

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

**Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**

**Carlos José Gonçalves de Souza Lima**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba  
2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Carlos José Gonçalves de Souza Lima  
Engenheiro Agrônomo

**Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**

Orientador:  
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba  
2009**

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

Lima, Carlos José Gonçalves de Souza

Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação / Carlos José Gonçalves de Souza Lima. - - Piracicaba, 2009.

109 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.  
Bibliografia.

1. Fertirrigação 2. Íons 3. Solos - Propriedades físico-químicas 4. Umidade do solo  
5. Vacúo I. Título

CDD 631.7  
L732c

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

*Aos meus pais, Francisco Jesus e Gildasia Maria que me conceberam, me criaram e me orientaram para os estudos, especialmente, à minha Mãe, exemplo de amor e fé e que sempre pede a Deus para guiar os meus passos.*

#### DEDICO

*À minha namorada Monik Rayelle pela dedicação, incentivo e amor, mesmo distante sempre me apoiou nessa jornada, embora as dificuldades fossem inerentes.*

*Aos meus irmãos Sylvio Ricard e Márcia Gabriele, especialmente, a minha irmã que sempre me ajudou em todos os aspectos e em minhas tomadas de decisão.*

#### OFEREÇO



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela força para superar todos os obstáculos em todos os momentos de minha vida;

Ao programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização deste curso;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

A todos os professores do Curso, em especial a Sergio Nascimento Duarte pela valiosa orientação, confiança e amizade;

Ao Professor Dr. Nildo da Silva Dias pela revisão e valiosas sugestões durante a execução deste trabalho;

Ao professor Dr. Jarbas Honório de Miranda pelas discussões técnicas, sugestões práticas e pelo bom relacionamento profissional;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural pela amizade, auxílio nos trabalhos e convivência harmoniosa;

Aos professores Dr. Marcos Yassuo Kamogawa e Dr Marcelo Eduardo Alves, pelas contribuições inestimáveis na realização das análises laboratoriais;

Ao professor Dr. José Francismar de Medeiros que tenho muito respeito e admiração por sua capacidade profissional e científica;

Ao colega e amigo Lucas Melo Vellame pela grandiosa contribuição no desenvolvimento e montagem do sistema de aquisição de dados;

Ao meu amigo e conterrâneo Francisco Valfisio da Silva e meu colega e amigo Pedro Robinson Fernandes de Medeiros que me acolheram e muito me ajudaram desde minha chegada a Piracicaba;

Ao meu grande amigo Francisco de Assis de Oliveira (Thikão), companheiro de muitas jornadas no decorrer de minha vida acadêmica, e que contribui na execução deste trabalho e de muitos outros;

6

Ao colega Alexsandro Cláudio dos Santos Almeida pela valiosa ajuda na tradução do resumo;

Muito obrigado, a todos os colegas de pós-graduação, pelos momentos compartilhados, tanto no aspecto profissional quanto pessoal durante nossa convivência;

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desse trabalho.



## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	11
LISTA DE FIGURAS .....	13
LISTA DE TABELAS .....	17
1 INTRODUÇÃO .....	19
2 DESENVOLVIMENTO .....	21
2.1 Revisão bibliográfica .....	21
2.1.1 Fertirrigação .....	21
2.1.2 Extratores de solução .....	23
2.1.3 Tempos entre a fertirrigação e aplicação do vácuo e entre a aplicação do vácuo e coleta de solução do solo .....	26
2.1.4 Métodos de extração da solução do solo .....	28
2.1.5 Monitoramento da solução do solo .....	30
2.1.6 Comportamento dos íons no solo .....	33
2.2 Material e Métodos .....	39
2.2.1 Caracterização e localização do estudo .....	39
2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental (Experimentos I e II) .....	40
2.2.3 Caracterização físico-hídrica e química dos materiais de solo .....	41
2.2.4 Calibrações: transdutores de pressão, condutância e borbulhamento das cápsulas e teste de equilíbrio iônico .....	45
2.2.5 Comparação das metodologias de extração de solução .....	50
2.2.6 Condução dos Experimentos I e II .....	52
2.2.7 Fertirrigação, extração e análises da solução .....	54
2.2.8 Parâmetros avaliados .....	56
2.1.9 Análise estatística .....	56
2.3 Resultados e Discussão .....	57
2.3.1 Resultados da calibração das cápsulas porosas e dos transdutores de pressão .....	57

2.3.2 Resultados do teste de equilíbrio iônico .....	57
2.3.3 Experimento I – Características químicas da solução do solo.....	58
2.3.4 Experimento I – Condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, volume coletado e tempo de equilíbrio .....	68
2.3.5 Experimento II – Características químicas da solução do solo.....	76
2.3.6 Teste de fósforo remanescente .....	90
2.3.7 Relação da concentração iônica e condutividade elétrica determinadas nas soluções extraídas via cápsula porosa e no extrato de saturação.....	91
3 CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS .....	99

## RESUMO

### **Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**

O manejo da fertirrigação com controle da concentração de íons na solução do solo, apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente viável, sendo necessário a sua calibração para que possa ser efetivamente recomendada. Diante do exposto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo determinar equações de calibração a fim de serem utilizadas no monitoramento da condutividade elétrica (CE) e da concentração de íons na solução do solo em dois tipos de solo, com ênfase principal, diferentes intensidades de vácuo, tempo de aplicação do vácuo após o evento da fertirrigação e tempo após a aplicação do vácuo para realização de coleta da solução do solo. O estudo constou de dois experimentos realizados em condições de ambiente protegido. O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) e tipos de solos foram os mesmos para ambos os experimentos, o primeiro em esquema fatorial  $2 \times 4 \times 4$ , totalizando 32 tratamentos, com três repetições. Os tratamentos foram compostos por: dois tipos de solo (Franco Arenoso -  $S_1$  e Franco Argiloso -  $S_2$ ), quatro intensidades de vácuos aplicadas aos extratores ( $V_1$  - 50,  $V_2$  - 60,  $V_3$  - 70, e  $V_4$  - 80 kPa), e quatro níveis de umidade em base peso (100, 72, 61 e 43% no solo  $S_1$  e 100, 79, 66 e 60% no solo  $S_2$ ); e o segundo num esquema fatorial  $2 \times 4 \times 3$ , totalizando 24 tratamentos, com três repetições. Os tratamentos constaram-se de quatro soluções com concentração de 0, 30, 60 e 90% da solução padrão utilizada e três intensidades de vácuos ( $V_1$  - 60,  $V_2$  - 70,  $V_3$  - 80 kPa). Os resultados obtidos demonstraram que é possível, com auxílio de extratores e transdutores de pressão, monitorar o volume e a concentração iônica da solução extraída com ótima precisão, bem como a variação de tensão em tempo real. O tempo mínimo para o equilíbrio iônico, foi de 30 horas após o evento de fertirrigação para aplicação do vácuo em ambos os solos. O tempo necessário entre a aplicação do vácuo até o momento da coleta da solução, aumentou em função da redução de umidade, bem como com o incremento do vácuo aplicado, a menor faixa de tempo observada foi de 0,37 a 0,67 horas na combinação da máxima umidade em ambos os solos com a maior e a menor intensidade de vácuo, respectivamente. A redução da umidade proporcionou um aumento na concentração iônica e na condutividade elétrica. O incremento do vácuo não afetou a concentração iônica para ambos os solos, exceto para  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ , que tiveram suas concentrações reduzidas no solo ( $S_1$ ) e o volume coletado aumentou. Os níveis crescentes de concentração aplicada proporcionaram um aumento na concentração iônica e na (CE) da solução obtida, exceto o pH, que foi reduzido no solo ( $S_2$ ), já o incremento do vácuo aplicado não proporcionou efeito significativo para nenhum parâmetro avaliado em ambos os solos no Experimento II.

Palavras-chave: Umidade de solo; Concentração iônica; Condutividade elétrica



## ABSTRACT

### **Calibration and management of porous cap soil solution samplers and pressure transducers for monitoring fertigation ions**

The fertigation management with ion concentration control in the soil solution it's an alternative technique and feasible economic, however it's necessary to calibrate it to be effectively recommended. This work had the aim to determine calibrated equations to monitor the electrical conductivity (EC) and the solution ion concentration in soils of two different textures, with primary focus on different vacuum intensity, vacuum application time after the irrigation event and time after the vacuum application for collection of soil solution. The study consisted of two experiments under greenhouse condition. The statistic delineation utilized was the entirely randomized and the soil types were the same for both experiments; the first in the factorial scheme was  $2 \times 4 \times 4$ , 32 treatments in the all, with three repetition. The treatments were composed of: two soil type ( loam-sandy -  $S_1$  and loam-clayish-  $S_2$ ), four vacuum intensity applied to extractors ( $V_1$  - 50,  $V_2$  - 60,  $V_3$  - 70, and  $V_4$  - 80 kPa) and four levels of water content on weight base ( 100, 72, 61 e 43% in the soil  $S_1$  and 100, 79, 66 and 60% in the soil  $S_2$  ); the second in the factorial scheme was  $2 \times 4 \times 3$ , 24 treatments in all, with three repetition. The treatments had four types of solution with concentration of the 0, 30, 60 e 90% in the utilized standard solution and three vacuum intensity ( $V_1$  - 60,  $V_2$  - 70,  $V_3$  - 80 kPa). The results showed that its possible, to monitor the volume and ionic concentration of extracted solution with high precision and also the tension variation in real time with the help of extractors and pressure to transducers. The minimum time for ionic equilibrium was the 30 hours after the fertigation event to apply the vacuum in both soils. The necessary time between vacuum applications until the moment of collection of solution, increased with the reduction of water content in soil, and also due to increment in the applied vacuum. The smaller time range observed was from the 0.37 to 0.67 hours under the combination of the maximum water content in both soils with the bigger and smaller vacuum intensity, respectively. The water content reduction resulted an increase in the ionic concentration and electrical conductivity. The vacuum increment did not affect ionic concentration in both soils, except for  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  and  $SO_4^{2-}$ , which were reduced in the soil  $S_1$  and the collected volume increased. The increasing level of the applied concentration provided an increase in the ionic concentration and in the EC of the obtained solution, except for pH, that which reduced in the soil  $S_2$ ; the applied vacuum increment did not affect significantly evaluated parameters in both soils in the second experiment.

