vinhaça de procedências diferentes sobre a dispersão da fração de argila de seis latossolos de texturas diferentes, concluíram que a vinhaça atuou como dispersante em solos de textura média e floculante em solos de textura argilosa.

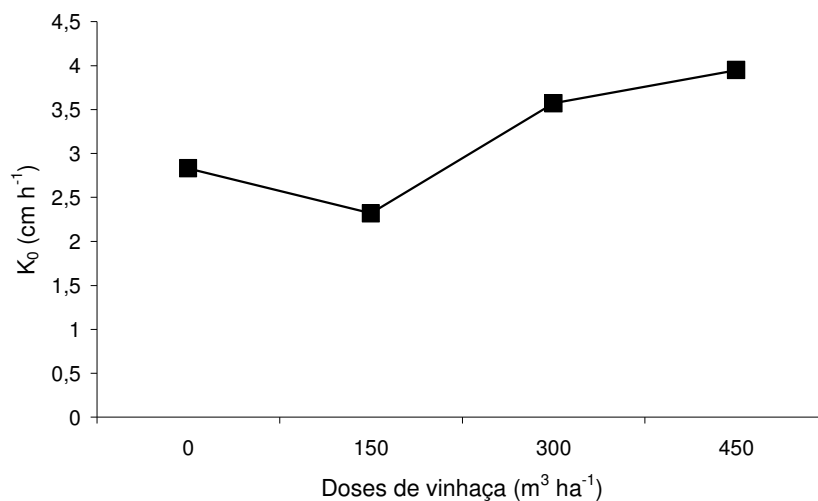


Figura 7 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Latossolo Roxo (LR). Piracicaba, SP, 2009

No solo NVE (Figura 8) houve um incremento de condutividade hidráulica até a dose de $300 m^3 ha^{-1}$ e, posteriormente um pequeno decréscimo. Ribeiro e Sengik (1983) trabalharam com dois solos do Triângulo Mineiro (Latosolo Vermelho-Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo) e concluíram que menores doses de vinhaça promoveram a floculação da argila, enquanto as doses maiores tiveram um efeito dispersivo desta.

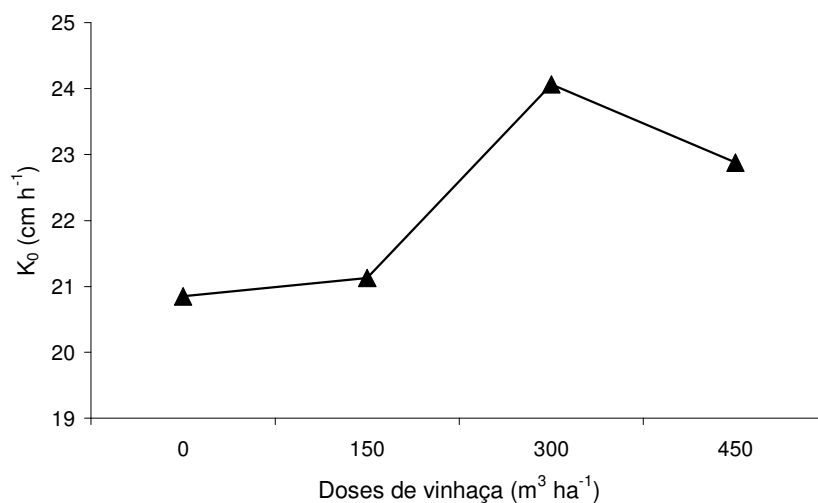


Figura 8 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em relação as doses de vinhaça para o Nitossolo Vermelho Eutrófico (NVE). Piracicaba, SP, 2009

A alta concentração de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ iniciais nos solos LR e NVE em relação ao LVE pode ter influenciado no efeito de floculação das partículas de argilas, aumentando o K_0 destes solos. Pois o efeito de dispersão ou floculação dos colóides do solo varia conforme a valência, raio hidratado e concentração. E com relação sobre o efeito de floculação no solo, tem sido proposta a seguinte relação: $\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$. E ainda, o efeito na dispersão ou floculação da argila em Latossolos dependerá da natureza da fração argila e da concentração dos cátions presentes na vinhaça, além da dose aplicada (RIBEIRO; NOVAIS e BAHIA FILHO, 1983).

