# VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO PRESENTE EM SOLUÇÕES E RESÍDUO AGROINDUSTRIAL

IVAN JOSE CHIRINOS

Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Maria Emilia Mattiazzo-Prezotto

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

OUTUBRO/1992

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP**

---

Chirinos, Ivan Jose
C541v Variação da condutividade hidráulica do solo saturado em função da concentração de sódio presente em soluções e resíduo agroindustrial. Piracicaba, 1992.
66p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Sódio em solo - Concentração 2. Solo - Condutividade hidráulica I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.41

# VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO PRESENTE EM SOLUÇÕES E RESÍDUO AGROINDUSTRIAL

IVAN JOSE CHIRINOS

Aprovada em: 05/11/1992

Prof.ª Dr.ª Maria Emilia Mattiazzo-Prezotto ESALQ/USP

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi ESALQ/USP

Prof. Dr. Ronaldo Severiano Berton IAC

Prof.ª Dr.ª Maria Emilia Mattiazzo-Prezotto

Orientadora

Aos meus pais Iván e Enma,
à minha avó Celia, à minha
esposa Ayllén e ao meu
filho Iván Eduardo

DEDICO

# AGRADECIMENTOS

- À Prof$^{a}$ Dr$^{a}$ Maria Emilia Mattiazzo-Prezotto, pela orientação, estímulo e amizade;

- Aos Profs. Drs. Nadir Almeida da Glória e Arquimedes Lavorenti do Departamento de Química, ESALQ/USP, pela orientação e amizade constantes;

- À Petroquímica da Venezuela (PEQUIVEN), pela bolsa de estudos;

- Ao Prof. Dr. Paulo Libardi pela orientação e colaboração na realização do trabalho;

- Aos Srs. Julio Carozzo e Julio Boissiere de PALMICHAL S.C. (Venezuela) e Antonio Leone do CONICIT (Venezuela) pelo apoio e confiança;

- Ao amigo e colega Marcos Cabral de Vasconcelos Barreto pela colaboração no processamento dos dadbs e nas análises estatísticas;

- Aos funcionários do laboratório de Química pelo inestimável auxílio nas análises químicas;

- Aos amigos Francisco Cortez e Haissa Roberta pela ajuda durante o experimento;

- À minha esposa, pelo apoio e incentivo constantes.

# LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Esquema do permeâmetro de cargas decrescentes para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ko)..... 18

Figura 2. Equipamento para determinação de Ko pelo método das cargas decrescentes.. 23

Figura 3. Variação da porcentagem de sódio trocável (PST) em função do $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra)..... 26

Figura 4. Variação de Ko para Terra Roxa Estruturada em função da PST..... 28

Figura 5. Variação de Ko para Latossolo Vermelho Escuro em função da PST..... 30

Figura 6. Variação de Ko para Areia Quartzosa em função da PST..... 31

Página

Figura 7. PST em função do $Na^+$ aplicado sem e com lavagem para TE..... 33

Figura 8. PST em função do $Na^+$ aplicado sem e com lavagem para LVe..... 34

Figura 9. PST em função do $Na^+$ aplicado sem e com lavagem para AQ..... 35

Figura 10. Variação da PST em função da relação de adsorção de sódio (RAS) da solução percolante..... 37

Figura 11. Variação da PST em função da dose de resíduo de indústria de papel e celulose adicionado..... 41

Figura 12. Variação da concentração de $Ca^{2+}$ adsorvido em função das doses de resíduo de indústria de papel e celulose adicionado..... 43

Página

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físicas e químicas dos solos utilizados no experimento..... 15

Tabela 2. Composição química das amostras de resíduo de indústria de papel e celulose levando em conta as várias etapas de fabricação..... 24

Tabela 3. Valores de relação de adsorção de sódio (RAS), $Ca^{2+}$ adsorvido (e.mg/100g terra) calculada e Ko medida para os três diferentes tipos de solos..... 39

Tabela 4. Quantidade de $Na^{+}$ aplicado (e.mg/5g terra),porcentagem de sódio trocável(PST) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) para Terra Roxa Estruturada (TE) (CTC = 16,08 e.mg/100g terra). 56

Página

Tabela 5.Quantidade de $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra),porcentagem de sódio trocável(PST) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) para Latossolo Vermelho Escuro (LVe)(CTC = 7,62 e.mg/100g terra) 55

Tabela 6.Quantidade de $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra),porcentagem de sódio trocável(PST) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) para Areia Quartzosa (AQ) (CTC = 4,55 e.mg/100g terra)..... 57

Tabela 7.Quantidade de $Na^+$ adicionado (e.mg/5g terra), Ko calculada e Ko medida para TE, resultados obtidos sem e com lavagem..... 57

Tabela 8.Quantidade de $Na^+$ adicionado (e.mg/5g terra), Ko calculada e Ko medida para LVe, resultados obtidos sem e com lavagem... 58

Página

Tabela 9. Quantidade de $Na^+$ adicionado(e.mg/5g terra), PST, Ko calculada e Ko medida para AQ, resultados obtidos sem e com lavagem 58

Tabela 10. Doses de resíduo aplicadas ($m^3$/ha), PST (%), $Ca^{2+}$ adsorvido (e.mg/100g terra) condutividade hidráulica saturada (Ko) para os três diferentes tipos de solos..... 59

Tabela 11. Resultados obtidos para $Na^+$ retido e PST nos testes preliminares ao experimento, com adição aos solos de 50 ml de diferentes soluções de sódio de concentração 400 ppm em $Na^+$..... 60

Tabela 12. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko) para Terra Roxa Estruturada (TE) com doses crescentes de $Na^+$em função do tempo de leitura. (Etapa prévia)..... 60

Página

Tabela 13. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko) para Latossolo Vermelho Escuro (LVe) com doses crescentes de $Na^+$ em função do tempo de leitura. (Etapa prévia)..... 62

Tabela 14. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko) para Areia Quartzosa (AQ) com doses crescentes de $Na^+$ em função do tempo de leitura.(Etapa prévia)..... 64

Tabela 15. Resultados de $Na^+$ adsorvido e PST para TE, LVe e AQ com adição de 50 ml de solução de NaCl(Etapa prévia)..... 66

Tabela 16. $Na^+$ e PST para TE, LVe e AQ com adição de 50 ml de solução de acetato de sódio pH 7,0 (Etapa prévia)..... 66

# SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS..... vii

LISTA DE TABELAS..... ix

RESUMO..... xv

SUMMARY..... xvii

1. INTRODUÇÃO..... 1

2. REVISÃO DE LITERATURA..... 3

2.1. Condutividade hidráulica do solo saturada (Ko)..... 3

2.2. Efeitos do sódio sobre a condutividade hidráulica..... 5

2.3. Equilíbrios de troca iônica..... 7

2.4. Sodicidade associada aos resíduos..... 10

3. MATERIAL E MÉTODOS..... 14

3.1. Solos utilizados e etapa prévia..... 14

3.2. Metodologia para determinação da condutividade hidráulica saturada (Ko)..... 16

3.3. Determinação da porcentagem de sódio trocável (PST)..... 19

3.3.1. Etapa 1..... 19

3.3.2. Etapa 2..... 20

3.3.3. Etapa 3..... 21

Página

3.3.4. Etapa 4..... 22

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 25

4.1. Determinação da porcentagem de sódio trocável (PST) e sua relação com a condutividade hidráulica saturada (Ko) do solo. 25

4.2. Avaliação do efeito da lixiviação do sódio sobre a PST e sobre a condutividade hidráulica saturada (Ko)..... 32

4.3. Avaliação do efeito da relação de adsorção de sódio (RAS) sobre a condutividade hidráulica saturada (Ko) medida através da PST e relação RAS x Ca..... 36

4.4. Avaliação do efeito da adição de resíduo de indústria de papel e celulose sobre a condutividade hidráulica saturada (Ko). Relação resíduo x Ca..... 40

5. CONCLUSÕES..... 46

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 48

APÊNDICE..... 56

# VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO PRESENTE EM SOLUÇÕES E RESÍDUO INDUSTRIAL

Autor: IVAN JOSE CHIRINOS

Orientadora: MARIA EMILIA MATTIAZZO-PREZOTTO

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo o estabelecimento de algumas premissas básicas para descarte em solos de resíduos contendo sódio. A avaliação do efeito da presença de sódio foi feita através de experimentos, em condições de laboratório, relacionando-se porcentagem de sódio trocável (PST), relação de adsorção de sódio (RAS) da solução percolante e condutividade hidráulica saturada em três diferentes tipos de solos.

Concluiu-se que a presença de sódio não afeta igualmente os diferentes tipos de solos. Também o limite crítico de concentração varia com o tipo de solo e com a PST desse solo. Para o solo argiloso (TE) de alta CTC o valor de PST crítico foi menor que 5%. Em LVe o PST crítico foi menor que 8%; e para AQ o PST crítico foi menor que 6%.

Também concluiu-se que o efeito prejudicial da

presença de sódio sobre a condutividade hidráulica pode ser revertido pela lavagem do solo, indicando que a adição ao solo de resíduos contendo sódio pode ser acompanhada da aplicação de lâminas de água ou mesmo do aproveitamento das épocas de chuva para o descarte.

# VARIATION ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SATURATED SOIL RELATED TO SODIUM SOLUTION CONCENTRATIONS AND SODIUM CONTAINING WASTES

Author: IVAN JOSE CHIRINOS

Adviser: MARIA EMILIA MATTIAZZO-PREZOTTO

## SUMMARY

This paper intends to establish basic rules for land disposal of sodium containing wastes.

The assessment of sodium effect was made through experiments under lab conditions by relating exchangeable sodium percentage (ESP),sodium adsorption rate (SAR) of the percolating solution and saturated hydraulic conductivity (Ko) in three different soil types.

It was shown that sodium effect is not the same for the three different soil types. Also the threshold concentration changes with soil type, and with ESP of the soil.

For the high CEC clay soil the critical ESP value was lower than 5%, for medium texture soil the critical ESP value was lower than 8%, and for the sandy soil the critical ESP value was lower than 6%.

It was also concluded that the harmful effect of

sodium on the hydraulic conductivity can be reverted by soil leaching, that means that land disposal of sodium containing wastes should be followed by water applications or by using the rainy season for the disposal.

# 1. INTRODUÇÃO

Quando se considera o uso do solo como depurador de resíduos, pode-se ter como objetivo unicamente a degradação biológica do conteúdo orgânico, como também pode-se visar o uso do resíduo como fonte de matéria orgânica para o solo e nutrientes para as culturas, porém em qualquer dos casos citados a composição do resíduo é de importância fundamental, uma vez que a presença de íons não adequados à atividade agrícola pode causar danos, em certos casos irreversíveis, ao solo onde o resíduo foi ou é descartado.

Entre os íons não adequados à atividade agrícola se encontra o sódio, uma vez que em virtude de níveis presentes no resíduo e quantidade aplicada, pode provocar consequências indesejáveis tanto para o solo como para a planta indo desde a diminuição na condutividade hidráulica do solo à elevação da pressão osmótica da solução do solo, com os consequentes problemas associados à cada diferente cultura.

Os efeitos prejudiciais causados pela presença de sódio em solos foram primeiramente detectados em regiões áridas e semi-áridas onde eram usadas águas salinas e sódicas para irrigação. Informações acerca do comportamento do sódio em regiões tropicais úmidas são virtualmente inexistentes, uma vez que em solos do trópico úmido altamente intemperizados o teor de sódio é muito baixo não constituindo um problema, porém tendo em vista o descarte de resíduos com alto teor de sódio nesses solos temos que considerar a possibilidade de efeitos prejudiciais.

Diante do exposto o presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da presença de sódio, quantificado pela porcentagem de sódio trocável do solo, e da relação de adsorção de sódio da solução percolante (soluções preparadas e amostra de resíduo) na condutividade hidráulica saturada de três solos da região de Piracicaba, Estado de São Paulo.

# 2. REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica é um parâmetro essencial na determinação quantitativa do movimento da água em solos e, consequentemente para solucionar problemas que envolvem irrigação, drenagem, recarga, e conservação da água e do solo (SAUNDERS et alii, 1978).

Em um solo de estrutura estável ou um material poroso rígido,a condutividade hidráulica(Ko) é uma característica constante do material. Sua ordem de grandeza é de $10^{-2}$ a $10^{-3}$ cm/s em materiais arenosos e $10^{-4}$ a $10^{-7}$ cm/s em materiais argilosos. A condutividade hidráulica é obviamente afetada pela estrutura e textura do solo, sendo maior em solos altamente porosos, fraturado ou agregado e menor em solos densos e compactados (REICHARDT, 1985).Também a condutividade hidráulica pode ser afetada por excesso de $Na^{+}$ presente ou adicionado ao solo.(GARDNER et alii, 1959).

Segundo PAULETTO et alii (1988) a primeira equação que possibilitou a quantificação do movimento da água em meios porosos saturados foi apresentada por DARCY (1856). Este último estudando a dinâmica da água em meios porosos, verificou experimentalmente, em colunas de areias saturadas, que a densidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico, e que o fator de proporcionalidade, a condutividade hidráulica, caracteriza o meio quanto a capacidade em transmitir água.

De acordo com CADIMA et alii (1980), os primeiros métodos desenvolvidos para o cálculo da condutividade hidráulica foram de laboratório, utilizando amostras com estrutura deformada.

Por outro lado LIBARDI (1992) indica que os métodos de laboratório podem ser usados para amostras com estrutura deformada e indeformada. Esses métodos por sua vez,são subdivididos para condições de saturação e não saturação.

Entre os métodos de laboratório para determinação da condutividade hidráulica em condição de saturação se incluem o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga decrescente. O primeiro é adequado para amostras de solo cujos valores de Ko sejam maiores que 0,01 cm/min (14,4 cm/dia), e o segundo (de carga decrescente) para amostras de solo com Ko menores 0,01 cm/min (menor que 14,4 cm/dia). (LIBARDI, 1992).