Keywords: Soil moisture; Ionic concentration; Electric conductivity



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de retenção de água no solo Franco Arenoso .....	42
Figura 2 – Curva de retenção de água no solo Franco Argiloso .....	42
Figura 3 – Etapas para obtenção das curvas de retenção de água nos solos utilizados: montagem das parcelas (A), saturação dos solos (B), leituras tensiométricas (C) e pesagens dos vasos (D) .....	43
Figura 4 – Curva de calibração dos transdutores de pressão modelo MPX5100DP.....	46
Figura 5 – Calibração dos transdutores de pressão MPX5100DP: transdutores conectados ao sistema de aquisição de dados em datalogger CR21 (A) e detalhes das conexões (B) .....	46
Figura 6 – Testes de condutância (A) e de borbulhamento (B) para a caracterização e padronização das cápsulas porosas .....	48
Figura 7 – Comportamento da concentração iônica da solução coletada via extratores de cápsula porosa em solo Franco Arenoso em função do tempo.....	49
Figura 8 – Comportamento da concentração iônica da solução coletada via extratores de cápsula porosa em solo Franco Argiloso em função do tempo .....	49
Figura 9 – Procedimento de coleta de solo para confecção da pasta saturada e determinação da umidade gravimétrica.....	52
Figura 10 – Sensores conectados aos extratores instalados nas unidades experimentais (A), proteção dos solos com filme plástico (B), proteção dos extratores com papel alumínio e sistema de aquisição de dados (C) e detalhe da montagem do sensor conectado ao extrator instalado em solo fertirrigado (D) .....	54
Figura 11 – Concentração de nitrato [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] na solução extraída em solo Franco Arenoso (S <sub>1</sub> ) e solo Franco Argiloso (S <sub>2</sub> ) em função de diferentes umidades no solo (A) e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I .....	61
Figura 12 – Concentração de nitrato [K <sup>+</sup> ] na solução extraída em solo Franco Arenoso (S <sub>1</sub> ) e solo Franco Argiloso (S <sub>2</sub> ) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I .....	63

- Figura 13 – Concentração de cálcio [ $\text{Ca}^{2+}$ ] e magnésio [ $\text{Mg}^{2+}$ ] na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A e C) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B e D), Experimento I..... 65
- Figura 14 – Concentração de sulfato [ $\text{SO}_4^{2-}$ ] na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I ..... 67
- Figura 15 – Condutividade elétrica (CE) na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I..... 70
- Figura 16 – Potencial hidrogeniônico (pH) na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I..... 71
- Figura 17 – Volume coletado (VC) de solução em solo Franco Arenoso (A e B) e solo Franco Argiloso (C e D) em função de diferentes umidades (A e C) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B e D), Experimento I..... 74
- Figura 18 – Tempo de equilíbrio (t) em função da diferença dos potenciais  $|\Delta\Psi|$  de vácuo e da água nos solos Franco Arenoso (A) e Franco Argiloso (B) em diferentes umidades, Experimento I..... 76
- Figura 19 – Concentração de nitrato [ $\text{NO}_3^-$ ] da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 79
- Figura 20 – Concentração de potássio [ $\text{K}^+$ ] da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 81
- Figura 21 – Concentração de cálcio [ $\text{Ca}^{2+}$ ] da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações solução da aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 82



- Figura 22 – Concentração de Magnésio [ $Mg^{2+}$ ] da solução extraída em solo arenoso ( $S_1$ ) e argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II..... 83
- Figura 23 – Concentração de sulfato [ $SO_4^{2-}$ ] da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 85
- Figura 24 – Concentração de sulfato [ $SO_4^{2-}$ ] da solução extraída em solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 86
- Figura 25 – Condutividade elétrica (CE) da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função da condutividade elétrica da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 88
- Figura 26 – pH da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função dos diferentes potenciais hidrogeniônico da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II ..... 90
- Figura 26 – Relação entre os valores de:  $NO_3^-$  (A),  $K^+$  (B),  $Ca^{2+}$  (C),  $Mg^{2+}$  (D),  $SO_4^{2-}$  (E) e (F) CE no extrato de saturação, obtidos e estimados a partir das concentrações na solução obtida com extratores de cápsula porosa com correção em função da umidade para ambos os solos utilizados no experimento II..... 94



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentração da solução padrão utilizada na fertirrigação.....	41
Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica dos solos utilizados nos experimentos.....	44
Tabela 3 - Caracterização química dos solos utilizados nos experimentos .....	44
Tabela 4 - Caracterização química do extrato da pasta saturada dos solos utilizados nos experimentos .....	45
Tabela 5 - Resumo da análise da variância para concentração de $\text{NO}_3^-$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ e $\text{SO}_4^{2-}$ na solução coletada em solo Franco Arenoso por meio de extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e umidades no solo .....	59
Tabela 6 - Resumo da análise da variância para concentração de $\text{NO}_3^-$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , e $\text{SO}_4^{2-}$ na solução coletada no solo Franco Argiloso por meio de extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e umidades no solo .....	59
Tabela 7 - Resumo da análise da variância para as variáveis CE, pH, volume coletado (VC) e tempo (t) (necessário para a tensão aplicada entrar em equilíbrio com o potencial de água no solo) da solução coletada utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e diferentes umidades em solo Franco Arenoso .....	69
Tabela 8 - Resumo da análise da variância para as variáveis CE, pH, volume coletado (VC) e tempo (t) (necessário para a tensão aplicada entrar em equilíbrio com o potencial de água no solo) da solução coletada utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e diferentes umidades em solo Franco Argiloso.....	69
Tabela 9 – Valores médios do tempo de equilíbrio entre o vácuo aplicado extratores providos de cápsulas porosas e o potencial de água nos solos Franco Arenoso e Franco Argiloso em diferentes umidades .....	75



## 1 INTRODUÇÃO

O uso da fertirrigação vem se expandido consideravelmente no Brasil, sobretudo em condições de irrigação localizada. Com a expansão desta técnica, a demanda por informações visando o seu manejo adequado tem aumentado consideravelmente; não obstante, tais informações ainda são escassas.

Apesar da fertirrigação se mostrar promissora, seu êxito está condicionado à geração de informações capazes de proporcionar o seu manejo de forma mais adequada. O monitoramento de íons no solo constitui-se em uma das principais ferramentas no manejo de fertirrigação. Esse tem sido realizado com base em amostragens de solo ou de solução do solo, por meio de extratores (RHOADES; OSTER, 1986).

O conhecimento da concentração de nutrientes na solução do solo é desejável para o manejo racional da adubação e, mais recentemente, da fertirrigação, técnica que permite grande flexibilidade no parcelamento da adubação ao longo do ciclo das culturas. Porém, a coleta de amostras da solução do solo para análise de nutrientes é uma tarefa difícil e, portanto, conforme relatado por Smethurst (2000), as recomendações de adubação não são baseadas nas características químicas da solução do solo devido à dificuldade de obtenção da solução e determinação da concentração dos nutrientes e, também devido à alta variabilidade espacial e temporal da solução do solo.

A amostragem de solo, além de ter o inconveniente de destruir a estrutura, é limitada no tempo e no espaço, uma vez que seus resultados representam uma condição iônica referente apenas ao momento e ao volume de solo em que foi realizada. De forma análoga, a extração de solução do solo também não permite o conhecimento do estado iônico do solo em tempo real, além de que a extração ser possível apenas em regiões do solo com teores de água associados aos potenciais superiores aos aplicados nos extratores. Portanto, a implementação de um método de extração capaz de monitorar de forma contínua a distribuição de água e íons nos solos cultivados sob fertirrigação, faz-se necessária para facilitar o manejo e o controle da

concentração iônica disponível na solução do solo a fim de evitar problemas nutricionais ou hídricos às culturas.

Nesta perspectiva, o uso de extratores de solução tem auxiliado o manejo da fertirrigação no controle da solução de íons com bastante êxito, evitando problemas de salinização e desequilíbrio nutricional nos cultivos em solos de ambiente protegido (DIAS et al., 2006; SILVA, 2002). Aos extratores de solução do solo providos de cápsulas porosas podem ser aplicados os mesmos princípios teóricos do movimento de fluxo dos tensiômetros, sendo que neste caso o fluxo de solução, normalmente se dá em sentido contrário ao do fluxo que ocorre no tensiômetro, ou seja, do solo para o extrator, graças ao gradiente de potencial gerado pelo vácuo que é aplicado ao extrator.

Para a obtenção de resultados confiáveis, as cápsulas, os transdutores pressão e demais materiais, devem ser testados, calibrados e padronizados quanto as suas características de operação.

Esta pesquisa teve como objetivo geral calibrar, avaliar o desempenho e monitorar a concentração iônica da solução do solo obtida via extratores providos de cápsulas porosas em dois tipos de solo de textura contrastante, quando submetidas a diferentes intensidades de vácuo e tempo de aplicação do vácuo após o evento da fertirrigação, bem como o tempo para realização da coleta de solução do solo após a aplicação do vácuo no interior dos extratores.

Quantificar a intensidade de vácuo, bem como o tempo ótimo após o evento da fertirrigação e o intervalo de tempo após o vácuo e a coleta, que proporcionem a extração da solução do solo a qual mais se assemelhe à absorvida pelos vegetais em diferentes disponibilidades de umidade e concentração iônica atual, ou seja, o objetivo específico foi encontrar a combinação ideal dos fatores que proporcione resultados a serem utilizados em praticas de manejo da fertirrigação, especialmente em condições protegidas.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Revisão bibliográfica**

#### **2.1.1 Fertirrigação**

A técnica da fertirrigação é uma das formas mais eficiente de aplicação de fertilizantes, pois é a que mais se aproxima do ritmo de absorção de água e nutrientes pela planta. Esta técnica, quando utilizada adequadamente, contribui para o aumento da produtividade das culturas, melhora a eficiência do uso de fertilizantes devido à redução das perdas por lixiviação e controle da concentração de nutriente do solo, evitando a salinização do solo e contaminação do lençol freático. Dessa forma, a fertirrigação se associa basicamente com os sistemas de irrigação de alta frequência (DOMINGUEZ VIVANCOS, 1993).