E ainda de acordo com a Tabela 9 verificou-se elevação dos teores de potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) e da capacidade de troca catiônica efetiva do solo.

Tabela 9 – Análise química das amostras composta de cada tratamento

Solo	Dose ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	M.O. (g dm^{-3})	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	CTC
			$\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$			
LVE	0	33	7,7	27,5	8,7	116,0
	150	29	15,6	31,0	13,0	123,6
	300	33	19,0	33,0	14,0	124,0
	450	31	15,8	29,0	11,0	119,8
LR	0	33	11,8	31,0	11,0	100,8
	150	33	18,5	48,0	16,0	140,5
	300	33	21,6	45,0	14,0	138,6
	450	33	22,1	43,0	14,0	137,1
NVE	0	27	6,9	29,0	11,0	74,9
	150	26	13,4	41,0	14,0	102,4
	300	20	13,4	37,0	12,0	126,4
	450	24	16,1	31,0	12,0	93,1

Penatti et al. (1988) selecionaram dois solos diferentes, um Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa, com 9,3% de argila, e um Latossolo Roxo de textura argilosa, com 57,0% de argila, para receberem doses crescentes de 0, 50, 100 e 150 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de vinhaça complementada com 0, 50, 100 e 150 Kg ha^{-1} de nitrogênio, combinando-se doses de vinhaça com doses de nitrogênio. Aumentos dos teores de potássio ocorreram em ambos os solos em função da incorporação de vinhaça.

A aplicação de doses crescentes de vinhaça (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), com e sem complementação com fosfato, foi pesquisada pela COPERSUCAR (1980) quanto ao seu efeito sobre o solo e sobre a produtividade de colmos e de açúcar. Trabalhando com um

Latossolo Roxo, os autores aplicaram a vinhaça com um caminhão-tanque provido de conjunto motobomba, ao longo de três anos consecutivos, no mesmo local, concluindo ao final que a fertilização da soqueira com vinhaça não alterou significativamente a composição química do solo, exceção feita para o potássio trocável cujo teor aumentou linearmente com a dosagem de vinhaça aplicada.

2.7.2 Perda de água e solo em uma área cultivada com cana-de-açúcar

Para a perda de água por escoamento superficial no primeiro evento de chuva não houve significância em nenhum dos fatores (Tabela 9). Demonstrando que independente da variedade de cana-de-açúcar e o aumento das doses de vinhaça aplicada a perda de água para esta precipitação será a mesma.

Tabela 10 – Quadro de análise de variância para perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva)

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	1,03 ^{ns}
Variedade (V)	2	0,97 ^{ns}
Doses (D)	2	0,30 ^{ns}
Interação (V x D)	4	0,53 ^{ns}

ns = não significativo

No segundo evento houve um efeito significativo ($p < 0,01$) para o fator variedade, não havendo significância entre outros fatores (Tabela 10).

Tabela 11 – Quadro de análise de variância para perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva)

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	0,16 ^{ns}
Variedade (V)	2	5,96 ^{**}
Doses (D)	2	0,89 ^{ns}
Interação (V x D)	4	1,67 ^{ns}

** = 1% de significância e ns = não significativo

Verificando o quadro das médias de perda de água para o primeiro e segundo evento de chuva (Tabela 11 e 12) percebeu-se que não houve diferença significativa para as doses de

vinhaça aplicada, demonstrando que não houve um efeito de dispersão das argilas do solo nem alteração da sua condutividade hidráulica. Peles (2007) testou doses crescente de dejetos líquidos suíno em um Latossolo Bruno Distrófico e verificou-se que houve um aumento na perda de água por escoamento superficial. Fato que não ocorreu neste trabalho, onde apesar de não haver diferença entre os tratamentos, verifica-se que a menor dose de vinhaça provocou uma maior perda.