## 2.2. Efeitos do sódio sobre a condutividade hidráulica do solo

O mecanismo de diminuição da permeabilidade do solo pela adição de sódio foi primeiramente explicado por QUIRK & SCHOFIELD (1955) que sugeriram que a expansão das partículas de argila, a qual aumenta com o aumento da sodicidade da argila, pode resultar num bloqueio total ou parcial dos poros condutores. Além disso os autores consideraram que outros mecanismos secundários como a defloculação, dispersão e movimento da argila dentro dos poros condutores poderiam causar entupimento desses poros.

Atualmente se reconhece a importância da dispersão das argilas em afetar a permeabilidade do solo (FELHENDLER et alii, 1974; SHAINBERG et alii, 1981). A dispersão de argilas pode causar a formação de uma camada de argila impermeável no perfil do solo.

As diferenças entre os processos de expansão e dispersão são muito importantes para a explicação da permeabilidade (SHAINBERG et alii, 1981). Enquanto que a expansão é um processo essencialmente reversível, a dispersão das argilas é irreversível. A expansão das argilas não é grandemente afetada por valores de porcentagens de sódio trocável (PST) abaixo de 10, porém

torna-se importante quando se tem valores de PST acima de 15 (McNEAL & COLEMAN, 1966; OSTER & SPOSITO, 1980).

A permeabilidade de um solo à água depende da porcentagem de sódio trocável (PST) (PST = $= \frac{Na^{+} \text{ adsorvido}}{CTC} \times 100$)presente nesse solo e da concentração de sais da solução percolante ou relação de adsorção de sódio (RAS), de acordo com QUIRK & SCHOFIELD (1955); McNEAL & COLEMAN (1966); McNEAL et alii (1968); YARON & THOMAS (1968);FRENKEL et alii (1978). Nesse aspecto FERREYRA et alii (1991) trabalharam em um solo aluvial e demonstraram que mantendo-se a concentração salina constante, o aumento da RAS da solução percolante provocou uma redução na condutividade hidráulica saturada (Ko) e que também aumentos nos valores de condutividade elétrica (CE) determinaram aumentos de Ko, para todos os valores de RAS, embora mais pronunciado nos valores de RAS entre 5 e 15.Efeitos semelhantes foram observados por PIMENTA(1991) também em um solo aluvial. MALIWAL (1989) trabalhando com 5 tipos de solo e 2 tipos de argila (Bentonita e caulinita), encontraram que a dispersão das argilas aumentou com a saturação em sódio e foi estreitamente relacionada com a PST. As propriedades químicas e físicas dos solos de textura leve foram menos afetadas do que aqueles de textura argilosa. Por outro lado LIMA et alii (1990) trabalhando em um solo "Yolo loam" da California-USA, demonstraram que a condutividade hidráulica

saturada diminuiu com o aumento da relação de adsorção de sódio (RAS) e aumentou com o incremento da condutividade elétrica da solução percolante. Resultado semelhantes foram encontrados por GUPTA et alii (1989).

Com o fim de descrever a relação entre condutividade hidráulica e composição da solução percolante QUIRK & SCHOFIELD (1955), desenvolveram o conceito de "limite crítico de concentração", que é o valor de PST que provoca uma queda de 10-15% na permeabilidade em relação ao solo sem problemas de sódio. A permeabilidade do solo pode ser mantida desde que a concentração salina da solução percolante acarrete valores de PST abaixo desse nível crítico. Os dados obtidos por LIMA et alii (1990) apoiam o conceito do "limite crítico de concentração".

## 2.3. Equilíbrios de troca iônica

Com relação aos equilíbrios químicos de troca iônica existentes no sistema solo a ação do sódio pode ser explicada, de acordo com SHAINBERG (1984), através de dois mecanismos. No primeiro deles os cátions são atraídos eletrostaticamente para a superfície da argila carregada negativamente e numa segunda fase esses cátions tendem a se difundir da superfície da partícula onde sua concentração é alta, para dentro da solução onde a concentração é baixa.

Nesse aspecto o autor salienta a importância do número de oxidação do cátion. Por esse motivo cátions divalentes são atraídos à superfície da argila com uma força duas vezes maior do que a força de atração dos monovalentes. Por essa razão o sódio como cátion monovalente é adsorvido ou só consegue deslocar o cálcio adsorvido por efeito de concentração. Portanto,a quantidade de sódio presente no complexo de troca do solo é função também da presença de outros cátions (KINJO & MARCOS, 1982 II).

SINANUWONG & EL-SWAFY (1974), trabalhando no Havaí com vertissolos observaram que o comportamento do sódio em solos é função do tipo de solo, existindo "solos divalentes" com grande preferência por sódio. Segundo os autores a equação de Gapon é a mais adequada para explicar o equilíbrio envolvendo $Na^+$ e $Ca^{2+}$ e $Na^+$ e $Mg^{2+}$.

$$Na\ ad/Ca\ ad = K_G(Na^+)/(Ca^{2+})^{1/2} \qquad (1)$$

onde: Na ad/Ca ad = relação de sódio trocável (RST);

$K_G$= constante de Gapon;

$(Na^+)/(Ca^{2+})^{1/2}$= relação de adsorção de sódio (RAS)

Então,a equação (1) pode ser escrita:RST = $K_G$RAS (2).

Com relação à "preferência" do solo pela adsorção de determinado cátion existem solos que tem maior preferência pela adsorção de $Ca^{2+}$ do que o $Na^+$.(EL SWAFY et alii, 1969).

Por outro lado LEIJ et alii (1990), trabalhando em ultissolos determinaram que as isotermas de adsorção ou de troca destes solos tinham uma tendência a favor de adsorção dos cátions monovalentes Na e K. TORRES et alii (1989) determinaram para 4 tipos de solos da Colômbia a preferência destes solos na adsorção $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$ em relação ao $Na^{+}$. SILVA et alii (1991) encontraram em solos aluviais do nordeste brasileiro que a maior afinidade pelo sódio era devida ao aumento da concentração eletrolítica da solução em equilíbrio. Também observaram que a diminuição do KG (constante de Gapon)com o aumento da proporção de sódio na solução elètrolítica pode ser explicada, assumindo-se que as argilas apresentam diferentes sítios de troca com diferentes afinidades pelo sódio ou cálcio. Dessa maneira, em primeiro lugar são preenchidos os sítios de troca com maior afinidade pelo sódio e, posteriormente, com o aumento do sódio trocável, os de baixa afinidade.

KINJO & MARCOS (1982 II) estudando o equilíbrio de troca catiônica entre sódio e cálcio em solos do Estado de São Paulo, empregaram a equação de Gapon e a teoria da dupla camada iônica para explicar esse equilíbrio de troca. Os autores determinaram que a PST aumentou linearmente com a elevação da RAS. Também foi encontrado que para solos da região tropical úmida, nos quais predominam colóides com carga superficial variável, o

aumento das cargas negativas provocado pela elevação do pH, resultou num aumento da densidade de carga a qual provocou um decréscimo no acúmulo relativo de sódio trocável do solo.

## 2.4. Sodicidade associada aos resíduos

O problema do sódio aparece usualmente associado à utilização de águas de irrigação contendo $Na^+$, e/ou associados à baixa precipitação, porém atualmente devido ao descarte de resíduos industriais pode-se associar os problemas de adições de sódio em solos de região tropical úmida, com o descarte de substâncias ou compostos derivados de atividades industriais onde é usado o sódio ou como elemento essencial no processo industrial ou para lavagem de equipamentos.

Com relação aos resíduos da indústria petroquímica, segundo SIMON (1991) no SITEL (Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos) no Rio Grande do Sul são aplicados numa área total de 200 ha 6.500.000 $m^3$ de efluentes líquidos/ano com uma concentração média de 474,6 ppm de Na.O principal impacto observado foi a redução drástica da infiltração na camada superficial (0-20 cm), atribuindo-se esse fenômeno à dispersão de argilas. Com relação à indústria de papel e celulose, HERRERA (1991) reporta o uso de resíduos sólidos na

RIOCELL no Rio Grande do Sul com 0,21% de $Na^+$,entretanto o autor não menciona a dose usada nem os efeitos do $Na^+$ sobre o solo OHNO et alii (1991), reporta que o uso de cinzas de madeira pode fornecer 16% de $Na^+$ ao solo e KANNAN et alii (1990) verificaram um aumento no teor de $Na^+$ do solo com a aplicação de efluente de fábrica de polpa de papel. STEWART (1975) relata teores de sódio em estercos de boi que vão de 0,17 a 1,34%; em lodos de esgoto secos de 0,39% de Na e em lodos de esgoto urbano de 0,47%.

De acordo com VITYAZEV et alii (1990) o uso de águas residuárias da fermentação em canaviais resolveria o problema do descarte dessas águas mas por outro lado poderia provocar acumulação de sódio no decorrer do tempo, conforme foi demonstrado para um solo ferralítico amarelo (oxisol).

No que diz respeito ao descarte de resíduos urbanos compostados no solo, MURILLO et alii (1989) sugerem que seu uso ocasional adiciona cerca de 3% de $Na^+$ ao solo o qual pode provocar problemas com o tempo.

HAYES et alii (1990) relataram que o uso em solo de lodos de esgotos secundários provocou incrementos nos teores de $Na^+$ de 6,0 mmol/l e nos valores de PST de 6,8%.

Uma atividade industrial importante no Brasil é a indústria do couro, e nesse sentido SANTOS (1982) indica que das operações de curtimento resultam

águas residuárias as quais são recolhidas e tratadas e após este tratamento o precipitado obtido possui 21,9% de NaCl.

Após feita a revisão e levando em conta os ítens tratados, pode-se verificar que:

-No aspecto da determinação da condutividade hidráulica em saturação (Ko) existem inúmeros trabalhos que fornecem informação com a qual é possível estabelecer comparações entre métodos, critérios para a escolha do mais adequado, e grau de exatidão de cada um. A maioria dos trabalhos consultados tratam da avaliação da condutividade hidráulica ao nível de campo. O objetivo desses trabalhos é o de servir como ferramentas para serem usados na elaboração de projetos de irrigação e drenagem.No entanto,o método de cargas decrescentes é bastante adequado na determinação de Ko em amostras deformadas e pequenas, além disso a Ko desses solos é menor do que 14,4 cm/dia.

-Quanto ao efeito do sódio sobre as propriedades físicas do solo, é importante observar que as condições para as quais o efeito do $Na^+$ é considerado como tendo maior relevância estão relacionadas ao uso de águas salinas ou sódicas, pouca precipitação e alta evaporação. Nesse aspecto todos os trabalhos encontrados na literatura referem-se aos estudos feitos em regiões áridas e

semi-áridas,relacionados à adição do sódio através de águas de irrigação. A virtual ausência de trabalhos em condições diferentes destas e principalmente associados ao uso de resíduos, mostra claramente a necessidade de estudos nesse sentido.

- O equilíbrio de troca iônica Ca-Na tem sido pouco estudado, nas condições de solos altamente intemperizados da região tropical úmida onde o sódio não representa problema. Mas pode ser motivo de preocupação devido às razoáveis quantidades deste elemento, que são adicionadas ao solo, como componente de resíduos derivados de diversas atividades industriais onde o elemento é usado no processo industrial ou para lavagem de equipamentos.

- No que diz respeito aos resíduos que contém sódio, na literatura existem poucos trabalhos onde se relacionam o seu uso associados à problemas de permeabilidade .A maioria deles referem-se ao uso de resíduos como fornecedores de nutrientes, como fonte de matéria orgânica e/ou de metais pesados. Isto evidencia que o assunto tem sido até certo ponto descuidado, principalmente quando se cogita do uso do solo como meio de descarte de resíduos.

# 3. MATERIAL E MÉTODOS

## 3.1. Solos utilizados e etapa prévia

Foram utilizados três diferentes tipos de solos: Terra Roxa Estruturada (TE); Latossolo Vermelho Escuro (LVe) e Areia Quartzosa (AQ), coletados na região de Piracicaba,SP da camada de 0-20 cm. As características físicas e químicas desses solos aparecem na Tabela 1. Esses solos foram escolhidos em virtude das diferenças entre os valores de capacidade de troca de cátions.

O experimento foi conduzido no laboratório de Química Analítica do Departamento de Química da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo(ESALQ/USP), e foi dividido em várias etapas, sendo que numa etapa prévia foram feitos testes com os diferentes solos e com diferentes soluções contendo $Na^+$, para verificação do efeito de cada uma delas na PST de cada solo.Assim é que foram testadas soluções de NaCl pH 7,0 e pH 5,5, $CH_3$-COONa pH 7,0; $NaHCO_3$ pH 7,0 e pH

8,2; $Na_2SO_4$ pH 5,5 e pH 7,0; $NaNO_3$, pH 7,0 e pH 5,7.

Tabela 1. Características físicas e químicas dos solos utilizadas no experimento

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

| Solo | Areia | | | | | | Silte | Argila | | Floculação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MG | G | M | F | MF | T | (%) | Total | Água | (%) |
| TE | - | 3 | - | 5 | - | 8 | 20 | 72 | 49 | 32 |
| LVe | - | 3 | 22 | 37 | 4 | 66 | 6 | 28 | 11 | 61 |
| AQ | - | 9 | 39 | 39 | 3 | 88 | 2 | 10 | 5 | 50 |

Classe de textura: TE: arg.
LVE: md-arq
AQ: ar

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

| Solo | pH (água) | C % | P ppm | K ppm | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^+$ | Al | H+Al | S | T | V % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | e.mg/100g | | | | | | | |
| TE | 5,2 | 1,66 | 7 | 161 | 6,00 | 2,20 | 0,27 | 0,25 | 7,20 | 8,68 | 16,08 | 55 |
| LVe | 6,9 | 0,79 | 62 | 157 | 3,35 | 1,55 | 0,12 | traços | 2,20 | 5,42 | 7,62 | 71 |
| AQ | 5,7 | 0,46 | 4 | 81 | 1,40 | 0,44 | 0,10 | 0,05 | 2,40 | 2,15 | 4,55 | 47 |

Em virtude dos resultados obtidos foi feita a opção pela utilização de solução de acetato de Na pH 7,0. Foram também feitos testes prévios para determinar as concentrações de sódio que seriam utilizadas na montagem das várias etapas do experimento e das condições para determinação de Ko.