Devido ao rápido crescimento da fertirrigação no Brasil, a prática se adiantou à pesquisa, sendo esta técnica utilizada, na maioria dos casos, de forma empírica e manejada inadequadamente e, conseqüentemente reduz a produtividade e a qualidade do produto, onera custos de produção, amplia a perda de água e de fertilizantes, causando danos irreversíveis ao ambiente (VILLAS BÔAS et al., 2001).

Para o manejo adequado da fertirrigação são pontos imprescindíveis: o conhecimento das propriedades do solo, no que diz respeito à textura, pH, cátions trocáveis e em solução, densidade, permeabilidade e condutividade elétrica; e de propriedades da água como a concentração de sais e pH (SOUSA; SOUZA, 1992).

Os sistemas de irrigação localizada são os mais indicados quando se utiliza a fertirrigação, principalmente o gotejamento, pois estes sistemas aplicam água e nutrientes na quantidade e posição adequadas em todo o campo com maior eficiência de distribuição. Além disso, ele pode ser projetado e operado de modo que a água e os nutrientes sejam aplicados em uma taxa, duração e frequência que maximize a absorção do nutriente pela cultura e minimize a lixiviação dos nutrientes e produtos químicos para fora da zona radicular (GÄRDENÄS et al., 2005).

Dessa forma, a fertirrigação associada com os sistemas localizados permite um manejo adequado dos nutrientes no solo. Por exemplo, o um aumento da frequência de fertirrigação irá reduzir a concentração na água de irrigação de elementos considerados “imóveis” como fósforo e potássio e diminuir a poluição ambiental pela lixiviação desses nutrientes.

Em geral, as análises de laboratório são feitas somente quando há algum problema, devido ao custo elevado e ao longo tempo que se gasta para se realizarem essas análises. Com isso, o manejo da fertirrigação normalmente é baseado em estimativas, conduzindo muitas vezes a uma aplicação excessiva dos fertilizantes, causando excessiva lixiviação dos nutrientes e a conseqüente poluição dos aquíferos (JIMÉNEZ et al., 2006).

Tradicionalmente, o manejo da fertirrigação é realizado ministrando-se quantidades preestabelecidas de fertilizantes, parceladas de acordo com a marcha de absorção da cultura não existindo, normalmente, monitoramento da concentração de íons na solução do solo nem do estado nutricional da planta (PAPADOPOULOS, 1999).

Considerando-se inevitável e imprescindível o conhecimento da composição química da solução do solo para um bom manejo da fertirrigação, visando evitar a ocorrência de desequilíbrios nutricionais, em virtude da dificuldade de se quantificar com precisão os nutrientes disponíveis em solução para serem absorvidos pelas plantas e também à interferência inerente ao complexo de troca iônica do sistema solo, estudos realizados por vários autores, como Silva (2002), que propôs o monitoramento periódico da salinidade e de alguns nutrientes na solução do solo, com auxílio dos extratores de solução e de testes rápidos e Dias et al. (2005) obtiveram bons resultados utilizando extratores de solução do solo no manejo da fertirrigação e no controle da evolução salinidade do solo sob condição protegida.

Neste aspecto, seria mais indicado racionalizar o manejo da fertirrigação por meio da determinação da condutividade elétrica e/ou da concentração parcial de íons na solução do solo.



### 2.1.2 Extratores de solução

Os extratores de solução são equipamentos constituídos por um tubo de PVC, acoplado a uma cápsula de cerâmica porosa em sua extremidade inferior, na parte superior vedado com borracha especial de silicone, sendo este equipamento construído de forma e princípio de funcionamento semelhante aos tensiômetros (Figura 1A).

O uso de extratores de solução do solo auxilia no manejo da fertirrigação, monitoramento da dinâmica de íons em solução, permitindo identificar e contornar problemas causados por desequilíbrios nutricionais e processos de salinização. As cápsulas de cerâmica porosa são extensamente utilizadas para medir a lixiviação de nitrato na agricultura, mas não está inteiramente claro que este procedimento dá resultados confiáveis ou que fatores podem limitar o seu uso (LORD; SHEPHERD, 1993).

Segundo Burgueño (1996), ao se estabelecer o monitoramento periódico, a aplicação de fertilizantes pode ser controlada de forma a manter a concentração da solução do solo variando numa faixa de condutividade elétrica (CE) considerada adequada para a cultura, não sendo, portanto, necessário se aplicar lâminas de lavagem de manutenção, evitando, assim, desperdícios com água, energia e fertilizantes. Cápsulas porosas têm sido utilizadas na extração de solução do solo, principalmente para avaliação da concentração de íons. A principal vantagem do uso desses materiais é que a solução pode ser extraída sem a destruição da unidade experimental, permitindo a continuidade do estudo por longo período na mesma área, parcela ou mesmo vaso.

Contudo, não se dispõe de dados relacionados à condutância e tempo de resposta de cápsulas utilizadas a campo, tão pouco, das possíveis alterações destas características em virtude do uso de práticas agrícolas tais como a fertirrigação. A utilização de soluções com concentrações iônicas relativamente altas pode proporcionar interferências na composição do material cerâmico formador das cápsulas. Outro fator importante, a ser analisado, seria o efeito de partículas físicas presentes no solo agirem como material obstrutor dos poros da cápsula.

As cápsulas porosas de cerâmica são construídas com porosidade tal que apresentem pressão de borbulhamento superior a 100 kPa (LIBARDI, 2000) e devem ter condutância alta e uniforme, pois a resposta dos extratores está condicionada a esta característica.

Em relação às cápsulas de cerâmica, Cassel e Klute (1986) afirmam que duas características são importantes: a pressão de borbulhamento e a condutância da cápsula. A pressão de borbulhamento é a pressão requerida para forçar a passagem de ar através da cápsula de cerâmica imersa em água, sendo o valor mínimo adequado para um bom funcionamento do tensiômetro igual a 100 kPa. Já a condutância hidráulica é definida como a quantidade de água que passa através da cápsula de cerâmica, por unidade de tempo e por unidade de diferença de pressão. Maiores valores de condutância são interessantes visto que, juntamente com a sensibilidade do medidor de vácuo, determina o tempo de resposta do tensiômetro, como mostrado por Klute e Gardner (1962) e Towner (1980).

Saad e Libardi (1994) relatam que há necessidade da transferência de certo volume de água entre a cápsula porosa e o solo. Essa quantidade de água necessita de certo tempo para a transferência, denominado tempo de resposta, o qual, segundo Klute e Gardner (1962), está sujeito à sensibilidade do medidor de vácuo, à condutância da cápsula e à condutividade hidráulica do solo no qual o instrumento está instalado. Para Cassel e Klute (1986) o tempo de resposta de um tensiômetro é a medida de sua sensibilidade às mudanças de sucção da água no solo junto à superfície.

A qualidade da solução obtida com os extratores tem sido tema de questionamentos, principalmente com relação à intensidade do vácuo aplicado, à zona de influência da cápsula, à liberação ou adsorção de íons pela cápsula e à volatilização de compostos promovida pelo vácuo.

A sucção promovida pelo vácuo gera um gradiente de potencial no solo em torno da cápsula e, como resultado, quanto maior o vácuo maior será a zona de influência ou o volume de solo amostrado; o potencial mátrico apresenta maior variação próximo à cápsula, reduzindo linearmente com a distância, tanto vertical quanto horizontal.

Na literatura não existe uma padronização quanto à intensidade do vácuo a ser aplicado nos extratores para futura coleta de solução do solo. Sabe-se a necessidade de se encontrar um tempo ideal entre a fertirrigação e a aplicação do vácuo, tendo em vista que a importância da distribuição da solução em todo perfil. Medeiros (2007) e Dias et al. (2005) trabalhando em solo arenoso utilizaram 6 e 12 horas, respectivamente, para aplicação do vácuo após o evento da fertirrigação. Já para aplicações do vácuo são relatados e encontrados valores de tensão de 60 kPa (FOLONI; ROSOLEM; GARCIA, 2006), tensão de 70 kPa em solo de textura franco-arenosa e solo com 42,5% de argila (GOMES, 2005; SILVA et al., 2005), respectivamente. Mota, Villas Boas e Sousa (2006) aplicaram vácuo de 70 kPa trabalhando em substrato; Casarini, Folegatti e Silva (2007) em solo de textura franco argilo-arenosa utilizaram vácuo de 70 kPa; Silva et al. (2000) aplicaram sucção de 72 kPa em extratores de cápsulas porosas instalados em solo classificado com Terra Roxa Estruturada fase argilosa; tensão de sucção de 80 kPa foi utilizada em Latossolo Vermelho fase arenosa (ELOI, 2007). Valero (2006) utilizou uma tensão de 90 kPa para coletar solução através de cápsulas porosas instaladas em substratos orgânicos (casca de pínus e fibra de coco).

Com relação ao intervalo de tempo entre a aplicação do vácuo e a coleta da solução, é encontrada uma gama de valores: Silva et al. (2005) realizaram coleta da solução após 2 horas, Mota, Villas Boas e Sousa (2006) utilizaram 14 horas, enquanto que Gomes (2005) coletou a solução do solo 24 horas após a sucção.

Pode-se constatar que não existe na literatura uma padronização quanto à intensidade do vácuo, tempo de coleta de solução do solo e tempo adequado entre o vácuo e a coleta da solução, o que dificulta o uso dos extratores no auxílio ao manejo da fertirrigação em sistemas de produção.

### **2.1.3 Tempos entre a fertirrigação e aplicação do vácuo e entre a aplicação do vácuo e coleta de solução do solo**

O tempo de aplicação do vácuo após a fertirrigação tem sido descrito nos trabalhos envolvendo uso de extratores de solução, de forma bastante variada, chegando a encontrar valores de 4 até 48 horas após a fertirrigação. Este tempo deve ser suficiente para que haja equilíbrio entre a solução aplicada e a do solo, além disso, deve-se considerar que existe um tempo diferenciado no avanço da frente de molhamento em relação ao posicionamento do extrator. Um tempo muito longo após a injeção do fertilizante pode levar a diminuição de água no solo (principalmente em solos arenosos) e conseqüente dificuldade de extrair solução.