Tabela 12 – Valores médios da perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva)

Doses de Vinhaça (m³ ha⁻¹)	Média da perda de água (L m⁻²)
150	14,728A
300	13,456A
450	14,042A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

Tabela 13 – Valores médios da perda de água em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva)

Doses de Vinhaça (m³ ha⁻¹)	Média da perda de água (L m⁻²)
150	7,948A
300	6,312A
450	6,899A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

Como não houve uma significância nos modelos testados optou-se em plotar os gráficos utilizando a estatística descritiva com as médias de perda de água para cada dose de vinhaça. Pelas Figuras 9A e 9B percebe-se que a menor dose de vinhaça (150 m³ ha⁻¹) provocou a maior perda de água por escoamento superficial, caso que pode ser explicado pela própria composição química da vinhaça que além de ser uma boa fonte de fertilizante, ela também é um bom condicionador do solo por conter em sua composição uma grande quantidade de matéria orgânica. Almeida (1955) ressalta os efeitos positivos da aplicação da vinhaça sobre as propriedades físicas de um solo, notadamente, sobre o aumento de retenção da água e como elemento de controle da erosão. E Ranzani (1956) estudando os efeitos de dosagens crescente de vinhaça (0 até 1000 m³ ha⁻¹) sobre algumas propriedades físicas do solo, constatou os seguintes

resultados: aumento da porosidade total do solo, aumento na capacidade de retenção de água e pouca alteração na permeabilidade do solo.

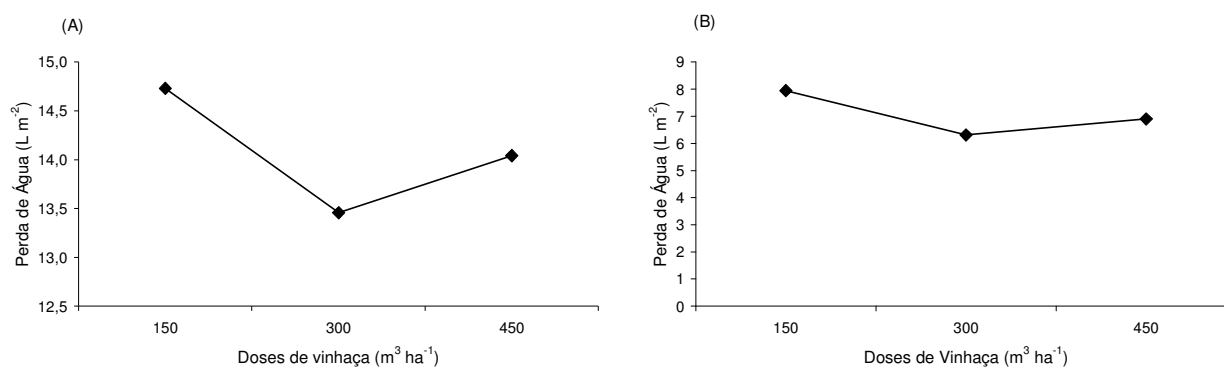


Figura 9 – Perda de água por escoamento superficial em relação às doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico (A) 1º Evento e (B) 2º Evento. Piracicaba, SP, 2009

Para a perda de solo por escoamento superficial no primeiro e segundo evento de chuva não houve significância em nenhum dos fatores (Tabelas 13 e 14). Demonstrando que independente da variedade de cana-de-açúcar e o aumento das doses de vinhaça aplicada a perda de solo para estas precipitações serão as mesmas.

Tabela 14 – Quadro de análise de variância para perda de solo no em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva)

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	1,43 ^{ns}
Variedade (V)	2	1,98 ^{ns}
Doses (D)	2	1,08 ^{ns}
Interação (V x D)	4	1,88 ^{ns}

ns = não significativo

Tabela 15 – Quadro de análise de variância para perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva)

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	2,01 ^{ns}
Variedade (V)	2	0,06 ^{ns}
Doses (D)	2	1,59 ^{ns}
Interação (V x D)	4	0,48 ^{ns}

ns = não significativo

Verificando o quadro das médias de perda de solo para o primeiro e segundo evento de chuva (Tabela 15 e 16) percebe-se que não há diferença significativa para as doses de vinhaça aplicada. Porém a maior dose ($450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) no primeiro evento provocou uma perda de solo de aproximadamente 74% superior a dose recomendada pela CETESB. E no segundo evento a diferença entre as médias foi menor.