### 3.2. Metodologia para determinacao da condutividade hidraulica saturada (Ko)

No que diz respeito à condutividade hidráulica foram testados vários métodos dos quais o que apresentou melhores resultados foi o do permeâmetro de carga decrescente, cujo esquema aparece na Figura 1.

Metodologia: 5g de amostra de terra foram colocadas em tubo de percolação (1) de 1,8 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Esse tubo se liga a um segundo tubo (2) através de uma mangueira de latex (Figuras 1 e 2). Esse segundo tubo é provido de uma oliva para saída de água(A'). Fecha-se A'através de uma pinça de Mohr e adiciona-se água ao tubo 2 de forma que a água penetre no solo de baixo para cima provocando a saturação do solo. Após 18 horas de saturação que permitiu o rearranjamento das partículas, fechou-se a mangueira de comunicação entre os tubos 1 e 2 com outra pinça de Mohr. Retirou-se a pinça colocada em A'

e após esvaziar a água contida no tubo 2 retirou-se a pinça da mangueira de comunicação entre os tubos. A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada através da diminuição da altura da coluna de água que foi medida em intervalos de tempo de 1 em 1 hora, até um prazo máximo de 24 horas. .Os valores de Ko usados no presente trabalho foram os medidos 6 horas após o início da percolação, isto porque foi verificado a estabilização dos valores de Ko nesse tempo.

Nessas condições a condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) é calculada pela equação:

$$Ko = \frac{aL}{A\ \Delta t} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \qquad (1)$$

onde: Ko = condutividade hidráulica do solo saturado

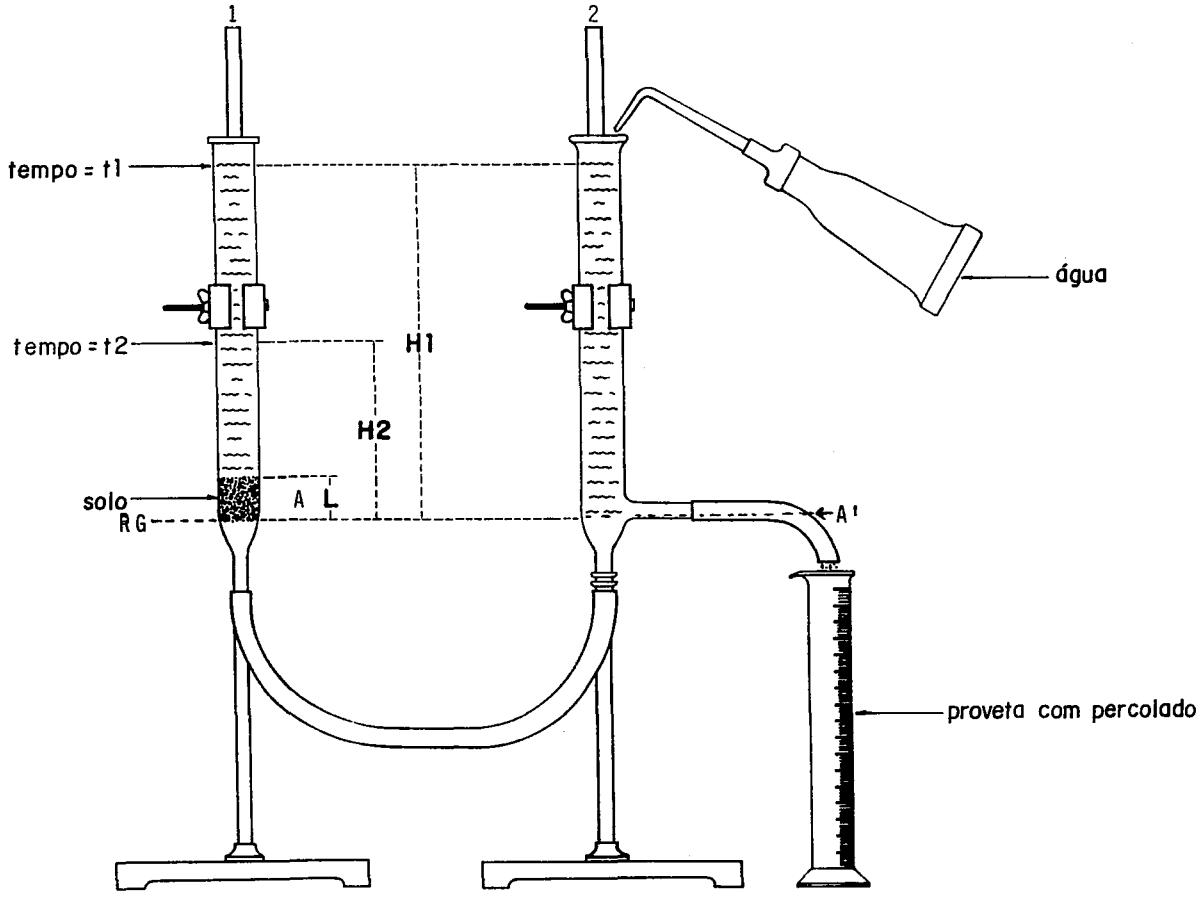
$\Delta t = t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo para que a diferença de potencial hidráulico diminua de $H_1$ para $H_2$.

A = área da secção transversal da coluna de solo

a = área da secção transversal do tubo de vidro

L = altura da amostra de solo

No presente caso A = a, portanto, a equação aparece em (2).




RG = Referência gravitacional

Figura 1. Esquema do permeâmetro de cargas decrescentes para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ko)

$$Ko = \frac{L}{\Delta t} \ln \left(\frac{H_1}{H_2}\right) \qquad (2)$$

## 3.3. Determinação da porcentagem de sódio trocável (PST)

3.3.1. Etapa 1. Nessa primeira etapa de estudo foi feita a avaliação do teor de sódio adicionado e a correspondente variação da PST dos três solos. Nessa etapa o sódio foi aplicado sob forma de uma solução de acetato de sódio pH 7 nas concentrações de 100 ppm $Na^+$ (4,35 meq $Na^+/dm^3$, 400 ppm de $Na^+$ (17,39 meq $Na^+/dm^3$) e 800 ppm $Na^+$ (34,79 meq $Na^+/dm^3$).

Metodologia: À amostras de 5 g de cada um dos três solos foram adicionados 50 ml (2x25m) das várias soluções contendo $Na^+$; após isso o excesso de $Na^+$ foi lavado com 50 ml (5 x 10ml) de solução hidroalcoólica 80% e posteriormente foi feita a passagem de 75 ml de solução de acetato de amônio 1N pH 7. O extrato obtido foi analisado para $Na^+$ em fotômetro de chama Micronal B262. As determinações foram feitas com 3 repetições.

Nessa etapa também foi feita a determinação da condutividade hidráulica saturada e para tanto os tubos de percolação contendo o solo após a passagem da solução contendo $Na^+$ e lavagem com solução hidroalcoólica foram interligados à um tubo especial de acordo com a

metodologia descrita em 3.2.

Os valores de concentração de sódio foram relacionados com a CTC e multiplicados por 100 para determinar a PST. Estes valores foram correlacionados com os de condutividade hidráulica (Ko) obtidos para cada tratamento e os modelos matemáticos foram usados para interpolar os valores de PST obtidos nas etapas posteriores (LAGERWERF et alii, 1969).

3.3.2. Etapa 2. Na segunda etapa de estudos foi avaliada a variação na PST e Ko dos três solos frente à passagem de solução salina seguida de passagens de água. Com isso pretendeu-se determinar o efeito da lixiviação do sódio sobre a PST e condutividade hidráulica.

Nessa etapa foram utilizadas soluções de sódio de concentrações de 100 ppm (4,35 meq $Na^+/dm^3$), 500 ppm (21,74 meq $Na^+/dm^3$), 1000 ppm (43,48 meq $Na^+/dm^3$) e 2000 ppm (86,96 meq $Na^+/dm^3$).

A concentração dessas soluções teve em vista a simulação de níveis de sódio normalmente encontrados em resíduos da indústria petroquímica (SIMON, 1991) e indústria de papel e celulose (HERRERA, 1991). Também teve em vista a possibilidade de interpolação dos valores de PST aos obtidos na 1ª etapa.

Metodologia: Para essa segunda etapa a quantidade de solução de acetato de sódio pH 7,0 adicionada aos solos foi correspondente à uma aplicação de 100 $m^3$ de resíduos/ha.A tubos de percolação contendo 5g de solo, foi adicionada solução 1N de acetato de Na pH 7,0 seguido da adição de 2 x 12,5 ml de $H_2O$ destilada (o que corresponde a 2 chuvas de 50 mm cada). Os valores de PST determinados foram interpolados nos modelos obtidos na 1ª etapa para obter a condutividade hidráulica em saturação esperada para cada tratamento (100, 500, 1000 e 2000 ppm $Na^+$). Também foram feitas as determinações de Ko no laboratório para serem comparadas aos valores obtidos a partir dos modelos.

3.3.3. Etapa 3. Numa terceira etapa foi estudado o efeito da presença de cálcio na solução percolante contendo o sódio. Para isso foram preparadas soluções contendo sódio e cálcio correspondentes a diferentes valores da relação de adsorção de sódio (RAS).

A metodologia empregada foi a mesma descrita em 3.3.1. com a diferença que a dose empregada correspondeu a uma aplicação em solo de 100 $m^3$/ha da solução.

As soluções usadas na terceira etapa do trabalho foram preparadas mantendo fixa a quantidade de $Na^+$ em 1000 ppm Na (43,48 meq $Na^+/dm^3$).Para a solução de RAS = 5 concentração de cálcio foi de 151,24 meq de $Ca^{2+}/dm^3$;para

RAS = 15, 16,80 meq $Ca^{2+}/dm^3$, e para RAS = 25 de 6,05 meq $Ca^{2+}/dm^3$. Estas soluções foram preparadas usando acetato de sódio e $CaCl_2.2H_2O$ e acertando o pH da solução final a 7,0.

**3.3.4.** Etapa 4. Numa quarta etapa foi usada uma amostra de resíduo de indústria de papel e celulose cuja composição aparece na Tabela 2. O resíduo foi adicionado em doses crescentes correspondentes a aplicação ao solo de 50, 100 e 200 $m^3$/ ha do resíduo, seguindo a mesma metodologia descrita em 3.3.1. Foram determinadas a PST, a concentração de cálcio na CTC e Ko. Igual as etapas anteriores os valores de PST foram interpolados para determinar a condutividade hidráulica saturada através dos modelos. Foi também feita a correlação entre o $Na^+$ e o $Ca^{2+}$ na CTC.As medições de Ko no laboratório, conforme já mencionado anteriormente, foram feitas para serem comparadas às obtidas com os modelos.

Figura 2. Equipamento para determinação de Ko pelo método das cargas decrescentes

Tabela 2. Composição química das amostras de resíduo de indústria de papel e celulose levando em conta as várias etapas de fabricação

| Material | N total | $P_2O_5$ % | $K_2O$ % | Na ppm | Ca ppm | Mg ppm | M.O. % | C.O. % | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Efluente da cloração | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 564 | 60 | traços | 0,10 | 0,09 | 2,4 |
| Efluente da entrada do primário | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 502 | 361 | 24 | 0,07 | 0,06 | 6,5 |
| Efluente da extração | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 1004 | 20 | traços | 0,27 | 0,09 | 9,7 |
| Efluente da saída da fábrica[1] | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 564 | 140 | 12 | 0,05 | 0,03 | 7,1 |
| Licor negro TQ 4 (14%) | 0,01 | <0,01 | 0,50 | 29205 | 187 | 56 | 8,13 | 4,98 | 12,3 |

[1] Usado no experimento

O valor da relação de adsorção de sódio (RAS) do resíduo é calculado pela expressão:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

sendo a concentração dos cátions expressa em $e.mg/dm^3$; portanto a RAS do resíduo utilizado é igual a 12,25.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. Determinação da porcentagem de sódio trocável (PST) e sua relação com a condutividade hidráulica saturada (Ko) dos solos

Nas Tabelas 4, 5 e 6 do apêndice são apresentados os valores de PST e condutividade hidráulica saturada em função da quantidade de Na aplicada, para cada um dos solos utilizados. Em função dos dados dessas Tabelas construiu-se a Figura 3 que mostra a correspondência entre quantidade de sodio adicionada e PST. Os valores de PST são proporcionalmente maiores em solos com menor CTC efetiva, como é o caso do LVe e AQ. Em nenhum dos solos se conseguiu um valor de PST de 100%. Estes resultados concordam com os obtidos por KINJO & MARCOS (1982.I). Se por um lado os valores de PST são menores em solos de CTC efetiva maior, por outro a quantidade de $Na^+$ adsorvida é maior nesses solos. Pode-se também observar que a partir de adições de $Na^+$ superiores à 1,74 e.mg/5g terra, o que corresponde a 34,80 e.mg/100g terra, não se consegue obter