O volume e a qualidade da solução do solo obtida com os extratores de cápsulas porosa tem sido tema de questionamento, principalmente com relação à intensidade do vácuo e o tempo em que a solução do solo entra em equilíbrio (BLANCO, 2004). A sucção promovida pelo vácuo gera um gradiente de potencial no solo em torno da cápsula e, como resultado, quanto maior o vácuo maior será a zona de influência da cápsula (GROSSMANN; UDLUFT, 1991).

A concentração iônica da solução do solo pode ser influenciada pelos procedimentos realizados durante a extração. De acordo com Morrison e Lowery (1990), o tamanho da cápsula e o tempo que a mesma é submetida ao vácuo são fatores que influenciam no equilíbrio iônico da solução do solo; ainda relatam que existe um tempo de equilíbrio variável entre a solução interna e externa nos sistemas sob tensão zero.

Dias et al. (2005) utilizando extratores de solução do solo no manejo da fertirrigação e no controle da salinidade do solo, aplicavam sucção no interior do extrator de solução, com o auxílio de uma bomba de vácuo, de aproximadamente 80 kPa. A aplicação do vácuo aos extratores se dava 12 horas após a irrigação, no momento em que era verificada a umidade do solo por meio de tensiômetros. Porém Sousa (2000) aplicava um vácuo de 70 kPa nos extratores, logo após a fertirrigação, e as amostras de solução do solo eram coletadas seis dias após o vácuo.

Em um trabalho em que foi avaliada a dinâmica de nutrientes no perfil do solo através da coleta de solução do solo, sob sistema de fertirrigação, na citricultura, Souza (2006) aplicava o vácuo com uma seringa nos extratores de solução, aproximadamente 12 horas após a fertirrigação, e cerca de 24 horas depois deste procedimento, era feita à coleta da solução.

No trabalho realizado por Blanco (2004), com o objetivo de estudar os efeitos de três doses de N e K na tolerância da cultura do tomateiro à salinidade, bem como avaliar o desempenho de medidores de íons específicos (MIE) na determinação de nutrientes na solução do solo e na seiva da planta, utilizou extratores de solução do solo. Nesta investigação, a coleta da solução do solo foi realizada em um intervalo de 15 dias após a aplicação do vácuo aos extratores. O vácuo aplicado aos extratores foi de aproximadamente 70 kPa entre 24 e 48 horas após a irrigação.

Para determinar os teores de nitrato e potássio na solução do solo, Silva et al. (2003) utilizaram extratores de solução do solo; nestes a aplicação do vácuo era feita 12 horas após a irrigação, por meio de uma bomba de vácuo, promovendo uma tensão de aproximadamente 80 kPa. As soluções do solo eram retiradas das câmaras dos extratores aproximadamente 4 horas após a aplicação do vácuo. Os mesmos autores, trabalhando com extratores de cápsula porosa para o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução do solo, aplicavam um vácuo de aproximadamente 72 kPa, e após um período de sete dias, eram coletadas as soluções (SILVA et al., 2000).

Nota-se em relatos da literatura que o tempo entre o final da fertirrigação e da aplicação de vácuo no extrator é muito variável, não havendo testes comparativos entre momentos de coleta. O mesmo pode ser dito com relação ao tempo entre a aplicação do vácuo e coleta da solução, visto que na literatura há trabalhos que consideram horas e outros dias.

#### 2.1.4 Métodos de extração da solução do solo

Diferentes métodos podem ser utilizados para a obtenção da solução do solo. Alguns métodos são apresentados por Wolt (1994), dentre eles o da centrifugação, deslocamento em coluna, extração em membrana sob pressão, extrato de saturação, extratos aquosos e métodos lisimétricos, incluindo o método do lisímetro de tensão, mais conhecido como método dos extratores de cápsula porosa.

Lao et al. (2004) citam que foram Briggs & McCall os primeiros a introduzirem a técnica de cápsulas de sucção, propondo seu uso como uma raiz artificial para simular a sucção de água e nutrientes disponíveis no solo para as plantas. Todavia, talvez tenha sido Wagner (1962) o primeiro a utilizar os extratores providos de cápsula de cerâmica porosa para extrair a solução do solo, embora, freqüentemente, tenha sido atribuída a Reeve e Doering (1965) a invenção deste equipamento. De fato, estes foram os primeiros a apresentarem dados de condutividade elétrica medida na solução (CEs) extraída com cápsulas porosas, enquanto que Wagner (1962) realizou apenas uma avaliação do volume de solução coletado para diferentes umidades do solo e uma breve avaliação da adsorção de íons pela cápsula, e sugeriu que a metodologia poderia ser utilizada para o estudo do balanço de nutrientes a diferentes profundidades.

O uso de cápsulas de sucção é o único método viável para extrair *in situ* a solução do solo, sem fazer diluições da mesma. Desta forma, nos casos, onde é necessário saber a composição iônica da solução do solo, esta técnica pode ser usada (LAO et al., 2004). Segundo Grossmann e Udluft (1991), este método de obtenção da solução do solo é vantajoso porque permite a amostragem contínua durante todo o período e, se necessário, em diversas profundidades de um perfil de solo. Entretanto, os autores alertam que alguns problemas podem ocorrer, tais como variabilidade espacial das propriedades estudadas e alteração da amostra pelo sistema de amostragem.

A utilização de cápsulas porosas para extrair a solução do solo é bastante difundida, principalmente devido ao manejo fácil, custo relativamente baixo e pelo fato

do extrato obtido não requerer tratamentos prévios às determinações físico-químicas e à quantificação de seus componentes (MORAES; DYNIA, 1990).

A extração da solução do solo por intermédio de cápsulas porosas surge como uma alternativa, a um custo relativamente reduzido, capaz de ser aplicada a situações de campo. O mais sensato, portanto, parece ser racionalizar o manejo da fertirrigação, determinando a condutividade elétrica e/ou a concentração parcial de íons na solução do meio.

Essa metodologia permite a extração da solução do solo em umidades próximas à capacidade de campo e de fácil execução, apresentando ainda várias vantagens, como: a solução corresponde à umidade equivalente ao momento em que a solução do solo é absorvida pela planta e assim os solutos dissolvidos são os mesmos que a planta estaria absorvendo; a amostragem é sistemática, verdadeiramente pontual e não destrutiva; a aferição da condutividade elétrica é praticamente instantânea (SILVA et al., 1999).

No entanto, essa metodologia apresenta alguns obstáculos, necessitando assim de estudos mais profundos. Dificilmente os solutos estão diluídos homogeneamente na solução do solo; em virtude das variações físico-químicas das superfícies, a variação de intensidade do vácuo no processo de sucção interfere na amostragem, ou seja, pequenas sucções esvaziam poros grandes e sucções maiores esvaziam poros menores e como cada poro tem uma concentração iônica diferente, os resultados são variáveis; existe variação iônica dentro do mesmo poro, dada à proximidade das cargas trocáveis no complexo sortivo.

Coelho et al. (2005) relatam algumas dificuldades encontradas para o uso de extratores de solução na avaliação da dinâmica dos nutrientes no solo, uma vez que requer determinado tempo para entrada da solução na cápsula, tempo este que varia conforme os teores de água em volta da cápsula porosa, a condutância da cápsula e a diferença entre o potencial de água do solo e dentro da cápsula, após aplicação da sucção.

Nesse sentido, o uso de extratores de solução do solo para fins de manejo da fertirrigação foi avaliado por alguns pesquisadores (BLANCO, 2004; DIAS, 2004; DIAS

et al., 2002; SILVA, 2002; SILVA et al., 1999; TAVARES, 2005). Em resumo, estes trabalhos enfocaram a questão da utilização dos extratores como forma de se estimar a concentração de íons na solução do solo; a sensibilidade de testes rápidos na detecção desses íons no extrato da solução; o controle da salinidade através do uso de extratores e a resposta de algumas culturas ao manejo controlado da salinidade do solo comparativamente ao manejo tradicional da fertirrigação.

Em todos os trabalhos os resultados mostraram tendências promissoras quanto ao uso dos extratores, mas em nenhum deles analisou-se fatores como intensidade de vácuo, tempo de equilíbrio, umidade e suas influências sobre a concentração de íons específicos na solução do solo para fins do manejo da fertirrigação.

### **2.1.5 Monitoramento da solução do solo**

A solução do solo é a porção aquosa do solo que contém materiais dissolvidos provenientes dos processos químicos e bioquímicos do solo e provenientes da troca com a hidrosfera e biosfera.

Este meio transporta espécies químicas para as partículas do solo, mantendo um contato íntimo entre os solutos e as partículas do solo. Existe uma condição de equilíbrio entre os componentes da solução de solo e a fase sólida, através da ocorrência de importantes reações químicas com transferência de espécies entre as fases. Além da fase sólida, a solução do solo ainda interage com a fase gasosa, com as plantas e fauna do solo (MEURER; ANGHINONI, 2004). Ainda, segundo os autores, o estudo e caracterização da composição da solução de solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de absorção, adsorção, dissolução e precipitação que podem ocorrer no solo, sendo que a análise química das soluções pode identificar as formas e quantidades dos elementos que estão sendo adicionados ao solo e transferidos para outros compartimentos do ambiente através do lençol freático.

A composição química da solução de solo varia em função do material de origem, pH, teor de matéria orgânica, adição de produtos químicos, das condições de oxi-reduções, do manejo do solo e também do clima (MEURER; ANGHINONI, 2004).



De acordo com Mengel e Kirkby (1978), as concentrações de elementos na solução do solo seguem uma tendência em que geralmente fosfatos apresentam concentrações muito baixas, as de  $[K^+]$  e  $[Mg^{2+}]$  são médias enquanto que as de  $[Ca^{2+}]$  são preferencialmente altas. O nitrato apresenta-se frequentemente em maiores concentrações, ocorrendo muitas vezes em níveis da mesma ordem que a soma de  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$ . O nitrato é um íon absorvido rapidamente pelas plantas, podendo ser, também, rapidamente lixiviado para os horizontes mais profundos do solo, o que pode fazer resultar em flutuações em suas concentrações.