Tabela 16 – Valores médios da perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (1º Evento de chuva)

Doses de Vinhaça ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	Média da perda de solo (g m^{-2})
150	9,992A
300	9,768A
450	17,462A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

Tabela 17 – Valores médios da perda de solo em solo cultivado com cana-de-açúcar (2º Evento de chuva)

Doses de Vinhaça ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	Média da perda de solo (g m^{-2})
150	2,35A
300	1,25A
450	2,17A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

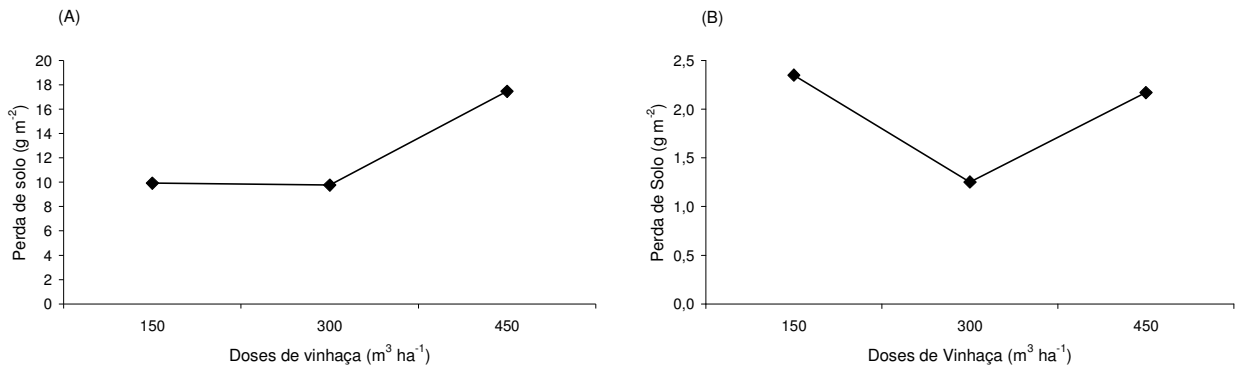


Figura 10 – Perda de solo por escoamento superficial em relação as doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico (A) 1º Evento e (B) 2º Evento. Piracicaba, SP, 2009

2.7.3 Perda de potássio e sólidos dissolvidos totais em uma área cultivada com cana-de-açúcar

Para a perda de água por escoamento superficial no primeiro evento de chuva só houve significância para o fator variedade (Tabela 17).

E para o segundo evento (Tabela 18) não houve significância em nenhum fator. Demonstrando que independente da variedade de cana-de-açúcar e o aumento das doses de vinhaça aplicada a perda de água para esta precipitação será a mesma.

Tabela 18 – Quadro de análise de variância para perda de potássio em solo cultivado com cana-de-açúcar

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	0,08 ^{ns}
Variedade (V)	2	3,30**
Doses (D)	2	1,83 ^{ns}
Interação (V x D)	4	1,06 ^{ns}

** = 1% de significância e ns = não significativo

Tabela 19 – Quadro de análise de variância para perda de sais em solo cultivado com cana-de-açúcar

Causa de variação	GL	F
Bloco (B)	2	0,35 ^{ns}
Variedade (V)	2	2,22 ^{ns}
Doses (D)	2	2,60 ^{ns}
Interação (V x D)	4	0,78 ^{ns}

ns = não significativo

Verificando o quadro das médias de perda de potássio e de sais para o segundo evento de chuva (Tabela 19 e 20) percebe-se que não há diferença significativa para as doses de vinhaça aplicada. Porém a maior dose ($450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) provocou a maior perda de potássio e sais por escoamento superficial.

Apesar de não haver diferença estatística entre os tratamentos, nas parcelas onde se aplicou as maiores doses houve uma perda 2,93 vezes maior que a dose de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para o potássio e de 1,54 vezes para os sólidos dissolvidos totais. Que são perdas muito significativas quando relacionadas com as possíveis perdas em um talhão de cana-de-açúcar. Além de que,

possivelmente estas águas contribuem, também, nos mananciais de águas superficiais rios, açudes e etc.