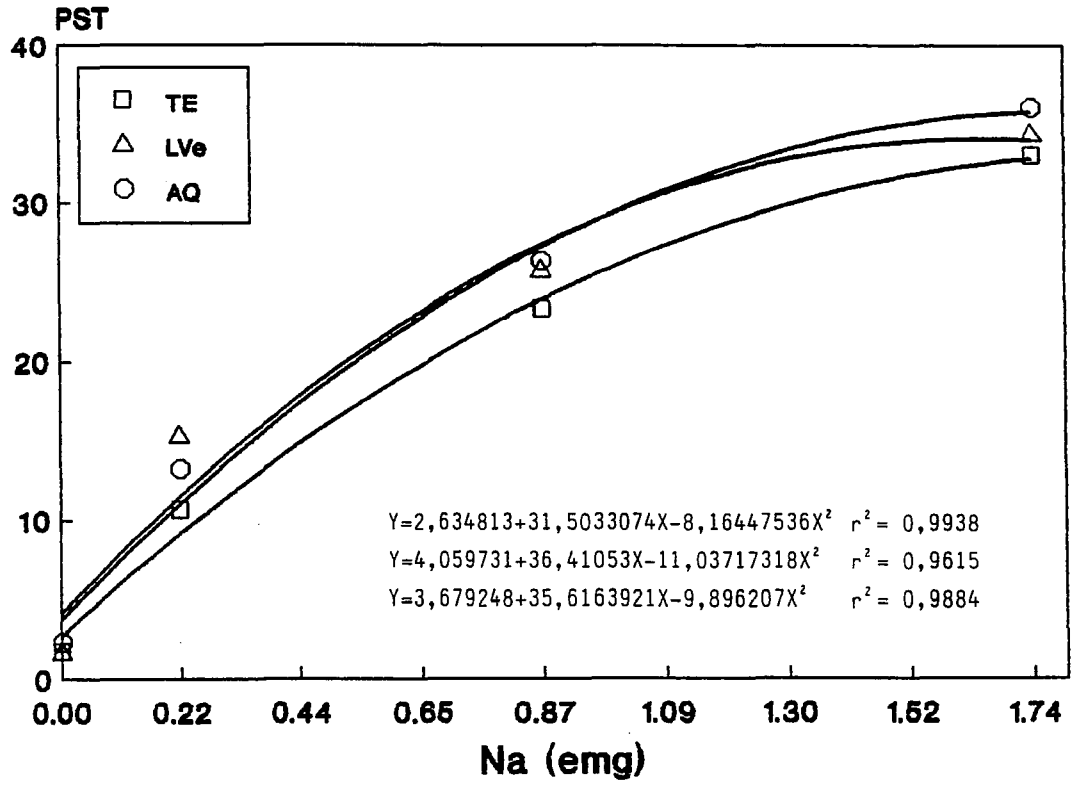



Figura 3. Variação da porcentagem de sódio trocável (PST) em função do $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra)

correspondentes aumentos de PST. Isto é possivelmente devido à existência de sítios preferenciais de troca nos solos. No que diz respeito à condutividade hidráulica saturada (Ko), esta diminui com o aumento na PST, o que confirma os resultados obtidos em trabalhos que relacionam esses dois parâmetros (QUIRK & SCHOFIELD, 1955; McNEAL & COLEMAN, 1966).

Para Terra Roxa Estruturada (TE) a Figura 4 mostra que de acordo com o conceito do "limite crítico de concentração" (QUIRK & SCHOFIELD, 1955), valores de PST menores que 5% já provocariam queda de 15% na permeabilidade.Quando se considera o valor de PST = 15, que segundo McNEAL & COLEMAN (1966), OSTER & SPOSITO (1980) é aquele à partir do qual o sódio começa a afetar seriamente a permeabilidade, a condutividade hidráulica (Ko) seria de 3,51 cm/dia(calculada pela regressão apresentada na Figura 4), o que representa uma queda de 73,60% no valor de Ko, muito superior ao definido pelo conceito de "limite crítico de concentração". Para adições correspondentes à 0,87 e 1,74 e.mg de $Na^+$/5g terra atingiu-se 23,22 e 32,87 de PST, respectivamente, o que corresponde à quedas de 81,35 e 88,04% na condutividade hidráulica desse solo.

Conforme se pode observar pelo exame da Figura 4, a equação de regressão para a Terra Roxa Estruturada, embora tenha um coeficiente de correlação de 0,9321 não

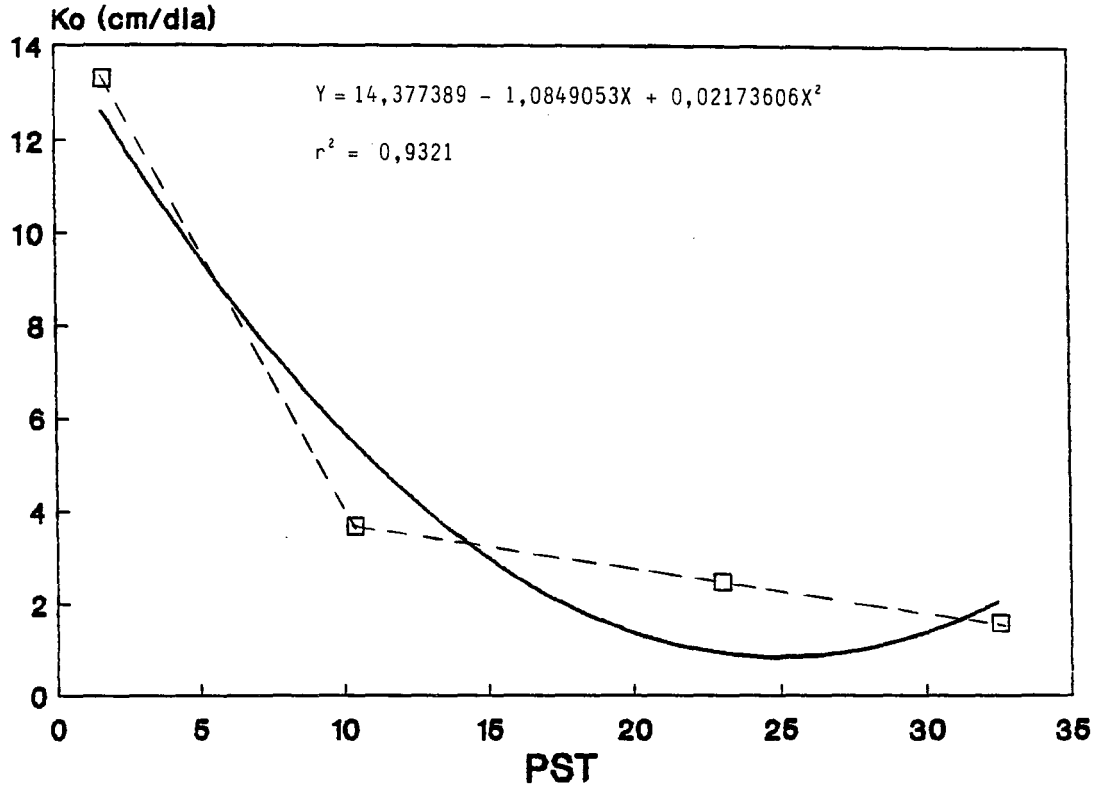



Figura 4. Variação de Ko para Terra Roxa Estruturada em função da PST

mostra o real comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado em relação à PST. Enquanto que pela observação da curva se pode concluir por um aumento nos valores de Ko à partir de 32,87% de PST, o que se tem pelo exame dos dados é um contínuo decréscimo nos valores de Ko (linha tracejada), tornando errôneas extrapolações de Ko para valores de PST acima de 32,87%.

Em LVe observou-se uma diminuição de 28,38% na condutividade hidráulica correspondente à um valor de PST de 15,27. Isto indica que o limite crítico de concentração, calculado pela regressão apresentada na Figura 5, para LVe corresponde a 8%. Para quantidades de $Na^+$ adicionadas entre 0,87 e 1,74 e.mg/5g terra (correspondente à adição de 17,4 e 34,8e.mg/100g de terra)a queda na condutividade foi de 46,6 e 52,4%, respectivamente. Para AQ (Figura 6)o "limite crítico de concentração" corresponde a um valor de PST de aproximadamente 6. Com adições ao solo de 0,87 e 1,74 e.mg de $Na^+$/5g terra atingiu-se valores de PST de 26,22 e 35,89 respectivamente, que provocaram quedas de 75 e 60% na condutividade hidráulica. Ainda com relação a condutividade hidráulica é importante notar que para valores de PST = 35,89, a queda observada no valor de Ko foi menor do que em valores de PST = 26,22. Isto pode ter sua explicação no fato de que a elevada quantidade de $Na^+$ aplicada, nesse tipo de solo, teve efeito floculante da argila e não dispersante. De fato,todos os cátions podem

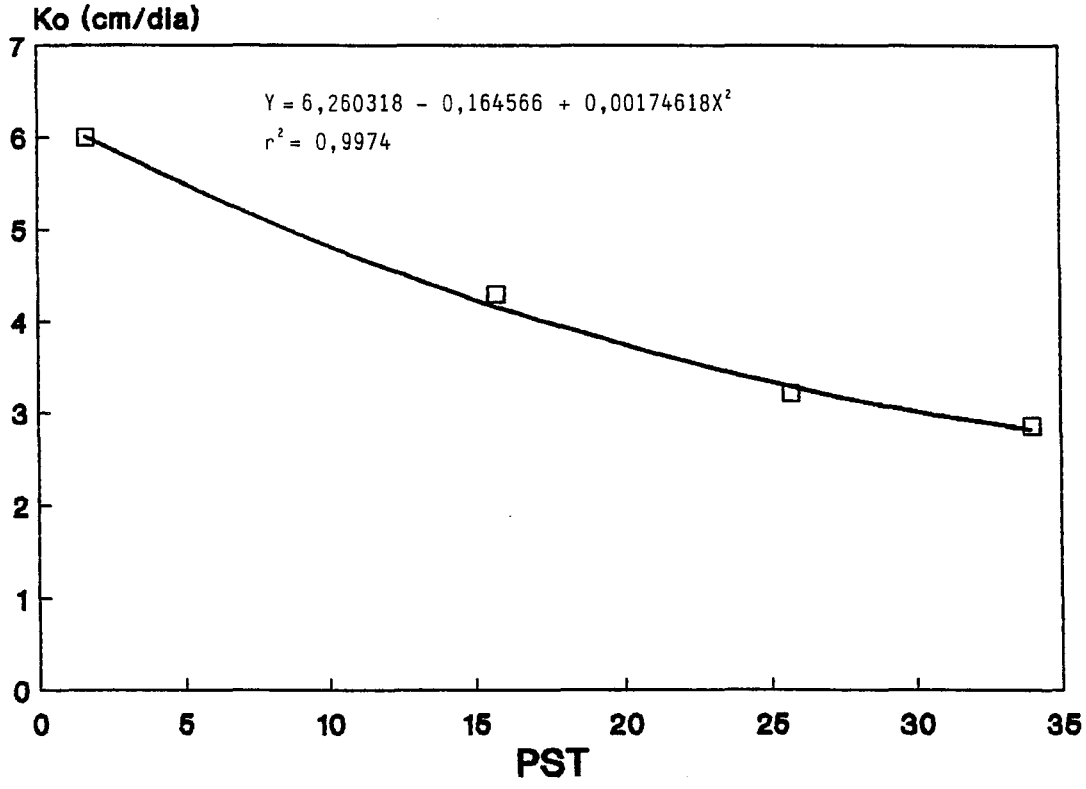



Figura 5. Variação de Ko para Latossolo Vermelho Escuro em função da PST

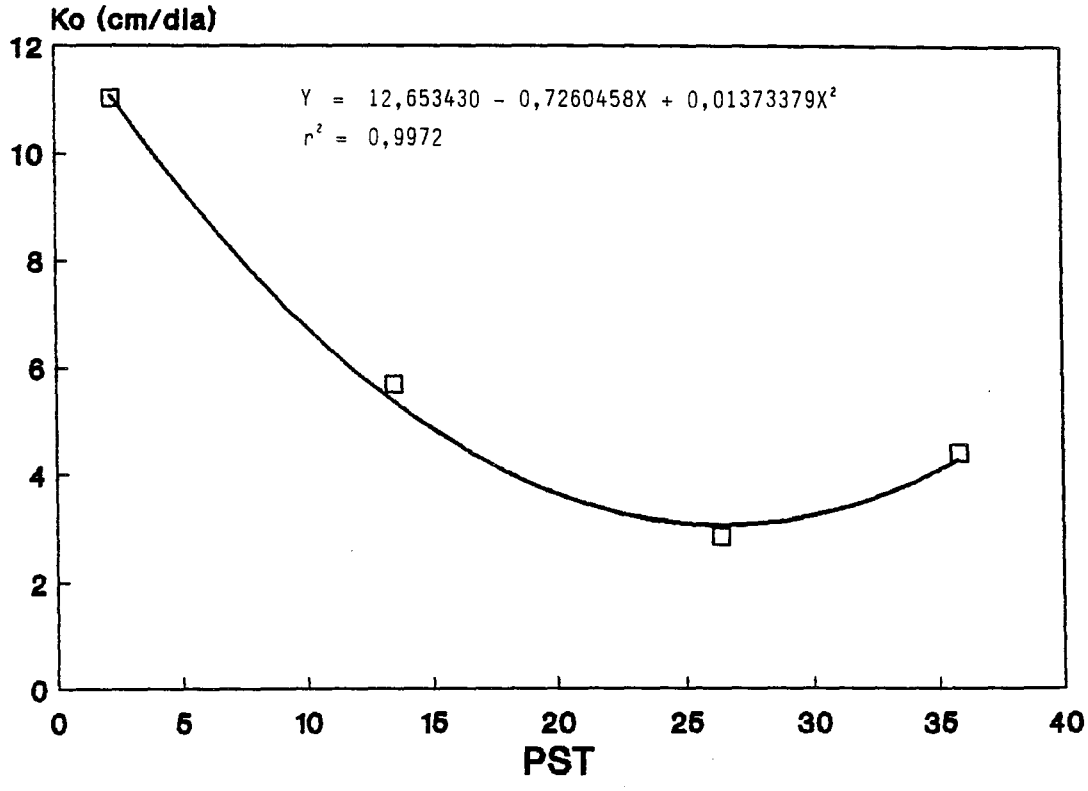



Figura 6. Variação da Ko para a Areia Quartzosa em função da PST

provocar floculação porém esse efeito depende da concentração do cátion; para cátions monovalentes o valor de floculação é significativamente maior do que para cátions com maior carga.