As raízes das plantas absorvem a solução do solo juntamente com íons dissolvidos, constituindo-se em parâmetro produtivo direto para a cultura; é fundamental sabê-la como base para o manejo da fertirrigação (LAO et al., 2004).

A importância de se conhecer as propriedades químicas da solução do solo para o manejo racional do solo e da água é reconhecida há muitos anos. No século passado, Hoagland, Martin e Stewart (1920) já afirmavam que o progresso no estudo do solo como um meio para o crescimento das plantas dependerá de um melhor conhecimento da solução do solo, uma vez que os nutrientes absorvidos pelas plantas são obtidos da solução do solo.

Inicialmente acreditava-se que o equilíbrio químico da solução do solo requeria a precipitação dos sais adicionados com a finalidade de manter a composição da solução constante, a qual era governada principalmente pelos minerais de origem do solo (CAMERON, 1911). Posteriormente, Hoagland, Martin e Stewart (1920) demonstraram que a concentração química da solução do solo poderia ser elevada pela adição de sais solúveis e que os elementos adicionados seriam os mesmos a apresentar aumento na concentração.

A análise da solução do solo é um critério objetivo para definir a solução nutritiva, de modo que possa ser uma ferramenta apropriada para o manejo da fertirrigação. Os níveis dos nutrientes da solução do solo devem ser conhecidos para estabelecer a aproximação apropriada ao manejo dos nutrientes (LAO et al., 2004). Após ter extraído a solução do solo ou, no exemplo de culturas hidropônicas, após ter coletado a drenagem, a análise frequente do nutriente seria necessária, permitindo um controle

nutritivo mais efetivo da cultura. Neste caso, seria útil ter equipamentos que permitisse monitorar a concentração iônica da solução, de fácil manuseio por técnicos e fazendeiros e que determine os diferentes parâmetros nutritivos rapidamente (JIMÉNEZ et al., 2006).

A técnica de fertirrigação permite aplicação ajustada da solução nutritiva; entretanto, a solução quando chega ao solo é modificada, e a que fica disponível para planta é desconhecida. O uso de cápsulas porosas sob sucção e de teste rápido pode permitir o conhecimento do estado químico da solução do solo (JIMÉNEZ et al., 2006).

Lao et al. (2003) encontraram um modelo linear simples para estimar a composição real da solução do solo a partir da umidade e da composição da solução, mostrando uma correlação com os valores experimentais encontrados por meio das cápsulas de sucção após a irrigação. Para os autores, este modelo pode ser usado no cálculo da composição de soluções nutritivas e também pode ser relevante na preparação de soluções balanceadas para fertirrigação, maximizando a produção e minimizando o uso excessivo de fertilizantes e a poluição em ecossistemas de horticultura intensiva.

Dias et al. (2004) citam como resultados preliminares, concentrações adequadas de nitrato e potássio na solução do solo para as culturas do tomate, pimentão e pepino. Lao et al. (2004), estudando a solução do solo em casas de vegetação com cultivos comerciais de tomateiros, encontrou valores médios de nitrato e potássio de 12,7 e 6,0  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , respectivamente, e concluíram que a aplicação de nitrato deve ser controlada pela solução do solo, pois este elemento é muito móvel no solo, o que provavelmente gerou grandes variações nos valores encontrados para este nutriente. Entretanto, esses resultados são apenas indicativos e ainda precisam ser comprovados.

Silva (2002), estudando a utilização de extratores providos de cápsulas cerâmicas no manejo da fertirrigação e no controle da salinização ocasionado pelo acúmulo de fertilizantes, encontrou resultados que demonstraram a possibilidade do uso da técnica proposta para monitorar a concentração iônica da solução do solo, além de possibilitar a determinação dos íons potássio e nitrato com alta precisão, cálcio e magnésio com precisão satisfatória. Segundo esse autor os extratores de cápsula

porosa não são recomendados para a determinação da concentração de enxofre e fósforo na solução do solo.

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

Sendo assim, o monitoramento destas concentrações exige determinações constantes e a frequência destas determinações pode ser elevada se o ciclo da cultura for curto; assim sendo, a utilização de extratores de solução do solo surge como uma alternativa viável.

### **2.1.6 Comportamento dos íons no solo**

A dinâmica dos íons no solo é dependente de vários fatores, tais como textura do solo, quantidade de nutriente aplicada, intensidade de chuva ou lâmina de água aplicada na irrigação, forma química do nutriente aplicado, entre outros. Sousa (2000) acrescenta que o movimento de íons no solo está relacionado com a intensidade de percolação da água e com o comportamento de cada um em relação às condições de fixação, adsorção e lixiviação, que é função de cada íon e do tipo de solo em que se encontra.

Segundo Mmolawa e Or (2000), os produtos químicos aplicados por meio da água de irrigação sofrem mudanças espacial e temporal no solo, variando sua distribuição no perfil, o que resulta em diferentes padrões de distribuição.

O nutriente de maior mobilidade no solo é o nitrogênio na forma de nitrato  $[\text{NO}_3^-]$ . Segundo Burt et al. (1998), seu movimento no solo é, aproximadamente, proporcional ao da água que percola no solo. Desse modo, o movimento desse íon no solo será afetado diretamente pelos fatores que modificam o movimento da água no solo, como a porosidade e a estrutura. Sua alta solubilidade e a fraca interação com a matriz do solo possibilitam que o ânion acompanhe a frente de umedecimento da água no solo; assim,

o nitrato tanto pode movimentar-se para baixo, sob condições de excessiva precipitação ou irrigação, quanto para cima, por fluxo ascendente, durante estações extremamente secas. A textura do solo e o conteúdo de matéria orgânica têm maior influência nas perdas por lixiviação. Solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de nitrato por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos (MUCHOVEJ; RECHCIGL, 1994).

O potássio por ser um nutriente móvel, pode ser facilmente perdido ao longo do perfil do solo, sendo necessárias aplicações freqüentes desse elemento. Os mecanismos que controlam o transporte de potássio no solo são baseados na rápida troca com outros cátions no solo. Quando a quantidade de potássio no solo é relativamente pequena com relação à capacidade de troca de cátions, a adsorção é controlada principalmente pelas variações da concentração de potássio na solução do solo. Quando a concentração de potássio na solução do solo aumenta, a capacidade tampão do potássio decresce e a velocidade de transporte do potássio se incrementa.

No período de máxima taxa de absorção de potássio pela planta, com alta demanda de potássio, este elemento deve ser suprido pela água de irrigação até que a concentração no solo seja suficiente (BAR-YOSEF, 2000).

Segundo Scaloppi e Brito (1986), o potássio solúvel ou trocável geralmente representa uma pequena proporção, mas, ocasionalmente, pode estar incluído entre os principais constituintes da salinidade do solo. Cloreto, sulfato e, menos freqüentemente, nitrato, e pequenas quantidades de bicarbonatos, representam os ânions principais.

Além dos sais solúveis, os solos salinos podem conter sais de menor solubilidade, como sulfato de cálcio (gesso) e carbonatos de cálcio e magnésio (calcário). Pelo fato dos colóides estarem floculados, a permeabilidade é igual ou superior a dos solos similares, não salinos.

Por outro lado, a fertilização com potássio quando adicionado via água de irrigação, geralmente não causa qualquer reação química adversa nas tubulações e emissores, mas pode causar precipitação de sais insolúveis se são misturados com outros fertilizantes. Por exemplo, se o nitrato de cálcio é misturado com sulfato de potássio, pode resultar em um sulfato de cálcio insolúvel (ROLSTON et al., 1986).

Sparks e Huang (1985) indicam que o potássio do solo pode ser lixiviado, adsorvido pelo solo ou absorvido pela planta. Os fatores que influenciam no movimento do potássio no solo são: a condutividade hidráulica, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a absorção pela planta. A habilidade do solo em reter o potássio aplicado é muito dependente da capacidade de troca de cátions do solo, assim, as quantidades de argila e matéria orgânica no solo, influenciam, fortemente, no grau de lixiviação. Os solos com alta capacidade de troca têm grande habilidade em reter o potássio aplicado; entretanto, a lavagem deste elemento é freqüentemente um problema em solos arenosos.

A taxa de fixação de fósforo no solo é alta e, conseqüentemente, o seu movimento é limitado; com isto, várias fontes e métodos de aplicação de fósforo vem sendo testados para evitar, pelo menos parcialmente, os problemas de distribuição desse elemento no solo. Embora o movimento do fósforo dependa de muitos fatores químicos e físicos do solo, a textura, a taxa de aplicação e a quantidade de água aplicada são as variáveis que mais afetam seu movimento (VILLAS BÔAS et al., 2002).

O fósforo ao ser aplicado através da fertirrigação localizada, tanto em solos arenosos como argilosos, tende a aumentar na sua mobilidade, devido à saturação dos sítios de adsorção próximos ao ponto de saída da solução (COELHO, 1994). Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de fósforo em solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0 kg ha<sup>-1</sup>, devido a elevada tendência de remoção do fósforo na solução, tanto por precipitação quanto por adsorção com compostos de Al, Fe e Ca (FURTINI NETO et al., 2001).

De acordo com Malavolta (2006), do ponto de vista do aproveitamento pelas plantas, o pH parece ser a variável com maior influência na disponibilidade. Sendo que em pH mais ácido (menor que 5,5) o P é fixado por óxidos de ferro, alumínio e manganês tornando o fósforo indisponível para as plantas, o mesmo acontece quando o pH se torna alcalino (maior que 7,0), mas nessa situação, o fósforo é fixado por óxidos de cálcio; portanto, concluí-se que deve-se manter o pH dos solos entre 5,5 e 6,5 para evitar a fixação do fósforo.

Considerado que a maioria dos solos apresenta pH na faixa de 4,0 a 9,0 as formas predominantes são  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , com quantidade de cada dependendo do pH da solução. Com o pH próximo a 7,2 as quantidades se equivalem. Abaixo deste valor de pH, condição existente na grande maioria dos solos cultivados,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é a forma predominante (FURTINI NETO et al., 2001). A medida que o pH do solo aumenta, ocorre à redução das concentrações de Fe, Al e Mn na solução, reduzindo a precipitação do P com os mesmos. Isso ocorre até a faixa de pH próximo a 6,5, acima do qual começam a ocorrer perdas de P ligado ao cálcio.