Tabela 20 – Valores médios da perda de potássio em solo cultivado com cana-de-açúcar

Doses de Vinhaça (m³ ha⁻¹)	Média da perda de potássio (ppm)
150	3,000A
300	8,111A
450	8,778A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

Tabela 21 – Valores médios da perda de sais em solo cultivado com cana-de-açúcar

Doses de Vinhaça (m³ ha⁻¹)	Média da perda de solo (mg L⁻¹)
150	97,49A
300	146,99A
450	149,90A

¹ Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% pelo Teste de Tukey

A condutividade elétrica (CE), ou capacidade da água em conduzir corrente elétrica, é um indicativo da quantidade de íons dissolvidos na água, especialmente sais minerais, o que permite fazer inferência sobre a concentração de nutrientes na água do escoamento superficial. Quanto maior for a quantidade de íons dissolvidos, maior será a condutividade elétrica da água. Os íons diretamente responsáveis pelos valores da condutividade são, entre outros, o cálcio, o magnésio, o potássio, o sódio, nitratos, carbonatos, carbonetos, sulfatos e cloretos. O parâmetro condutividade elétrica não determina, especificamente, quais os íons que estão presentes em determinada amostra de água, mas pode contribuir para possíveis reconhecimentos de impactos ambientais que ocorram na bacia de drenagem. E ainda, quando transformada para SDT pela equação 6, teremos valores mais representativos da quantidade de sais perdidos em um evento de chuva por escoamento superficial.

Em relação ao potássio, a perda percentual em relação ao aplicado na forma solúvel teve o mesmo comportamento que os sólidos totais dissolvidos (SDT), aumentando com o incremento da dose de vinhaça. Peles (2007) trabalhou com aplicação de rejeito suíno e gesso, e encontrou que a perda de potássio na forma solúvel foi cerca de 2 vezes maior para a dose máxima de dejetos

em relação a uma dose de $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, tanto para os tratamentos que receberam gesso com para aqueles que não receberam.

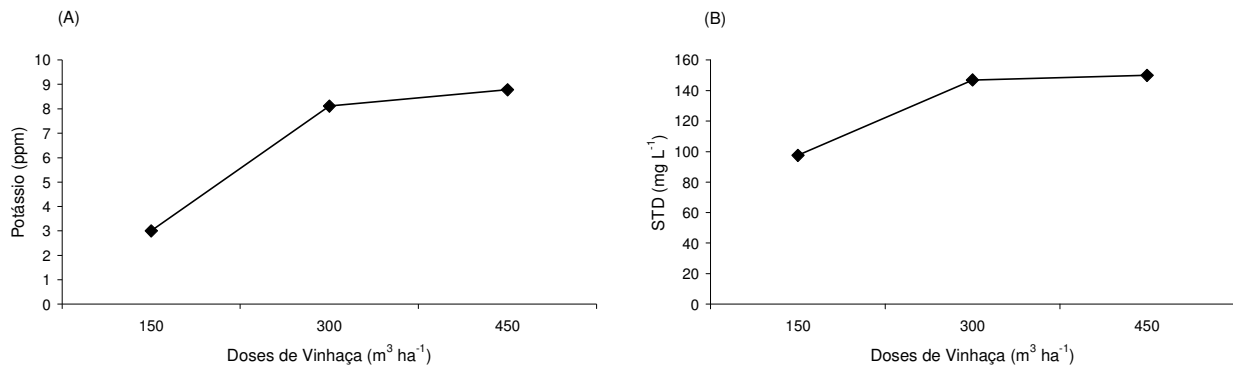


Figura 11 – Perda de potássio (A) e sólidos dissolvidos totais (B) por escoamento superficial em relação as doses de vinhaça para um Nitossolo Vermelho Eutrófico. Piracicaba, SP, 2009

3 CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos, sob as condições da referente pesquisa, pôde-se concluir que:

- a) No Latossolo Vermelho-Escuro, proveniente de uma área com um histórico de aplicação de vinhaça de aproximadamente 30 anos, o aumento das doses de vinhaça reduziram os valores da condutividade hidráulica do solo saturado, embora em valor não significativo;
- b) No Latossolo Roxo, com aproximadamente 15 anos de aplicação de vinhaça, e o Nitossolo Vermelho Eutrófico, sem histórico de aplicação, os valores de condutividade hidráulica do solo saturado aumentaram com o incremento da dose de vinhaça, embora em valor não significativo;
- c) Em dois eventos de chuva, não houve diferença estatística na perda de água e de solo, indicando que o aumento da dose de vinhaça de 150 para 450 m³ ha⁻¹ não diminuiu a permeabilidade do solo causando maior escoamento superficial; e
- d) Com o incremento das doses de vinhaça aplicada aumentou, também, as perdas de potássio e de sólidos dissolvidos totais presentes no escoamento superficial, embora em valor não significativo.