Comparando os valores de condutividade hidráulica observados nos três solos e PST pode-se verificar que os efeitos na TE e na AQ foram mais severos do que no LVe, o que mostra a correlação existente entre o valor de floculação para os três solos que aparece na Tabela 1 e a sensibilidade ao efeito do sódio nesses solos.

## 4.2. Avaliacao do efeito da lixiviacao do sodio sobre a PST e sobre a condutividade hidraulica saturada (Ko)

As Tabelas 7, 8 e 9 do apêndice mostram os resultados obtidos para PST, Ko determinada e Ko calculada para os três solos sem e com lavagem. Esses dados permitiram construir as Figuras 7, 8 e 9. Esses dados também permitiram verificar que houve alto grau de concordância entre os valores de Ko determinada experimentalmente e os valores de Ko calculados através do uso dos modelos obtidos na 1ª etapa (CC = 0,95).

No caso da TE (Figura 7) a lixiviação do sódio (para adições de 0,22 e.mg de $Na^+$/5 g terra) provocou diminuição dos valores de PST de 15,54 para 10,14% o que

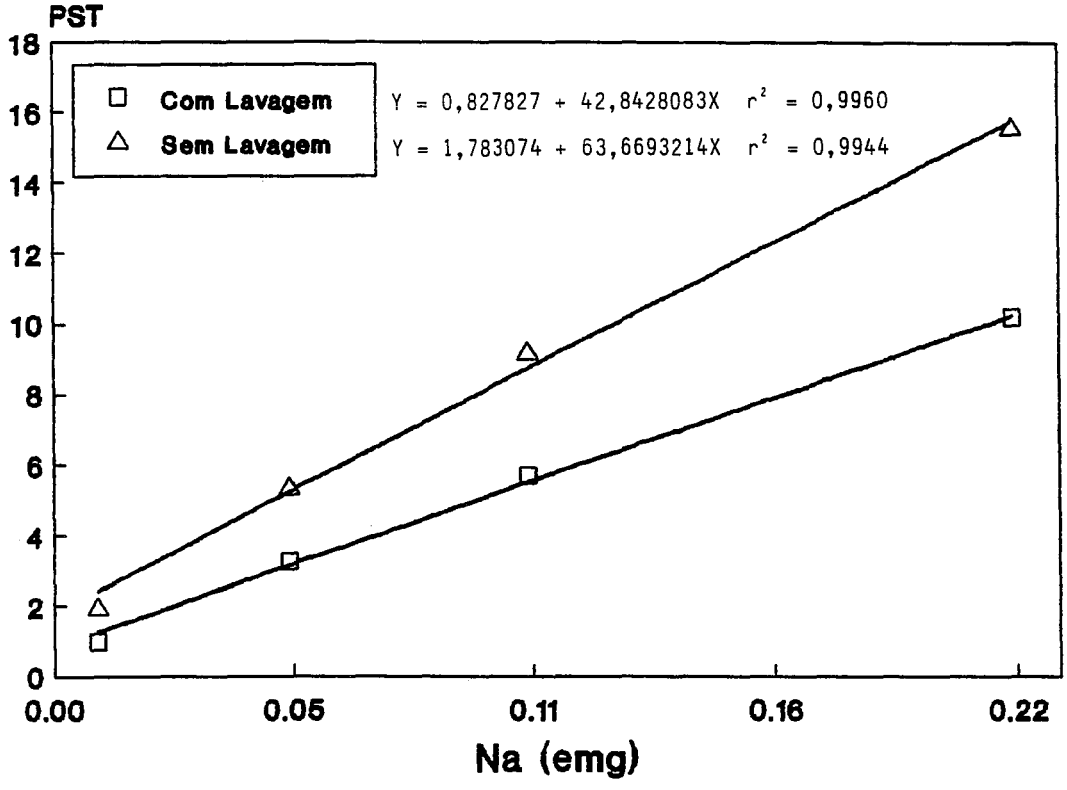



Figura 7. PST em função do $Na^+$ aplicado sem e com lavagem para TE

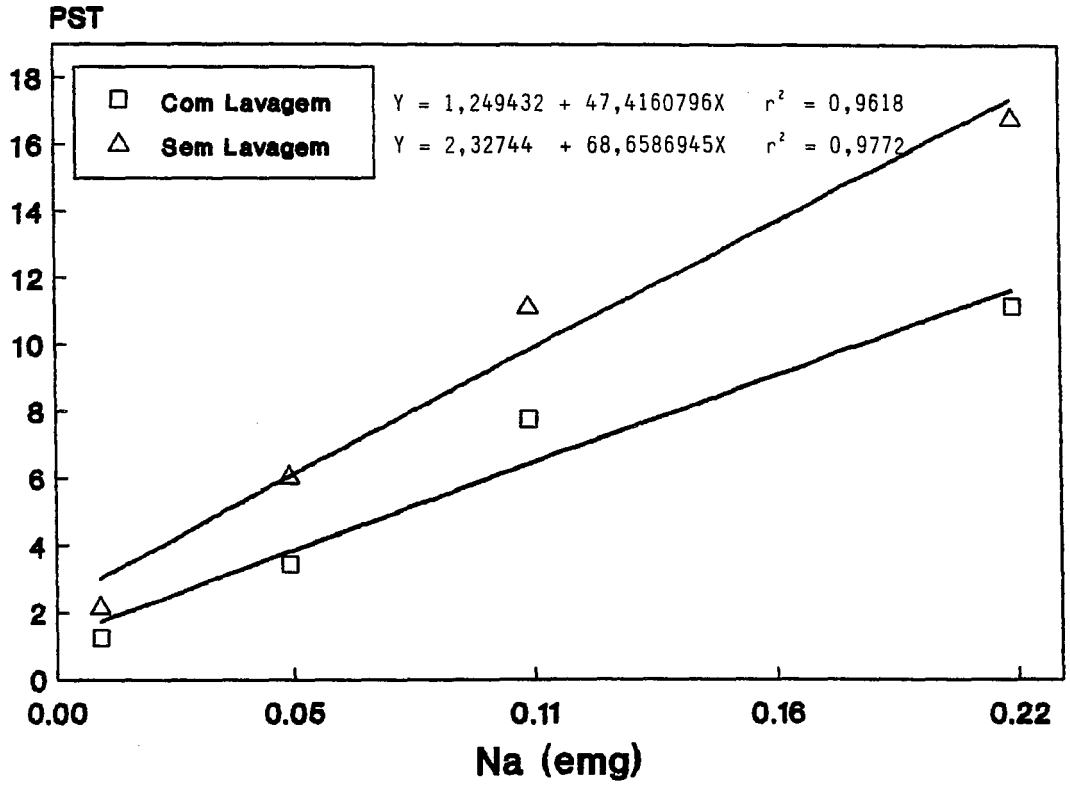



Figura 8. PST em função de sódio aplicado sem e com lavagem para LVE

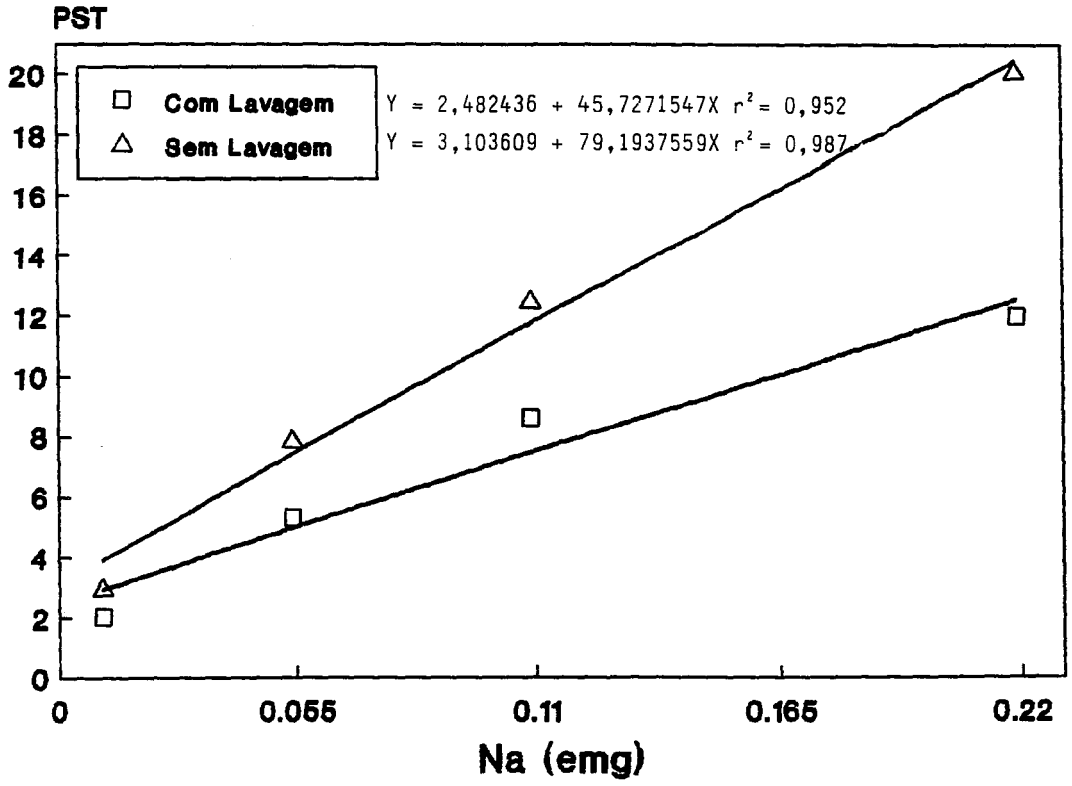



Figura 9. PST em função do $Na^+$ aplicado sem e com lavagem para AQ

corresponde à uma diminuição de 5,4% do $Na^+$ presente nos colóides do solo.Isso por sua vez, provocou melhora na condutividade hidráulica determinada experimentalmente ou através dos modelos matemáticos da primeira etapa (Tabela 8 do apêndice).

Considerando-se a quantidade de sódio aplicada de 0,22 e.mg/5g terra, no LVe a diminuição da PST verificada pela lixiviação do sódio foi de 5,68% (de 16,69% para 11,11%). Nesse mesmo nível de $Na^+$ aplicado a redução na PST verificada no AQ (Figura 9) foi de 8,13% (de 20,07% para 11,94%) (Tabelas 8 e 9 do apêndice).

### 4.3. Avaliacao do efeito da RAS da solucao percolante sobre a condutividade hidraulica (Ko) medida e relacao RAS x Ca

Na Tabela 3 são apresentados os valores de PST e condutividade hidráulica medida e calculada em função da RAS da solução percolante para os três diferentes tipos de solos. À partir desses dados construiu-se a Figura 10, onde se observa que aumentando a RAS da solução percolantea PST aumenta linearmente. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por PEREIRA et alii(1982),em solos salino-sódicos do nordeste brasileiro. Nota-se,nesse caso, que a presença de Ca na solução percolante foi mais evidente em solos com menor CTC afetiva (LVe e AQ), e pode

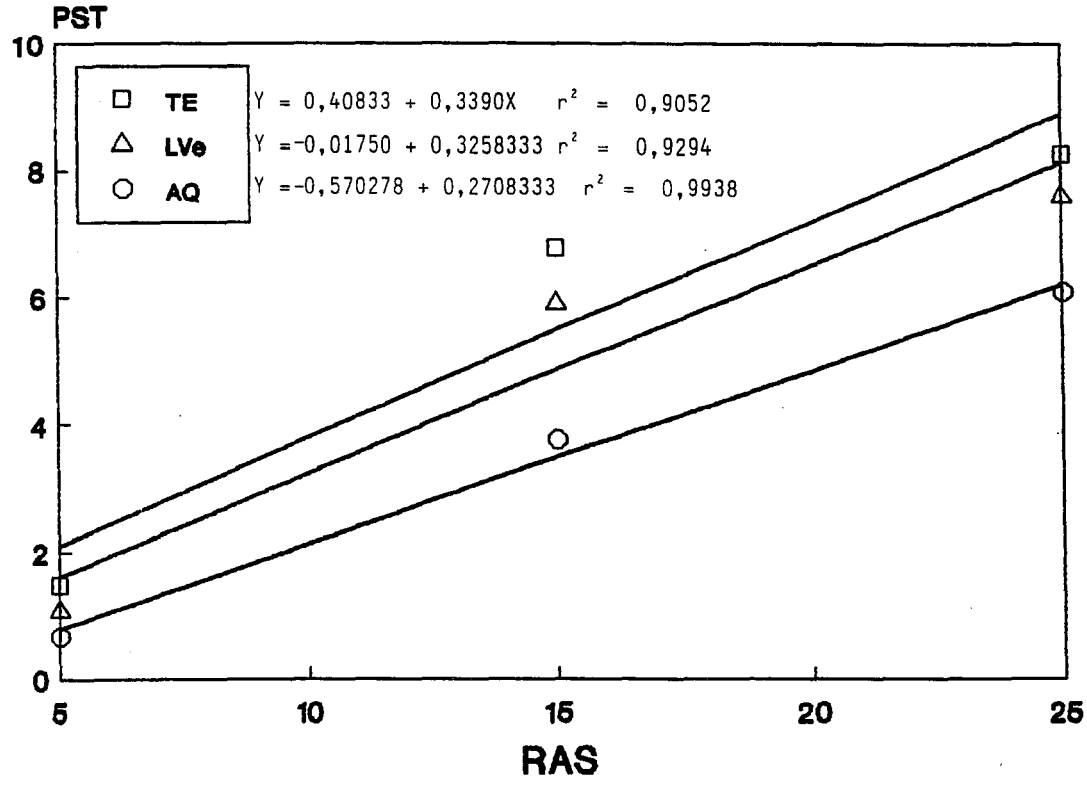



Figura 10. Variação da PST em função relação de adsorção de sódio (RAS) da solução percolante

Tabela 3. Valores de RAS, PST, $Ca^{2+}$ retido e condutividade hidráulica saturada (Ko)para os três diferentes tipos de solos

| Solo | RAS | PST[1] (%) | $Ca^{2+}$ retido[1] (e.mg/100g terra) | Ko[1] calculada (cm/dia) | Ko[1] medida |
|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 1,47 | 9,89 | 12,83 | 13,20 |
| TE | 15 | 6,76 | 7,21 | 8,04 | 7,55 |
| | 25 | 8,25 | 6,91 | 6,91 | 7,32 |
| | 5 | 1,09 | 6,75 | 6,09 | 5,69 |
| LVe | 15 | 5,91 | 5,04 | 5,37 | 5,16 |
| | 25 | 7,61 | 4,40 | 5,14 | 4,37 |
| | 5 | 0,66 | 2,04 | 12,18 | 12,79 |
| AQ | 15 | 3,74 | 2,03 | 10,13 | 9,68 |
| | 25 | 6,08 | 1,58 | 8,75 | 7,70 |
| CV = | | 4,51 | | | |

[1] Média de 3 repetições

ser explicado por um maior efeito competitivo do Ca pelos sítios de troca.