De acordo com O'Neill e Roth (1979) o caminhamento do fósforo é, também, variável com a fonte utilizada. Uma maior movimentação do fósforo foi observada com aplicação via ácido fosfórico em relação ao superfosfato triplo.

A entrada de S no solo pode ocorrer pelo intemperismo de minerais sulfatados, pelas águas da chuva e irrigação, pela adsorção direta do S atmosférico e pelas adições de fertilizantes minerais ou orgânicos. Por outro lado, as saídas deste elemento estão relacionadas às exportações pelas culturas, lixiviação, erosão e emissão de gases sulfurados. Durante o intemperismo, muito do S presente em pirita e outros sulfetos metálicos podem ser transformados em  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , sendo este adsorvido pelos colóides do solo, perdido por lixiviação (JORDAN; ENSMINGER, 1958) ou transformado em formas orgânicas pelos microorganismos e plantas (BISSANI; TEDESCO, 1988).

O ânion  $[\text{SO}_4^{2-}]$  pode ser adsorvido aos colóides do solo eletrostaticamente (MARSH et al., 1987) ou covalentemente, com troca de ligantes (ZHANG; YU, 1997), sendo intermediário ao nitrato e ao fosfato em termos de adsorção.

Solos argilosos e com teores elevados de óxidos de ferro, apresentam alta capacidade de retenção de  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , tornando a sua movimentação no perfil mais lenta, comparativamente a solos com menor quantidade desses grupos funcionais. Em solos arenosos ou poucos intemperizados, o  $[\text{SO}_4^{2-}]$  tende a deslocar-se mais rapidamente para os horizontes subsuperficiais, ou mesmo, sair do sistema solo por lixiviação. Geralmente, são encontrados teores mais elevados de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  nos horizontes subsuperficiais, com maior quantidade de colóides inorgânicos, em relação à superfície (MACINTIRE et al., 1945; ENSMINGER, 1954).

Dentre as condições geoquímicas da solução, o pH do solo é uma das mais importantes na adsorção de  $[\text{SO}_4^{2-}]$ . Conforme aumenta o pH do solo, diminui a adsorção deste ânion pelos colóides, (KAMPRATH et al., 1956; ELKINS; ENSMINGER, 1971)

Além do mecanismo de adsorção e dessorção, as propriedades físicas do solo afetam o movimento de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  no perfil (HARWARD; RIESENAUER, 1966). As propriedades físicas controlam a taxa de movimento de água no solo e, por consequência, do sulfato solúvel. A condutividade hidráulica e a porosidade do solo afetam diretamente o fluxo de massa (HILLEL, 1998), principal mecanismo pelo qual o sulfato solúvel em água se movimenta. A lixiviação é tida como a principal forma de saída de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  do sistema solo.

O cálcio é um dos elementos predominantes no complexo de troca do solo, exceto em solos extremamente ácidos, onde cede lugar para o alumínio (MALAVOLTA, 2006). O cálcio, exceto em solos altamente intemperizados e ácidos, apresenta-se na solução do solo em concentrações relativamente elevadas. Em média, a concentração de  $[\text{Ca}^{2+}]$  é cerca de dez vezes maior que a de  $[\text{K}^+]$ .

O cálcio da solução do solo está em equilíbrio dinâmico com o cálcio trocável, ou seja, com o cálcio adsorvido nos colóides orgânicos ou inorgânicos. Se a atividade do cálcio decresce em solução através da absorção pelas plantas ou da lixiviação, há um deslocamento de íons cálcio da fase sólida para a fase líquida. Por outro lado, se a atividade de cálcio na solução aumenta através da calagem ou adubação, há uma adsorção dos íons cálcio pelos colóides.

Nenhuma argila apresenta sítios seletivos de adsorção para cálcio, portanto, os íons de cálcio são igualmente adsorvidos a despeito da mineralogia do solo. Por se tratar de cátion bivalente e com pequeno raio de hidratação, o cálcio é fortemente adsorvido pelos colóides, muito mais fortemente que o magnésio, o potássio, o amônio e o sódio.

O conteúdo de cálcio no solo é função do material de origem (rocha), sendo influenciado pela sua textura, teor de matéria orgânica e pela remoção das culturas.

Teores de cálcio no solo entre 2,0 a 4,0  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  podem ser considerados como médio (MALAVOLTA, 1976).

A solução do solo é a fonte imediata de magnésio para as plantas. Exceto em solos ácidos altamente intemperizados ou em certos solos arenosos, a concentração de magnésio na solução do solo é relativamente elevada. O magnésio é adsorvido aos colóides do solo como íon bivalente positivo [ $\text{Mg}^{2+}$ ], com comportamento muito similar ao cálcio. O teor de magnésio trocável que pode ser considerado como médio é de 0,4 a 0,8  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de solo (MALAVOLTA, 1976).

Com respeito às interações entre cátions no solo, em termos de absorção pelas plantas, tem-se enfatizado mais a relação Ca/Mg. Existem recomendações técnicas para ajustar-se a relação Ca/Mg para valores entre 3 e 4, ou, que a mesma seja de no máximo 7. Todavia, muitos resultados experimentais não sustentam tais recomendações. Enfim, a relação Ca/Mg parece não ser tão crítica quanto se pensava, desde que o pH do solo esteja numa faixa adequada e não se tenha um destes dois nutrientes em valores absolutos muito reduzidos.

O magnésio trocável é representado pelos íons [ $\text{Mg}^{2+}$ ] adsorvidos nas cargas negativas dos colóides do solo por atração eletrostática, facilmente deslocados ou trocados por outros cátions da solução. Enfim, trata-se do magnésio da fase sólida capaz de prontamente ressuprir a solução do solo, à medida que as plantas absorvem este nutriente. O magnésio trocável normalmente perfaz de 2 a 20% do complexo de troca do solo. Na maioria das vezes, a saturação ideal está entre 10 e 20%. Como o magnésio é menos fortemente adsorvido que o cálcio, o mesmo apresenta raio iônico hidratado maior que o cálcio, a sua lixiviação tende a ser mais intensa que a do cálcio.

Na verdade, merece destaque o fato de que, a longo prazo, o magnésio é mais susceptível de remoção do solo do que o cálcio, tanto por lixiviação quanto por remoção pelas plantas.

Dentre os métodos empregados para estimar a concentração de sais no solo, a medida de valores da condutividade elétrica (CE) na solução do solo é o método mais prático. A CE é a medida de resistência da passagem da corrente elétrica entre os eletrodos, submetidos a uma solução onde solutos iônicos (cátions e ânions) estão



presentes. Quanto maior a quantidade de fertilizantes for aplicado ao solo, maior será a disponibilidade em solução e maior será o valor da CE.

A determinação do pH é feita para diagnosticar o potencial de hidrogênio do solo. Isto permitirá conhecer a intensidade da acidez do solo, que é dada pela acidez da solução e pela quantidade de acidez. Assim, a acidez por intensidade é aquela chamada “acidez ativa” que pode ser extraída pela água ou pela determinação do pH em solução centimolar de cloreto de cálcio. Já, a acidez por quantidade diz respeito ao ( $H^+ + Al^{3+}$ ) que se encontram nos colóides do solo, e que ao ser deslocado para solução do solo, aumentam a acidez (OSAKI, 1991).

A acidez do solo pode ser ativa (ou iônica) e potencial (ou reserva). A ativa diz respeito à parte do ( $H^+$ ) que está dissociado. Resulta de íons ( $H^+$ ) dissociados na solução do solo e que é expressa em termos de pH (OSAKI, 1991).

A acidez potencial refere-se à parte não dissociada do ( $H^+$ ). O que provoca essa acidez são os íons de ( $H^+$  e  $Al^{3+}$ ) adsorvidos nas cargas negativas dos colóides. Os constituintes principais da acidez potencial em solos ácidos são: alumínio trocável, óxidos e hidróxidos de Fe e AL, que se encontram na superfície das argilas ou nos espaços inter-laminares, fenóis e ácidos da matéria orgânica, através de seus radicais carboxila e hidroxila. A acidez ativa é um efeito da acidez potencial, isto é, a acidez potencial é a causa da acidez ativa (OSAKI, 1991).

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Caracterização e localização do estudo**

O estudo foi realizado em duas etapas: a primeira denominada Experimento I, compreendeu a calibração e uso sensores de pressão modelo MPX5100DP com aquisição de dados em datalogger modelo CR21 visando quantificar o tempo necessário para atingir o equilíbrio entre o vácuo aplicado em extratores providos de cápsulas porosas e o potencial mátrico em dois tipos de solo com diferentes umidades, enquanto que, a segunda etapa, denominada Experimento II, compreendeu a avaliação de diferentes concentrações de solução utilizada na fertirrigação e coleta da solução por

meio de cápsulas porosas submetidas a diferentes intensidades de vácuo em dois tipos de solos no momento de máxima disponibilidade de umidade e concentração atual de íons, sendo que o tempo de equilíbrio entre a aplicação do vácuo e coleta da solução foi determinado no Experimento I.

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Física do Solo e em um ambiente protegido (casa de vegetação) do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, no município de Piracicaba, SP, situada nas coordenadas geográficas de 22º 42’ de latitude sul e 47º 38’ de longitude oeste, a uma altitude de 540 m.

O trabalho foi realizado utilizando dois materiais de solo coletados na profundidade de 0,30 m da camada agricultável do perfil, o primeiro classificado como Latossolo Vermelho Amarelo com textura franco arenosa e denominado Série “Sertãozinho”, e o segundo de textura franco argilosa, classificado como Terra Roxa Estruturada e denominada Série “Luiz de Queiroz”, provenientes do campus da ESALQ.