REFERÊNCIAS

ADAMSON, A.W. **The physic and chemistry of surfaces**. 2nd ed. New York: Ed. John Wiley , 1960. 352p.

AHMED, S.; SWINDALE, L.D.; EL-SWAIF, S.A. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. I. Plastic limits, percentage stable aggregates and hydraulic conductivity. **Journal of Soil Science**, New Jersey. n 20, p. 255-268, 1969.

ALMEIDA, J.R.; RANZANI, G.; VALSECHI, O. **La vinasse dans l'agriculture**. Piracicaba, 1950. 21p. (Boletim Técnico, 1).

ALMEIDA, J.R. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba, 1952. 21p. (Boletim Técnico, 3)

ALMEIDA, J.R. O problema da vinhaça. **Brasil açucareiro**, Rio de Janeiro, n. 42, p. 216-221, 1955.

AMARAL, N.D. **Noções de conservação do solo**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1984. 120p

ANDRIOLI, I. **Movimento da vinhaça no solo podzolizado Lins e Marília var Marília**. 1982. 89p. Dissertação (Mestrado na área de Agronomia: Ciências do Solo) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1982.

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v. 42, p. 1023-1030, 1981.

BARBIEIRI, V.; BACHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Espaçamento em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TECNOCOLISTAS AÇUCAREIROS DO BRASIL, 2, 1981. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1981. v.3/, p. 512-522.

BARROSO, D.G., SILVA, M.L.N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.176, n.16, p.17-24, 1992.

BENNETT, H.H. **Elements of soil conservation**. 2nd ed. Tokyo: Kogakussha, 1955. 358p.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J.C.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II - Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1045-1054, 2004.

BERTOL, I.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V.; CARRAFA, M.R. Nutrient losses by water erosion. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.60, n.3, p.581 - 586, 2003.

- BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J.; BARBOSA, F.T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.485-494, 2004.
- BOSCH, D.D.; WEST, L.T. Hydraulic conductivity variability for two soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 90-98, 1998.
- BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p. 438-441, 1982.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 46, p. 1-36, 1991.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.N.S.; GERALDO, R.N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 30p. (Boletim Técnico, 76).
- CARVALHO, D.F. de; MONTEBELLER, C.A.; CRUZ, E.S. da; CEDDIA, M.B.; LANA, A.M.Q. Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.385-389, 2002.
- CASSOL, E.A.; LEVIEN, R.; ANGHINONI, I.; BADELUCCHI, M. P. Perdas de nutrientes por erosão em diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.705-712, 2002.
- COPERSUCAR. Aproveitamento da vinhaça: viabilidade técnico-econômica. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, p.1-66, 1978.
- COPERSUCAR. Aplicação de vinhaça à soqueira da cana-de-açúcar em três anos consecutivos. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, n.12, p.2-5, 1980.
- COUTINHO JÚNIOR, G.; DOMINGOS, R.N. Infiltração de vinhoto de cana em solos: condições experimentais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 18., 1981. Salvador, 1981. **Resumos...** Salvador, 1981. 109p.
- ELGABALY, M.M.; ELGHAMRY, W.M. Water permeability and stability of kaolinite system as influenced by adsorbed cation ratio. **Soil Science**, Baltimore, n. 110, p 107-110, 1970.
- ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIRES, C.G. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnostico de la estructura del solo. **Agro Sur**, Chile, v. 25, n.1, p. 51-56, 1997.
- EL-SWAIFY; AHMED, S; SWINDALE, L.D. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. II. Liquid limits, degree of dispersion and moisture retention. **Journal of Soil Science**, Baltimore, n 21, p. 188-198, 1970

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.

FAYBISHENKO, B.A. Hydraulic behavior of quase-saturated soils in the presence of entrapped air: laboratory experiments. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n. 10, p. 2421-2435, 1995.

FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 1996. 86p.

FERREIRA, P.V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. 2 ed. Maceió: UFAL/EDUFAL/FUNDEPES, 2000. 437p.

FERREIRA, P.A. Aspectos físico-químico do solo. In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.M. (Ed.). **Manejo e controle da salinidade na agricultura**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. p.113 – 136.

FIELD, J.A.; PARKER, J.C.; POWELL, N.L. Comparison of field and laboratory – measured and predicted hydraulic properties of soil with macropores. **Soil Science**, Baltimore, v. 138, n. 6, p. 385-396, 1984.

FIORIN, T.T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. 2008. 97p. Tese (Doutorado na área de Ciências do Solo) – Centro de Ciências Rural, Universidade de Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FONTES, R.V.F. **Efeito de vinhoto suplementado com fosfato mono-amônico e superfosfato triplon sobre germinação, “stand” final e crescimento de plantas de mandioca**. UFV, 1982. 77p. Tese de (Mestrado na área de Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1982.

FREIRE, W.J., CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 203p. 2000. (Série Engenharia Agrícola.)

GARDNER, W.T. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 83, p. 317-320, 1956.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2002. p.174.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios**. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1970. p.231.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristic in situ. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 114, n. 5, p. 395-400, 1972.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, v. 32, 2006. 101p.

JONES, A.J.; WAGENET, R.J. In situ stimation of hydraulic conductivity using simplified methods. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 11, p. 1620-1626, 1984.

KIRKHAM, D.; POWERS, W.L. **Advanced soil physics**. New York, John-Willey-Interscience, 1972. 534p.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C.H. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In Klute, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap. 28 p. 687-732

LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um nitossolo háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.1033-1044, 2004.

LEME, E.J.A. Montagem direta otimizado: o sistema para reduzir consumo de energia. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE INOVAÇÕES TÉCNICAS NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA POR ASPERSÃO. 1987. Araras. **Resumos...Araras: IAA, Planalsucar**, 1987. 36p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.P.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for stimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p. 3-7, 1980.

LOBATO, E.J.V. **Variação da condutividade hidráulica de um solo tratado com vinhaça**. 1984. 126p. Tese de (Doutorado na área de Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 735-741, 2003.

MANSOR, M.T.C. **Potencial de poluição de águas superficiais por fontes não pontuais de fósforo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira-SP**. 2005. 79p. Tese de (Doutorado na área de Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MARTIN, J.P.; RICHARDS, S.J. Influence of exchangeable hydrogen and calcium and of calcium, potassium and ammonium at different hydrogen levels on certain physical properties of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, n. 23, p. 335-336, 1959

- MECKE, M.; WESTMAN, C.J.; ILVESNIEMI, H. Prediction of near-saturated hydraulic conductivity in three podzolic boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 485-492, 2000.
- MIYAZAKI, T. Bulk density dependence of air entry suctions and saturated hydraulic conductivities of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.161, n.8, p.484-490, Aug. 1996
- MONTEIRO, H.; PEIXE, C.A.; STUPIELLO, J.P. Emprego de vinhaça complementada com nitrogênio e fósforo em soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) **Brasil Açucareiro**, São Paulo, n.4, p.22-27, 1979.
- MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo**: características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó: o autor, 1991. 337p.
- MORAES, S.O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991. 141 p. Tese de (Doutorado na área de Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. **Hilgardia**, Califórnia, v. 42, n. 7, p. 215-259, 1973.
- ORLANDO FILHO, J. Sistemas de aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v.1, n.1, p.28-36, 1981.
- 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, 1983. cap.10 p.229-264. (Coleção Planalsucar, 2).
- PELES, D. **Perdas de solo, água e nutrientes sob aplicação de gesso e dejetos líquidos de suínos**. 2007. 84p. Dissertação (Mestrado na área de Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- PENATTI, C.P.; CAMBRIA, S.; BONI, P.S.; ARRUDA, F.C.O.; MANOEL, L.A. **Efeito da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1988. p. 32-38. (Boletim Técnico Copersucar, 44)
- PEREIRA, S.B. **Desprendimento e arraste do solo em decorrência do escoamento superficial**. 2000. 81p. Dissertação (Mestrado na área de Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

PIERSON, S.T.; CABRERA, M.; LEVANYLO; G.K.; KUYKENDALL, H.A.C.; HOVELAND, S.; MCCANN, M.A.; WEST, L. T. Phosphorus and ammonium concentrations in surface runoff from grasslands fertilized with broiler litter. **Journal of Environmental Quality**, Califórnia, v.30, p.1784-1789, 2001.