A condutividade hidráulica dos três solos (Tabela 3) é afetada quando são aplicadas soluções de RAS = 15 em doses correspondentes à uma aplicação de 100 $m^3$/ha.Para TE houve uma queda na permeabilidade de 39,5% em relação ao solo em condições normais, para RAS = 25 a queda foi de 48% (valores obtidos pelo modelo matemático).

Para LVe um valor de RAS = 5 não teve efeito sobre a permeabilidade. Valores de RAS entre 15 e 25 provocaram quedas de 10 e 14%, respectivamente, na condutividade hidráulica (Ko) em relação ao solo em condições normais. Estes valores de RAS podem ser considerados perigosos levando em conta o conceito "limite crítico de concentração".

Para AQ o valor de RAS = 5 da solução percolante provocou melhoria na condutividade hidráulica (Ko). Entretanto, foram observadas quedas na permeabilidade de 7,90% e 20% em relação à condutividade do solo original, para valores de RAS de respectivamente 15 e 25.

Nota-se então que valores de PST e portanto valores para o "limite crítico de concentração" variam em função da RAS da solução percolante para os diferentes tipos de solo.

## 4.4. Avaliação do efeito da adição de resíduos da indústria de papel e celulose sobre a condutividade hidráulica(Ko) e Relação resíduo x Ca

Pelos dados da Tabela 10 do apêndice que permitiram a construção da Figura 11,se pode observar o aumento do valor PST com o aumento da dose de resíduo aplicada (cujo valor de RAS = 12,25). Isso indica que quando o resíduo aplicado contém sódio, quanto maior a quantidade adicionada, mantendo a concentração constante, maior a possibilidade de fornecimento e consequentemente retenção de sódio pelos colóides do solo.

Considerando a aplicação em TE do equivalente à aplicação de 50 $m^3$/ha do resíduo,verificou-se uma diminuição 11% do valor da condutividade hidráulica(Ko). Essa diminuição foi de 19% para aplicações equivalentes a 100 $m^3$/ha e 39,70% para 200 $m^3$/ha. Portanto, o limite "crítico de concentração"em TE para o resíduo estudado está próxima à uma aplicação de 50 $m^3$ de resíduo/ha.

Para LVE aplicações de 50, 100 e 200 $m^3$/ha provocaram quedas na condutividade hidráulica de 4, 7 e 10%, respectivamente. Portanto o "limite crítico de concentração"para LVe deve corresponder à aplicação desse resíduo em doses acima de 200 $m^3$/ha.

No caso da AQ aplicações correspondentes à 50, 100 e 200 $m^2$/ha provocaram quedas na permeabilidade de

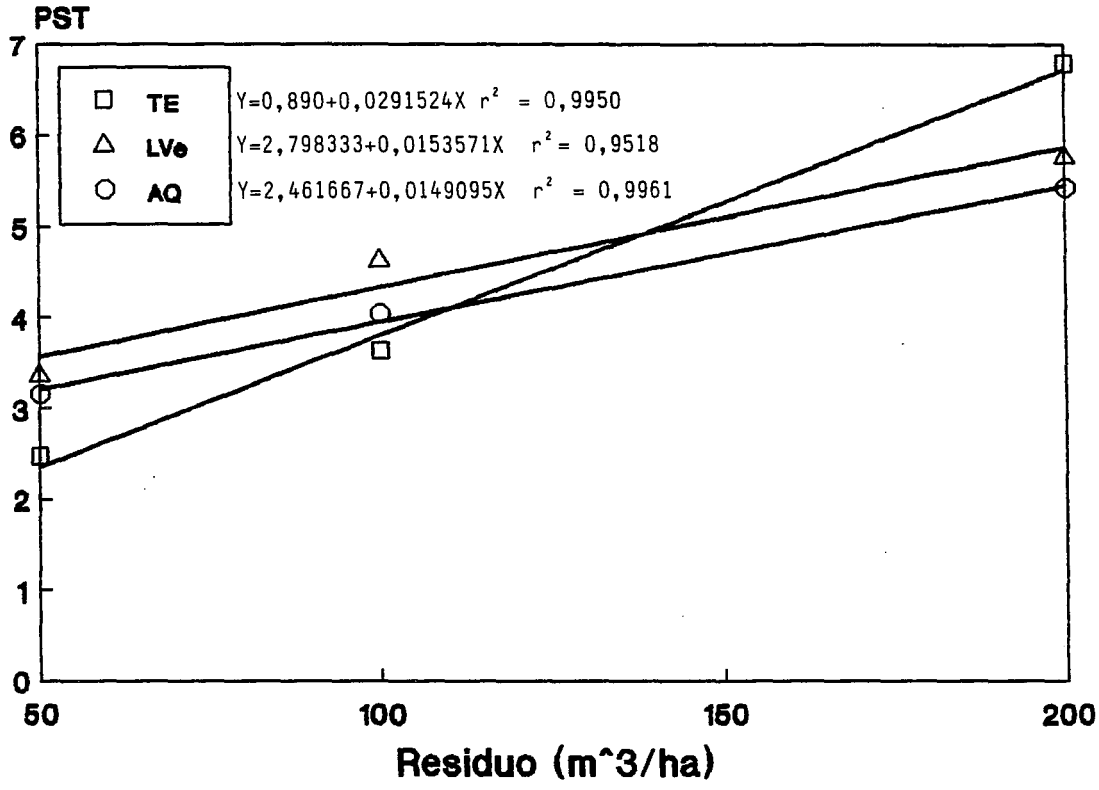



Figura 11. Variação da PST em função da dose de resíduo de indústria de papel e celulose adicionado

4,5; 9,55 e 17,09%, respectivamente, o que indica que o limite crítico de concentração para AQ corresponde à aplicações do resíduo em doses de 100-200 $m^3$/ha.

Visto isso observa-se que no caso da TE doses de resíduo superiores a 50 $m^3$/ha provocam quedas na condutividade hidráulica muito perigosas. No entanto, no LVe doses equivalentes à 200 $m^3$/ha não provocam quedas drásticas na condutividade hidráulica. No caso da AQ o maior risco acontece em dose correspondente a 200 $m^3$/ha.

A Figura 12 (cujos dados para construção aparecem na Tabela 10 do apêndice) mostra que os teores de $Ca^{2+}$ presente nos colóides do solo não são significativamente afetados pelo cálcio fornecido pelo resíduo usado. De fato, a concentração de $Ca^{2+}$ no resíduo é baixa se comparada com a de $Na^+$ e mesmo com o aumento das doses aplicadas, o que indica que o cálcio adicionado com o resíduo foi suficiente para restabelecer o teor de $Ca^{2+}$ trocável substituído pelo sódio adicionado com o resíduo, por isso essa tendência à pouco incremento da participação do cálcio na CTC.

Os resultados obtidos na etapa prévia, que permitiram definir as condições experimentais, aparecem nas Tabelas 11 à 16 do apêndice.

Os resultados observados no presente estudo

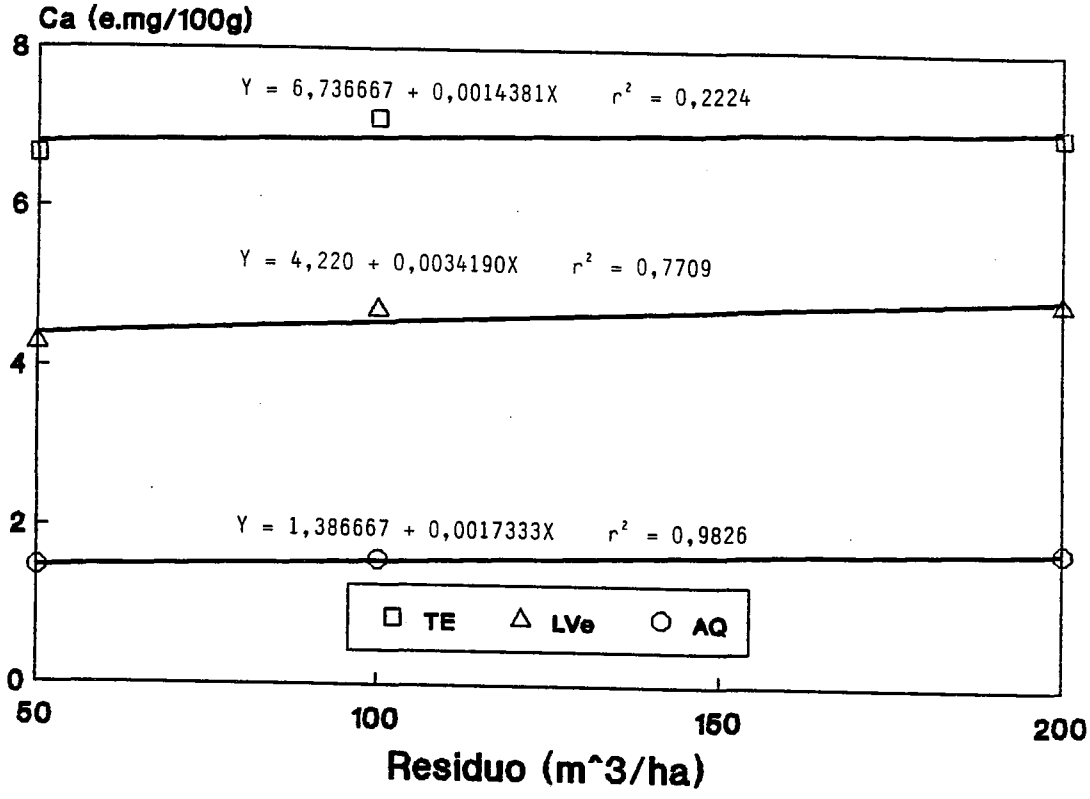



Figura 12. Variação da concentração de $Ca^{2+}$ adsorvido em função das doses de resíduo de indústria de papel e celulose adicionado

tropicais. Essas premissas podem ser resumidas como se segue:

1) O uso de soluções contendo sódio e por extensão o uso de resíduos contendo sódio não afeta de igual forma os diferentes tipos de solos. Os maiores efeitos, traduzidos por uma queda na condutividade hidráulica, foram observadas no solo argiloso de alta CTC (TE) e no solo arenoso de baixa CTC (AQ).

2) A concentração de sódio da solução percolante afeta a PST dos solos e em função dos valores atingidos, pode provocar quedas drásticas na condutividade hidráulica.

3) O "limite crítico de concentração" é função do tipo de solo e não corresponde à um valor fixo de PST. Esse limite varia também em função da presença de $Ca^{++}$ e $Mg^{++}$ na solução percolante. Quanto maior a RAS da solução percolante maiores valores se obterá para a PST. O valor da RAS da solução percolante que se pode considerar perigoso é também função do tipo do solo onde essa solução vai ser adicionada. Para TE valores de RAS = 15 e superiores são considerados perigosos. Esse valor é de 25 para LVE e AQ.No caso da existência de problemas associados ao Na num resíduo, poderá se recomendar o uso de alguma substância contendo cálcio para ser misturada com o

resíduo (ou mesmo ser aplicada diretamente ao solo) a fim de se ter menores valores para a RAS do material.

4) A lavagem do solo com água provoca uma diminuição do sódio presente nos colóides do solo o que significa que mesmo que se tenha valores altos de PST e consequentemente baixos valores de Ko, esse efeito pode ser revertido pela lavagem do solo. Portanto, a adição de resíduo contendo $Na^+$ ao solo, pode ser acompanhada da aplicação de lâminas de água para lavagem do $Na^+$ ou mesmo do aproveitamento das épocas de chuvas para o descarte.

## 5. CONCLUSÕES

Após feita a análise e discussão dos resultados conclui-se que:

i) Quando se considera o uso do solo para descarte de resíduo contendo sódio, deve-se levar em conta os efeitos do $Na^+$ sobre o incremento da PST e consequentemente na diminuição da condutividade hidráulica do solo.

ii) O "limite crítico de concentração" é um parâmetro que varia em função do tipo de solo, e da PST desse solo. Nas condições do presente experimento esses valores foram: para TE o valor de PST crítico foi menor que 5%; em LVe o PST crítico foi menor de 8%; e para AQ o PST crítico foi menor de 6%.

iii) A lavagem do solo com água provoca uma diminuição do sódio presente nos colóides do solo o que

significa que mesmo que se tenha valores altos de PST e consequentemente baixos valores de Ko, esse efeito pode ser revertido pela lavagem do solo. Portanto, a adição de resíduos contendo sódio ao solo, pode ser acompanhada da aplicação de lâminas de água para lavagem do $Na^+$ ou mesmo do aproveitamento das épocas de chuvas para o descarte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


CADIMA, Z.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura mêdia, no campo. R. bras. Ci. Solo, 4:6-3, 1980.