### **2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental (Experimentos I e II)**

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) em ambos os experimentos, o primeiro em esquema fatorial 2 x 4 x 4, totalizando 32 tratamentos, com 3 repetições. Os tratamentos foram compostos por: dois solos com texturas contrastantes ( $S_1$  - Latossolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa e  $S_2$  - Terra Roxa Estruturada textura franco argilosa), quatro intensidades de vácuos aplicadas aos extratores ( $V_1$  - 50,  $V_2$  - 60,  $V_3$  - 70, e  $V_4$  - 80 kPa), e quatro níveis de umidade em base peso (100, 72, 61 e 43% no solo  $S_1$  e 100, 79, 66 e 60% no solo  $S_2$ ). Já o segundo conduzido num esquema fatorial 2 x 4 x 3, totalizando 24 tratamentos, com três repetições. Os tratamentos foram compostos pelos mesmos tipos de solos do primeiro experimento, quatro soluções (água desionizada + solução nutritiva) a concentração foi de 0, 30, 60 e 90% da recomendada para cultivo hidropônico e três intensidades de vácuos aplicadas aos extratores ( $V_1$  - 60,  $V_2$  - 70, e  $V_3$  - 80 kPa). Para os tratamentos que receberam solução nutritiva, foi utilizada a solução nas

percentagens preconizadas partindo da solução padrão recomendada para um cultivo hidropônico, proposta por Furlani et al. (1999), com os seguintes nutrientes N, P, K, Ca, Mg e S nas concentrações 202; 31,5; 193,4; 142,5; 39,4 e 52,3 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Para o preparo das soluções utilizaram-se os seguintes sais: KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KNO<sub>3</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, sendo estes dissolvidos em água desionizada (Tabela 1).

Tabela 1 – Concentração da solução padrão utilizada na fertirrigação

Íons	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P
Padrão	-----mg L <sup>-1</sup> -----					
	894,21	193,40	210,65	39,40	156,68	31,50
Padrão	-----mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----					-----mmol L <sup>-1</sup> ----
	14,42	4,95	10,51	3,24	3,26	1,02

### 2.2.3 Caracterização físico-hídrica e química dos materiais de solo

As curvas de retenção de umidade para os dois solos foram construídas simulando uma condição real de irrigação e evaporação em casa de vegetação. Para isso, utilizaram-se cinco vasos com capacidade para 12 L com orifícios na parte inferior e contendo uma camada de 1 cm de brita n° 1, recoberta com manta geotêxtil (BIDIM OP-30) e preenchidos por meio de quantificação da massa de solo por camadas a cada 5 cm e de volume conhecido, visando obter uma densidade conhecida e homogênea entre as parcelas, e dispostos em bancadas na casa de vegetação, sendo instalados tensiômetros a 0,15 m de profundidade. Os vasos foram inicialmente imersos em uma lâmina de água correspondente a 50% de sua altura, sendo o solo lentamente saturado por meio de ascensão capilar da água por orifícios na parte inferior dos vasos. Após verificada a saturação, os vasos foram cobertos com filme plástico, e postos para drenar naturalmente, até cessar o escoamento.

Após a drenagem natural dos solos, determinou-se a capacidade máxima de retenção e durante o processo de secamento foram realizadas pesagens e leituras

tensiométricas concomitantemente, sendo esse procedimento estendido até tensão próxima a 70 kPa (Figura 1). Os dados de umidade de cada solo foram relacionados com a tensão medida, sendo as equações potenciais ajustadas (Figuras 1 e 2) para uso do cálculo da lâmina de irrigação necessária.

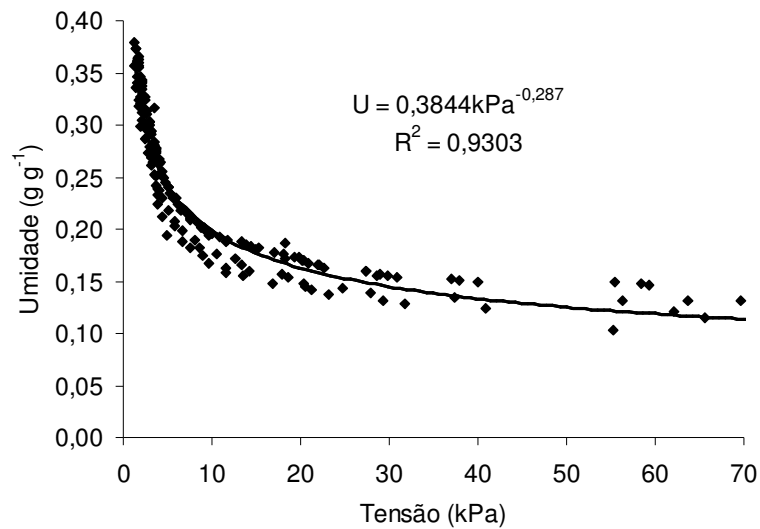


Figura 1 – Curva de retenção de água no solo Franco Arenoso

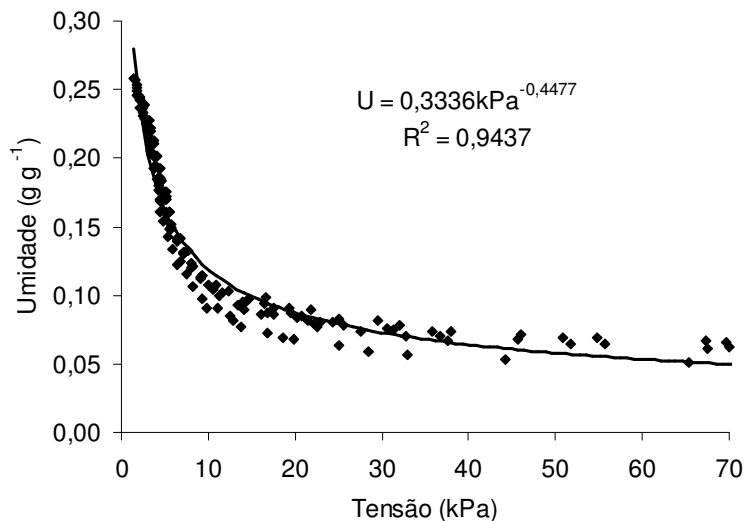


Figura 2 – Curva de retenção de água no solo Franco Argiloso

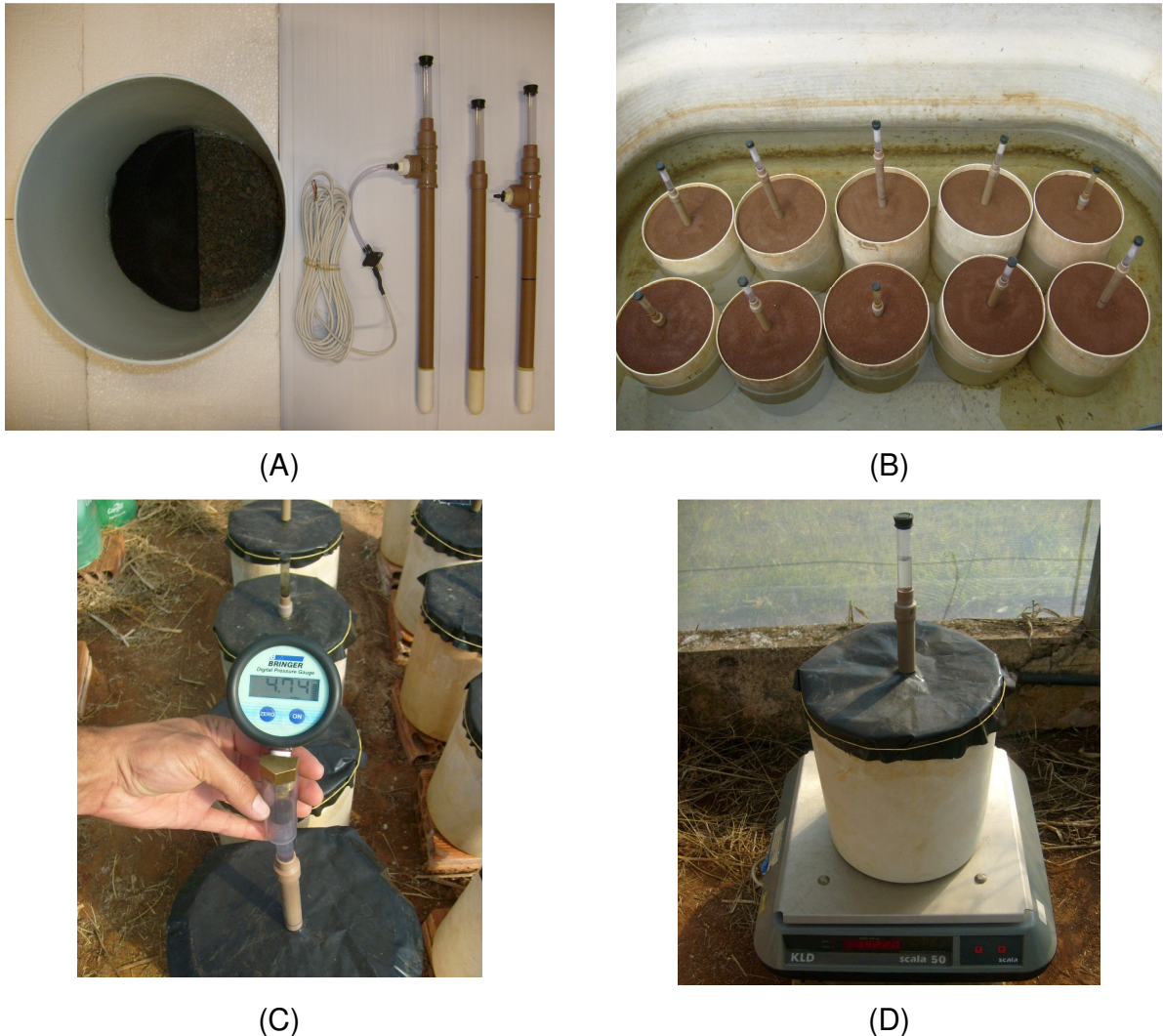


Figura 3 – Etapas para obtenção das curvas de retenção de água nos solos utilizados: montagem das parcelas (A), saturação dos solos (B), leituras tensiométricas (C) e pesagens dos vasos (D)

As propriedades físicas analisadas foram: granulometria, densidade de partículas, densidade global e porosidade seguindo metodologia recomendada pela EMBRAPA (1997). As propriedades físico-hídricas foram: capacidade máxima retenção de água e umidade residual, e estão apresentadas na Tabela 2.