PRUSKI, F.F. Aplicação de modelos físico-matemáticos para a conservação de água e solo. In: SILVA, D. D., PRUSKI, F. F. (Ed.). **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília, DF: MMA, SRH, ABEAS; Viçosa, MG: UFV, 1997. p.129-171.

PRUSKI, F.F. Conservação de água e solos. In: **Gestão de recursos hídricos para o desenvolvimento sustentado de projetos hidroagrícolas**. Brasília – DF: ABEAS; Viçosa: UFV / DEA, 1998. 88p. (Módulo 7)

QUIRCK, J.P.; SCHOFIELD, R.K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. **Journal of Soil Science**, New Jersey, n. 6, p. 163-178, 1955.

RAVINA, I.; MARKUS, Z. The effects of high exchangeable potassium percentage on soil properties and plant growth. **Plant Soil**, Dordrecht, n. 42, p. 661-672, 1975.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo; Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343p.

RANZANI, G. Conseqüências da aplicação do restilo ao solo (I). **Anais da ESALQ**, Piracicaba, v.12/13, p 57-68, 1955/1956.

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

REZENDE, J.O. **Conseqüências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo aluvial**: estudo de caso. 1979. 112p. Tese (Doutorado na área de Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

RIBEIRO, A.C.; SENGIK, E. Efeito da aplicação da vinhaça nas propriedades físicas e químicas de duas amostras de latossolos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 30, n. 167, p. 25-31, 1983.

RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F; BAHIA FILHO, A.F.C. Efeito da vinhaça sobre a dispersão de argila de amostras de latossolos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 30, n. 167, p. 12-18, 1983.

RICHARDS, L.A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigations. **Journal of Agricultural Research**, Pakistan, v. 37, p. 719-742, 1928.

ROSS, P.; FROBERVILLE, L.F. Disposal of waste waters. **Proceedings of the Annual Meeting and Congress**. Natal: South African Sugar Technologist Association, 1928. p. 35-42.

ROWELL, D.L. Hydraulic conductivity of clays during shrinkage. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, n. 30, p. 289-292, 1963.

SAS Institute Inc. SAS 9.1 Cary, 2003.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR., A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II - Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.437-447, 2000.

SHARPLEY, A.N.; CHAPRA, S.C.; WEDEPOHL, R.; SIMS, J.T.; DANIEL, T.C.; REDDY, K.R. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. **Journal of Environmental Quality**, Califórnia, v.23, p.437-451, 1994.

SILVA, E.L.; OKURA, M.N.; FREIRE, J.T. Determinação de propriedades físicas do vinhoto e propriedades de transporte no sistema solo-vinhoto: estudo preliminares. In: JORNADA CIENTÍFICA DA UFSCAR, 1, 1982. São Carlos. **Resumos...**São Carlos:UFSCAR, 1982. 21p.

SISSON, J.B.; FERGUSON, A.H.; VAN GENUCHTEN, M.T. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1147-1152, 1980.

SKAGGS, R.W.; MILLER, D.E.; BROOKS, R.H. Soil water-properties. In: JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**, St Joseph: ASAE, 1983. p. 77-136. (ASAE Monograph, 3).

UHLAND, R.E. Physical properties of soils as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p. 361 - 366, 1949.

VALSECHI, O. Alguns aspectos do problema da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, São Paulo, v. 46, p. 57-62, 1955

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

VERWEG, E.J.W.; OVERBEEK, J.T.G. Theory of stability of lyophobic colloids, the interaction of soil particles having an electric double layer. New York: Elsevier, 1948. 165p.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58. (Agricultural Handbook, 537).

YOUNGS, E.G. Infiltration measurement – a review. **Hydrological Processes**, London. v. 5, n 3, p. 309-319, 1991.

YOUNGS, E.G. Developments in the physics of infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 307-313, 1995.