EL-SWAFY, S.A.; SWINDALE, L.D. Effects of saline water on the chemical properties of some tropical soils. Soil Science Society of America, Madison, 34:207-11, 1969.

FELHENDLER, R.; SHAIMBERG, I.; FRENKEL, H. Dispersion and hydraulica conductivity of soils mixed solution. Trans 10th Int. Cong. Soil Sci, Moscow, vol. I. Nauka, Moscow, pp.103-112, 1974.

FERREYRA, H.; UCHOA, S.C.P.; ASSIS Jr., R.N. Efeito da concentração salina e da relação de adsorção de sódio sobre a condutividade hidráulica do solo saturado. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Porto

Alegre-RS, Julho, 1991. p. 178.

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O.; RHOADES, J.D. Effect of clay type and conten, ESP and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 42:32-39, 1978.

GARDNER, W.R.; MAYHUGH, M.S.; GOERTZEN, J.O.; BOWER, C.A. Effect of electrolyte concentration and exchangeable sodium percentage on diffusivity of water of soils. Soil Science. Baltimore, 88:270-4, 1959.

GUPTA, R.K.; SINGH, R.R.; ABROL, I.P. Influence of simultaneous changes in sodicity and pH on the hydraulic conductivity of an alcaly soil under rice culture. Soil. Science, Baltimore, 147(1):28-33, 1989.

HAYES, A.R.; MANCINO, C.F.; PEPPER, C.F. Irrigation of turfagrass with secondary sewage effluent: I. Soil and leachate water quality. Agronomy Journal, Tucson, 82(5):939-43, 1990.

HERRERA, J. Resíduos sólidos ou bens de produção? Novas tecnologias na indústria de celulose e papel. In: 1º SEMINÁRIO AGRONÔMICO DE RESÍDUOS. Piracicaba-SP. Novembro, 1991. pp. 101-126.

KANNAN, K. & OBLISAMI, G. Effect of pulp and paper mill effluent irrigation on carbon-dioxide evolution in soil. Journal of Agronomy and Crop. Science. Coimbatore, 164(2):116-9, 1990. Apud Soils and Fertilizers. Farnham Royal, 53(10):1569, 1990. (Resumo).

KINJO, T. & MARCOS, Z.Z. Adsorção de sódio em solos do Estado de São Paulo. I. Isoterma de adsorção de sódio. R. bras. Ci. Solo. Campinas, 6: 73-7. 1982.

KINJO, T.; MARCOS, Z.Z. Adsorção de sódio em solos do Estado de São Paulo. II. Equilíbrio de troca catiônica entre sódio e cálcio. R. Bras. Ci. Solo. Campinas, 6:78-82, 1982.

LEIJ, F.J. & DANE, J.H. Determination of exchange isotherms for modeling cation transport in soils. Soil Science, Baltimore, 150(5):816-26, novembro, 1991.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, SP. Em edição, 1992, 580p.

LIMA, L.A.; GRISMER, M.E.; NIELSEN, D.R. Salinity effects on Yolo Loam hydraulic properties. Soil Sci., Baltimore, 150:451-58, 1990.

MALIWAL, G.L. Chemical and physical properties of soils and clay minerals irrigated with different quality waters. Current Agriculture. India, 13(1/2):61-6, 1989. Apud Soils and Fertilizers, Farnham Royal, 53(7):1075, 1990 (Resumos).

McNEAL, B.L.; COLEMAN, N.T. Effects of solution composition on soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Am. Proc., Madison, 20:308-12, 1966.

McNEAL, B.L.; LAYFIELD, D.A.; NORVELL, W.A.; RHOADES, J.D. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed salt solutions. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 32:187-90. 1968.

MURILLO, J.M.; HERNANDEZ, J.M.; BARROSO, M.; LOPEZ, R. Production versus contamination in urban compost utilization. Anales de Edafologia y Agrobiologia, Sevilla, 48(1/2):143-60, 1989. Soils and Fertilizers, Farnham Royal, 53(4):591, 1990. Resumo.

OHNO, T. & ERICH, M.S. Effect of wood ash aplication on soil pH and soil test nutriente levels. Agric. Ecosystems and Environment, Maine, 32(3/4):223-9, 1990. Apud Soils and Fertilizers. Farnham Royal, 54(12):1907,

1991. Resumo.

OSTER, J.D.; SPOSITO, G. The Gapon coefficient and the excangeable sodium percentage-sodium adsortion ratio relation. Soil Sci. Am. J. Madison, 44:258-260, 1980.

PAULETTO, E.A.. LIBARDI,P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. R.bras. Ci.Solo, Campinas, 12:189-95, 1988.

PEREIRA, F.A.M.; MEDINA, B.F.; GHEYI, H.R. ETCHEVERS, J.D. Solos afetados por sais no Nordeste. II. Correlação entre sódio solúvel e intercambiável. R. bras. Ci.Solo, Campinas, 6:167-70, 1982.

PIMENTA, H.S. Efeito do sódio trocável, da concentração salina na condutividade hidráulica de um solo aluvial. Piracicaba, 1991. 95p. (Mestrado Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

QUIRK, J.P. SCHOFIELD, R.K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. Soil Sci. J. 6:163-178, 1955.

REICHARDT, K. Processos de tranferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4 ed. Piracicaba. Fundação Cargill, 1985. 445p.

SANTOS, A.C. dos. Produção de fertilizantes orgânicos a partir do tratamento de efluente de curtume. In: COLÓQUIO REGIONAL SOBRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, Piracicaba, 1982. Piracicaba, CENA, 1982. P. 233-6.

SAUNDERS,L.C.U.;LIBARDI, P.L.;REICHARDT,K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 2: 164-7, 1978.

SHAINBERG, I. RHOADES, J.D.; poPRATHER, R.J. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. Soil Sci. Am.J., Madison, 45:273-7, 1981.

SHAIMBERG, I. The effect of electrolyte concentration on the hydraulic propert of sodic soils. In: SHAINBERG, I. & SHALHEVET, J. ed. Soil salinity under irrigation. Bet Dagan-Israel, 1984. Cap. 3, p. 49-64.

SILVA, F.R.; FERREIRA, H.F.F.; COELHO, M.A.; AQUINO, B.F. Efeito da relação de adsorção de sódio e da salinidade

sobre o coenficiente de seletividade Na-Ca em solos aluviais de diferentes texturas. R.bras. Ci. Solo, Campinas, 15:9-13, 1991.

SIMON, Z. Aspectos agronômicos e químicos da utilização de resíduos líquidos e semilíquidos. In: 1º SEMINÁRIO AGRONÔMICO DE RESÍDUOS. Piracicaba-SP. Novembro, 1991. p.49-53.

SINANUWONG, S. & EL-SWAIFY s/A. Predicting Exchangeable Sodium rations in irrigated Tropical Vertisols. Soil Sci. Amer. Proc., Madison, 38:732-7, 1974.

STEWART, B.A. "Salinity problems associated withwastes". In:NATIONAL PROGRAM STAFF. Factors involved in land application of agricultural and municipal wastes. Belks Ville. Moscow University, 1975. p. 140-60.

TORRES, M.M.J.I. & GARCIA, O. Intercâmbio catiônico cálcio-magnésio-sódio en algunos suelos del Valle del Cauca. Acta Agronomica, Palmira, 39(3/4):65-75, 1989.

VITYAZEV, V.G.; ORTIZ, R.L.; CABRERA, M.S. The effect of yeast production wastes on agrophysical characteristics of yellow ferralitic soils. (Cuba). Moscow University. Soil Sci. Bulletin, 45(4), 50-3, 1990. Apud Soils and

Fertilizers Farnham Royal, 55(1):101, 1992. Resumo.

YARON, A.; THOMAS, G.B. Soil Hydraulic conductivity as affected by sodic water. Water Resour Res. 4:545-52, 1968.

# APENDICE

Tabela 4. Quantidade de $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra), porcentagem de sódio trocável (PST) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) para Terra Roxa Estruturada (TE) (CTC = 16,08 e.mg/100g).

| $Na^+$aplicado[2] (e.mg/5g) | $Na^+$retido[1] (e.mg/100g) | PST[1] (%) | Ko[1] (cm/dia) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,27 | 1,68 | 13,30 |
| 0,22 | 1,71 | 10,63 | 3,66 |
| 0,87 | 3,73 | 23,22 | 2,48 |
| 1,74 | 5,50 | 32,87 | 1,59 |
| CV (%) | | 11,39 | 11,11 |

[1] Média de 3 repetições

[2] Correspondem à uma adição de: 0; 4,35; 17,40 e 34,80 e.mg/100g terra

Tabela 5. Quantidade $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra), porcentagem de sódio trocável (PST) e condutividade hidráulica do solo saturado ( Ko) para Latossolo Vermelho Escuro (LVe) (CTC = 7,62 e.mg/100g)

| $Na^+$ aplicado[2] (e.mg/5g) | $Na^+$ retido[1] (e.mg/100g) | PST[1] (%) | (Ko)[1] (cm/dia) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,12 | 1,62 | 5,99 |
| 0,22 | 1,16 | 15,27 | 4,29 |
| 0,87 | 1,96 | 25,68 | 3,20 |
| 1,74 | 2,61 | 34,25 | 2,85 |
| CV (%) | | 7,61 | |

[1] Média de 3 repetições

[2] Correspondem à uma adição de: 0; 4,35; 17,40 e 34,80 e.mg/100g terra

Tabela 6. Quantidade $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra), porcentagem de sódio trocável (PST) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) para Areia Quarzosa (AQ) (CTC = 4,55 e.mg/100g)

| $Na^+$ aplicado[2] (e.mg/5g) | $Na^+$ retido[1] (e.mg/100g) | PST[1] (%) | (Ko)[1] (cm/dia) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,10 | 3,27 | 11,00 |
| 0,22 | 0,60 | 13,19 | 5,60 |
| 0,87 | 1,19 | 26,22 | 2,74 |
| 1,74 | 1,63 | 35,89 | 4,38 |
| CV (%) | | 4,13 | |

[1] Média de 3 repetições

[2] Correspondem a uma adição de: 0; 4,35; 17,40 e 34,80 e.mg $Na^+$/100 g terra

Tabela 7. Quantidade de $Na^+$ adicionado(e.mg/5g terra), PST e condutividade hidráulica saturada (Ko) para Terra Roxa Estruturada (TE), resultados obtidos sem e com lavagem

| $Na^+$ [2] adicionado (e.mg) | PST[1] s/lav. | PST[1] c/lav. | Ko[1] calculada s/lav. (cm/dia) | Ko[1] calculada c/lav. (cm/dia) | Ko[1] medida s/lav. (cm/dia) | Ko[1] medida c/lav. (cm/dia) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | % | | | | |
| 0,01 | 1,93 | 0,97 | 12,36 | 13,34 | 11,85 | 13,56 |
| 0,05 | 5,33 | 3,23 | 9,21 | 11,10 | 10,03 | 11,80 |
| 0,10 | 9,16 | 5,68 | 6,26 | 8,92 | 5,78 | 9,05 |
| 0,22 | 15,54 | 10,14 | 2,77 | 5,61 | 3,01 | 5,23 |
| CV = | 7,18 | 5,79 | | | | |

[1] Média de 3 repetições

[2] Correspondentes à 0,22; 1,09; 2,17 e 4,35 e.mg $Na^+$/100g de terra

Tabela 8. Quantidade de $Na^+$ adicionado (e.mg/5g terra), PST e condutividade hidráulica saturada (Ko) para Latossolo Vermelho Escuro (LVe) resultados obtidos sem e com lavagem

| $Na^{+(2)}$ adicionado (e.mg) | PST(1) s/lav. | PST(1) c/lav. | Ko(1) calculada s/lav. | Ko(1) calculada c/lav. | Ko(1) medida s/lav. | Ko(1) medida c/lav. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | (cm/dia) | | (cm/dia) | |
| 0,01 | 2,14 | 1,22 | 5,92 | 6,07 | 5,15 | 5,79 |
| 0,05 | 6,04 | 3,41 | 5,35 | 5,73 | 4,96 | 5,13 |
| 0,10 | 11,11 | 7,74 | 4,69 | 5,12 | 4,10 | 4,68 |
| 0,22 | 16,79 | 11,11 | 4,06 | 4,69 | 3,87 | 4,00 |
| CV = | 14,68 | 13,23 | | | | |

(1) Média de 3 repetições

(2) Correspondentes à 0,22; 1,09;2,17 e 4,35 e.mg $Na^+$/100g de terra

Tabela 9. Quantidade de $Na^+$ adicionado(e.mg/5g terra),PST e condutividade hidráulica saturada (Ko), para Areia Quartzosa (AQ) resultados obtidos sem e com e lavagem

| $Na^{+(2)}$ adicionado (e.mg) | PST(1) s/lav. | PST(1) c/lav. | Ko(1) calculada s/lav. | Ko(1) calculada c/lav. | Ko(1) medida s/lav. | Ko(1) medida c/lav. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | (cm/dia) | | (cm/dia) | |
| 0,01 | 2,93 | 1,98 | 10,64 | 11,27 | 10,10 | 10,84 |
| 0,05 | 7,84 | 5,27 | 7,80 | 9,21 | 7,12 | 8,37 |
| 0,10 | 12,46 | 8,57 | 5,74 | 7,44 | 5,25 | 7,72 |
| 0,22 | 20,07 | 11,94 | 3,61 | 5,94 | 4,02 | 6,48 |
| CV = | 9,82 | 7,15 | | | | |

(1) Média de 3 repetições

(2) Correspondentes à: 0,22; 1,09; 2,17 e 4,35 e.mg $Na^+$/100g de terra

Tabela 10. Dose de resíduo aplicada ($m^3$/ha), PST, $Ca^{2+}$ adsorvido e condutividade hidráulica saturada (Ko) para os três diferentes tipos de solos

| Solo | Dose ($m^3$/ha | PST[1] (%) | $Ca^{2+}$ retido[1] (e.mg/100g terra) | Ko[1] calculada (cm/dia) | Ko[1] medida (cm/dia) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 2,47 | 6,60 | 11,83 | 12,36 |
| TE | 100 | 3,63 | 7,11 | 10,73 | 11,25 |
| | 200 | 6,78 | 6,95 | 8,02 | 9,68 |
| | 50 | 3,37 | 4,28 | 5,74 | 6,45 |
| LVe | 100 | 4,63 | 4,72 | 5,55 | 6,31 |
| | 200 | 5,77 | 4,85 | 5,39 | 5,02 |
| | 50 | 3,15 | 1,46 | 10,50 | 11,48 |
| AQ | 100 | 4,03 | 1,58 | 9,95 | 10,62 |
| | 200 | 5,42 | 1,73 | 9,12 | 9,87 |
| CV = | | 2,40 | | | |

[1] Média de 3 repetições

Tabela 11. Resultados obtidos para $Na^+$ retido e PST nos testes preliminares ao experimento, com adição aos solos de 50 ml de diferentes soluções de sódio de concentração 400 ppm de $Na^+$

| Solo | $Na^+$ retido (e.mg/100g) | | | | % Sódio trocável (PST) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | NaCl | $Na_2SO_4$ | $NaHCO_3$ | $NaNO_3$ | NaCl | $Na_2SO_4$ | $NaHCO_3$ | $NaNO_3$ |
| TE | 2,97 | 3,13 | 5,41 | 2,63 | 18,00 | 19,50 | 33,69 | 16,41 |
| LVe | 1,70 | 2,23 | 2,46 | 1,77 | 22,00 | 29,26 | 32,41 | 23,18 |
| AQ | 0,88 | 0,97 | 1,50 | 0,89 | 19,27 | 21,02 | 32,97 | 19,56 |

Tabela 12. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko)para Terra Roxa Estruturada (TE) com doses crescentes de $Na^+$. Etapa prévia

| Tempo | Ko (cm x $dia^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento: 0 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 46,57 | 56,42 | 42,94 | 48,64 |
| 1 h | 27,30 | 40,35 | 25,66 | 31,10 |
| 2 h | 20,82 | 32,05 | 19,78 | 24,22 |
| 3 h | 18,14 | 28,08 | 17,02 | 21,08 |
| 4 h | 16,16 | 15,64 | 15,12 | 15,64 |
| 5 h | 14,77 | 14,37 | 14,00 | 14,38 |
| 6 h | 13,48 | 13,29 | 13,13 | 13,30 |
| | Tratamento: 100 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 6,31 | 15,55 | 14,60 | 12,15 |
| 1 h | 4,06 | 8,73 | 7,95 | 6,91 |
| 2 h | 3,20 | 6,74 | 5,96 | 5,30 |
| 3 h | 2,68 | 5,87 | 5,36 | 4,64 |
| 4 h | 2,51 | 5,18 | 4,84 | 4,18 |
| 5 h | 2,25 | 4,92 | 4,41 | 3,86 |
| 6 h | 2,25 | 4,58 | 4,15 | 3,66 |
| 7 h | 2,07 | 4,32 | 4,06 | 3,48 |
| 24 h | 1,47 | 2,94 | 2,68 | 2,36 |

continua...

Tabela 12. Continuação

| Tempo | Ko (cm x dia$^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento: 400 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 8,29 | 8,29 | 8,21 | 8,26 |
| 1 h | 5,10 | 4,23 | 4,75 | 4,69 |
| 2 h | 4,15 | 4,06 | 3,46 | 3,89 |
| 3 h | 3,54 | 3,02 | 2,85 | 3,14 |
| 4 h | 3,37 | 2,68 | 2,68 | 2,91 |
| 5 h | 3,11 | 2,42 | 2,42 | 2,65 |
| 6 h | 2,85 | 2,33 | 2,25 | 2,48 |
| 7 h | 2,76 | 2,16 | 2,07 | 2,33 |
| 24 h | 1,64 | 1,38 | 1,47 | 1,50 |
| | Tratamento: 800 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 3,02 | 4,06 | 6,05 | 4,38 |
| 1 h | 1,73 | 2,33 | 2,25 | 2,10 |
| 2 h | 1,30 | 1,81 | 3,20 | 2,10 |
| 3 h | 1,04 | 1,47 | 3,20 | 1,90 |
| 4 h | 0,86 | 1,30 | 3,38 | 1,81 |
| 5 h | 0,81 | 1,12 | 2,85 | 1,59 |
| 6 h | 0,79 | 1,12 | 2,85 | 1,59 |
| 7 h | 0,79 | 1,08 | 2,76 | 1,54 |
| 24 h | 0,47 | 0,70 | 1,30 | 0,82 |

Tabela 13. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko)para Latossolo Vermelho Escuro(LVe)com doses crescentes de $Na^+$. Etapa prévia

| Tempo | Ko (cm x $dia^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento: 0 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 26,35 | 27,73 | 37,32 | 30,47 |
| 1 h | 11,23 | 13,91 | 17,11 | 14,08 |
| 2 h | 8,03 | 9,68 | 12,27 | 9,99 |
| 3 h | 6,48 | 7,78 | 9,66 | 7,97 |
| 4 h | 5,87 | 6,91 | 8,64 | 7,14 |
| 5 h | 5,27 | 6,31 | 7,78 | 6,45 |
| 6 h | 4,92 | 5,70 | 7,34 | 5,99 |
| 7 h | 4,58 | 5,44 | 6,74 | 5,59 |
| | Tratamento: 100 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 21,86 | 7,69 | 9,76 | 13,10 |
| 1 h | 17,63 | 4,23 | 6,39 | 9,42 |
| 2 h | 12,18 | 3,28 | 4,92 | 6,79 |
| 3 h | 10,02 | 2,76 | 4,32 | 5,70 |
| 4 h | 8,64 | 2,51 | 4,06 | 5,07 |
| 5 h | 7,78 | 2,33 | 3,97 | 4,69 |
| 6 h | 6,91 | 2,25 | 3,71 | 4,29 |
| 7 h | 6,05 | 2,16 | 3,46 | 3,89 |
| 24 h | - | 1,64 | 2,42 | 2,03 |

continua...

Tabela 13. Continuação

| Tempo | Ko (cm x dia$^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento:400 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 14,00 | 12,61 | 12,96 | 13,19 |
| 1 h | 6,48 | 6,57 | 6,48 | 6,51 |
| 2 h | 4,84 | 4,92 | 4,66 | 4,81 |
| 3 h | 4,15 | 4,23 | 4,06 | 4,15 |
| 4 h | 3,71 | 3,71 | 3,63 | 3,68 |
| 5 h | 3,46 | 3,46 | 3,37 | 3,43 |
| 6 h | 3,20 | 3,20 | 3,20 | 3,20 |
| 7 h | 3,02 | 3,02 | 3,02 | 3,02 |
| 24 h | 1,99 | 1,90 | 1,90 | 1,96 |
| | Tratamento: 800 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 11,92 | 9,90 | 6,74 | 9,52 |
| 1 h | 7,26 | 5,36 | 3,46 | 5,36 |
| 2 h | 6,22 | 4,23 | 2,25 | 4,23 |
| 3 h | 5,01 | 3,54 | 1,99 | 3,51 |
| 4 h | 4,67 | 3,37 | 1,73 | 3,25 |
| 5 h | 4,41 | 3,20 | 1,64 | 3,08 |
| 6 h | 4,06 | 3,02 | 1,47 | 2,85 |
| 7 h | 3,80 | 2,85 | 1,38 | 2,68 |
| 24 h | 2,33 | 1,99 | 0,95 | 1,76 |

Tabela 14. Resultados de condutividade hidráulica saturada (Ko)para Areia Quartzosa (AQ) com doses crescentes de $Na^+$. Etapa prévia

| Tempo | Ko (cm x $dia^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento: 0 ppm $Na^+$ | | | |
| 15' | 47,00 | 67,48 | 60,39 | 58,29 |
| 1 h | 27,56 | 31,79 | 30,33 | 29,89 |
| 2 h | 19,18 | 21,25 | 20,82 | 20,42 |
| 3 h | 15,12 | 16,85 | 16,70 | 16,22 |
| 4 h | 12,61 | 14,17 | 14,51 | 13,76 |
| 5 h | 11,15 | 12,35 | 12,70 | 12,07 |
| 6 h | 10,28 | 11,32 | 11,40 | 11,00 |
| 7 h | 9,24 | 10,37 | 10,37 | 9,99 |
| | Tratamento: 100 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 27,65 | 17,71 | 19,53 | 21,63 |
| 1 h | 15,81 | 12,18 | 12,44 | 13,48 |
| 2 h | 11,58 | 8,12 | 8,03 | 9,24 |
| 3 h | 9,50 | 6,91 | 6,74 | 7,72 |
| 4 h | 8,29 | 6,05 | 5,87 | 6,74 |
| 5 h | 7,43 | 5,53 | 5,44 | 6,13 |
| 6 h | 6,91 | 5,10 | 5,01 | 5,67 |
| 7 h | 6,48 | 4,84 | 4,75 | 5,36 |
| 24 h | - | 3,11 | 3,11 | 3,11 |

continua...

Tabela 14. Continuação

| Tempo | Ko (cm x dia$^{-1}$) $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Ko |
|---|---|---|---|---|
| | Tratamento: 400 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 17,63 | 7,34 | 9,16 | 11,38 |
| 1 h | 6,48 | 3,80 | 6,13 | 5,47 |
| 2 h | 4,58 | 2,94 | 4,92 | 4,15 |
| 3 h | 3,89 | 2,50 | 4,41 | 3,60 |
| 4 h | 3,28 | 2,33 | 3,97 | 3,19 |
| 5 h | 3,02 | 2,16 | 3,71 | 2,96 |
| 6 h | 2,76 | 1,99 | 3,46 | 2,74 |
| 7 h | 2,59 | 1,90 | 3,20 | 2,56 |
| 24 h | 1,55 | 1,21 | 1,90 | 1,55 |
| | Tratamento: 800 ppm de $Na^+$ | | | |
| 15' | 8,98 | 12,44 | 15,90 | 12,44 |
| 1 h | 5,53 | 7,95 | 10,28 | 7,92 |
| 2 h | 5,44 | 6,39 | 8,12 | 6,65 |
| 3 h | 5,01 | 5,53 | 6,91 | 5,82 |
| 4 h | 4,49 | 5,10 | 6,05 | 5,21 |
| 5 h | 4,06 | 4,75 | 5,44 | 4,75 |
| 6 h | 3,80 | 4,32 | 5,01 | 4,38 |
| 7 h | 3,54 | 4,06 | 4,49 | 4,03 |
| 24 h | 2,07 | 2,16 | 2,42 | 2,22 |

Tabela 15. Resultados de $Na^+$ adsorvido e PST para TE, LVe e AQ com adição de 50ml de solução de NaCl(Etapa prévia)

| $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra) | e.mg $Na^+$ retido/100g TE | LVe | AQ | PST (%) TE | LVe | AQ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,47 | 0,38 | 0,37 | 2,92 | 4,99 | 8,13 |
| 0,22 | 1,43 | 0,88 | 0,62 | 8,89 | 11,55 | 13,63 |
| 0,44 | 2,02 | 0,98 | 0,85 | 12,56 | 12,86 | 18,68 |
| 0,87 | 3,00 | 1,43 | 0,98 | 18,66 | 18,77 | 21,54 |
| 1,30 | 3,78 | 1,76 | 1,11 | 23,51 | 23,10 | 24,39 |
| 2,61 | 5,28 | 2,41 | 1,57 | 32,83 | 31,69 | 34,50 |
| 3,91 | 5,94 | 2,41 | 1,57 | 36,94 | 31,69 | 34,50 |

Tabela 16. $Na^+$ e PST para TE, LVe e AQ com adição de 50 ml de solução de acetato de sódio pH 7,0 (Etapa prévia)

| $Na^+$ aplicado (e.mg/5g terra) | e.mg $Na^+$ retido/100g TE | LVe | AQ | PST (%) TE | LVe | AQ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,40 | 0,30 | 0,13 | 2,49 | 3,94 | 2,86 |
| 0,22 | 1,63 | 1,01 | 0,51 | 10,14 | 13,25 | 11,21 |
| 0,44 | 2,31 | 1,33 | 0,72 | 14,36 | 17,45 | 15,82 |
| 0,87 | 3,52 | 1,80 | 0,95 | 21,89 | 23,62 | 20,88 |
| 1,30 | 4,57 | 2,16 | 1,11 | 28,42 | 28,35 | 24,39 |
| 2,61 | 6,13 | 3,13 | 2,22 | 38,12 | 41,08 | 48,79 |
| 3,91 | 7,89 | 3,45 | 1,83 | 49,07 | 45,27 | 40,22 |
| 4,35 | 7,69 | 3,06 | 2,15 | 47,82 | 40,16 | 47,25 |
| 8,69 | 11,22 | 4,30 | 2,80 | 69,78 | 56,43 | 61,54 |
| 13,04 | 12,26 | 4,56 | 3,13 | 76,24 | 59,84 | 68,79 |
| 17,39 | 13,30 | 4,83 | 3,00 | 82,71 | 63,38 | 65,93 |
| 21,74 | 13,30 | 5,02 | 3,65 | 82,71 | 65,88 | 80,22 |