Os dois solos utilizados no ensaio apresentaram classificação textural: Franco Arenoso e Franco Argiloso, visando facilitar a discussão dos resultados, ambos foram denominados como solo arenoso ( $S_1$ ) e solo argiloso ( $S_2$ ), respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica dos solos utilizados nos experimentos

Solo	Densidade		Granulometria			Classe textural
	global	partículas	Areia	Silte	Argila	
	----- (g cm <sup>-3</sup> )-----		----- (%)-----			
S <sub>1</sub>	1,26	2,65	73	8	19	Franco Arenoso
S <sub>2</sub>	1,19	2,91	44	17	39	Franco Argiloso

Solo	Umidade base peso		Porosidade			Classe textural
	CV*	Residual	Micro	Macro	Total	
	----- (%)-----		----- (%)-----			
S <sub>1</sub>	21,41	1,6	26,98	25,48	52,45	Franco Arenoso
S <sub>2</sub>	28,27	6,1	33,64	25,47	59,11	Franco Argiloso

\*Capacidade de vaso

Os materiais de solo utilizados foram caracterizados quanto às propriedades químicas (Tabela 3). Os íons trocáveis foram analisados de acordo com os métodos citados pela EMBRAPA (1997) e Raij (2001).

Tabela 3 - Caracterização química dos solos utilizados nos experimentos

Solo	pH	M.O*	S	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	(CaCl <sub>2</sub> )	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----									---%---
S <sub>1</sub>	4,8	9,0	5	3	0,4	11	7	1	16	18,4	34,4	53	5
S <sub>2</sub>	5,2	22	6	5	5,0	24	11	0	25	40	65	62	0

\* Matéria orgânica (S<sub>1</sub>) Solo franco arenoso e (S<sub>2</sub>) Solo franco argiloso

Para determinação da concentração dos íons solúveis (Tabela 4) foram confeccionadas pastas na umidade de saturação, das quais foram extraídas as soluções por intermédio de sucção, de acordo com a metodologia proposta por Richards (1949).

Tabela 4 - Caracterização química do extrato da pasta saturada dos solos utilizados nos experimentos

Solo	pH (pasta)	CE dS m <sup>-1</sup>	-----mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----					
			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
S <sub>1</sub>	5,87	0,34	1,48	0,13	0,66	0,75	0,48	0,41
S <sub>2</sub>	6,13	0,36	2,93	0,50	0,91	0,51	0,82	0,25

(S<sub>1</sub>) Solo Franco Arenoso e (S<sub>2</sub>) Solo Franco Argiloso

#### 2.2.4 Calibrações: transdutores de pressão, condutância e borbulhamento das cápsulas e teste de equilíbrio iônico

Foram utilizados transdutores de pressão modelo MPX5100DP piezoresistivos confeccionados em silício monolítico e processamento bipolar para fornecer uma precisão de alto nível do sinal de saída, funcionando numa faixa de 0 a 100 kPa e com autocompensação de temperatura na faixa de 0 a 85°C. Esses foram calibrados visando monitorar a variação instantânea do vácuo no interior do extrator em função do tempo, com a finalidade de encontrar o tempo real de equilíbrio entre a tensão e o potencial de água no solo, à medida que a solução entra na cápsula os potenciais tendem a se igualar.

Inicialmente, em laboratório, procedeu-se a calibração de 24 transdutores os quais foram acoplados em orifícios em um tubo de pvc com diâmetro de ½”, e em uma das extremidades conectou-se uma bomba de vácuo e na outra, um manômetro de mercúrio, visando quantificar com precisão o vácuo aplicado. Em seguida conectou-se o circuito de pinos referentes a alimentação e transmissão de dados a um datalogger modelo CR21. Com o sistema montado, procedeu-se as aplicações de vácuo, variando a cada 76 mmHg de maneira crescente e depois decrescente com três repetições, com a finalidade de verificar o efeito da histerese, sendo a faixa testada de 0 a 608 mmHg, equivalendo de 0 a 80 kPa. Posteriormente os dados foram analisados e ajustados (Figura 4) para obtenção da equação a ser utilizada nos cálculos de tensão nos extratores do Experimento I. Os detalhes e equipamentos utilizados na calibração podem ser vistos na Figura 5.

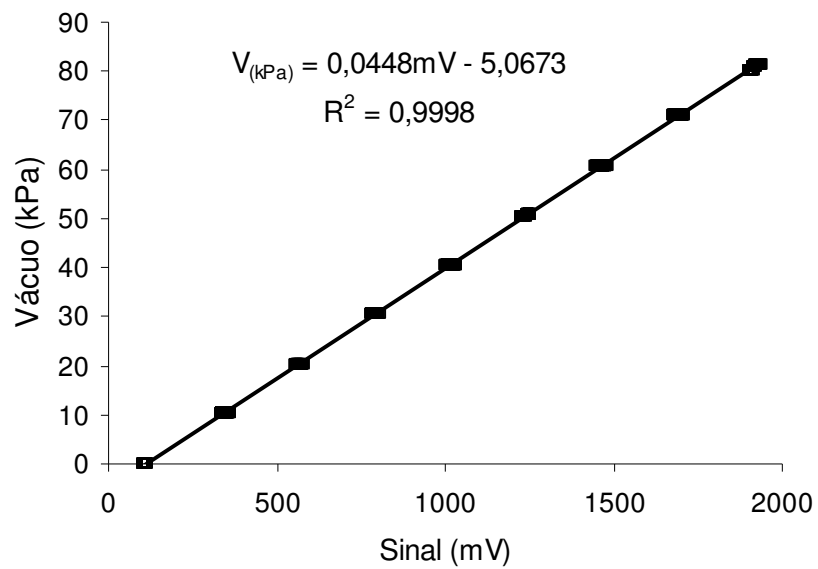


Figura 4 – Curva de calibração dos transdutores de pressão modelo MPX5100DP

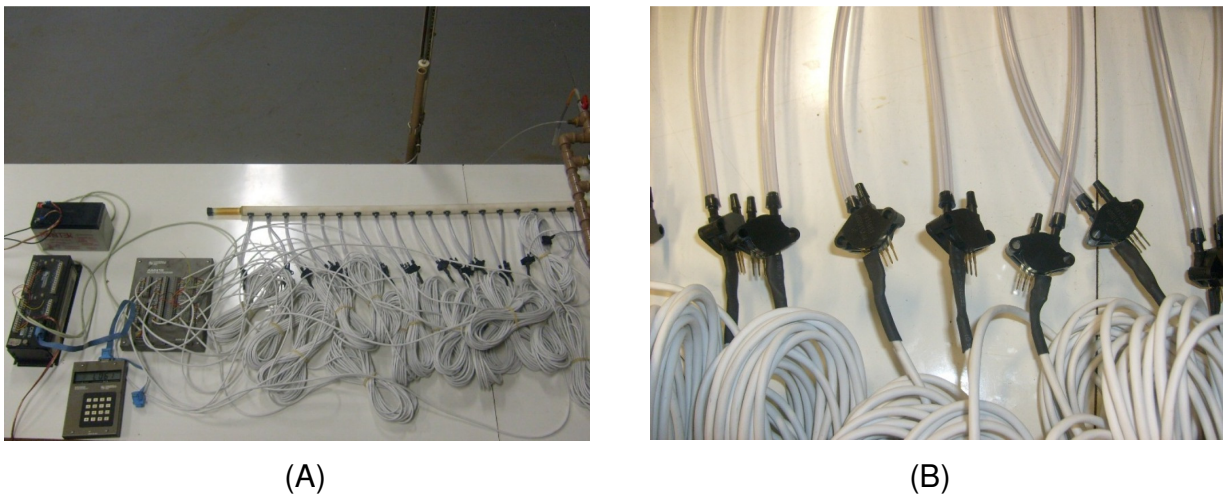


Figura 5 – Calibração dos transdutores de pressão MPX5100DP: transdutores conectados ao sistema de aquisição de dados em datalogger CR21 (A) e detalhes das conexões (B)

Os extratores foram construídos com tubos de PVC, com diâmetro externo de 20 mm e comprimento de 30 cm. Numa das extremidades foi instalado uma cápsula de cerâmica porosa com dimensões de 20 mm de diâmetro externo e 6 cm de comprimento e na outra extremidade foi conectado um tubo de PVC transparente e neste foi acoplado uma borracha de silicone especial de vedação (Figura 1A).



Realizaram-se testes de condutância hidráulica e de pressão de borbulhamento nas cápsulas porosas, pelo método da carga decrescente (LIBARDI, 2000). As cápsulas porosas ficaram durante 24 horas submersas em água desionizada para completa saturação, depois foram conectadas a uma estrutura, que consta de um tubo transparente contendo água a certa altura e preso a um suporte (Figura 6A). Foi aplicada uma carga hidráulica preestabelecida e verificado o tempo para variar até outra altura (H), também preestabelecida, calculando-se enfim, a condutância hidráulica pela equação (1).

$$k = \frac{a \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{\Delta t} \quad (1)$$

em que:

k - condutância hidráulica,  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ;

a - área da seção transversal da mangueira,  $\text{cm}^2$ ;

$H_1$  e  $H_2$  - carga hidráulica (cmca) na cápsula porosa;

$\Delta t$  - intervalo de tempo (s), que o menisco de água leva para ir de  $H_1$  para  $H_2$ .

Posteriormente realizou-se teste de pressão de borbulhamento (Figura 6B) por imersão das cápsulas em água: aumentou-se lentamente a pressão até 100 kPa, sendo essa margem garantida para uso do material no estudo em questão. A pressão na qual ocorre o início do borbulhamento é a chamada pressão de borbulhamento.

Estes testes foram realizados com o objetivo de uniformizar as cápsulas por tratamento com base na condutância, eliminar as que apresentassem pressão de borbulhamento inferior a 100 kPa, a desejada era de 80 kPa, por medida de segurança utilizou-se 20% de margem de confiança, visando ainda verificar vazamento na conexão da cápsula com o tubo de PVC, com objetivo de que o tempo de resposta dos extratores para cada tratamento não fosse interferir nos fatores estudados.

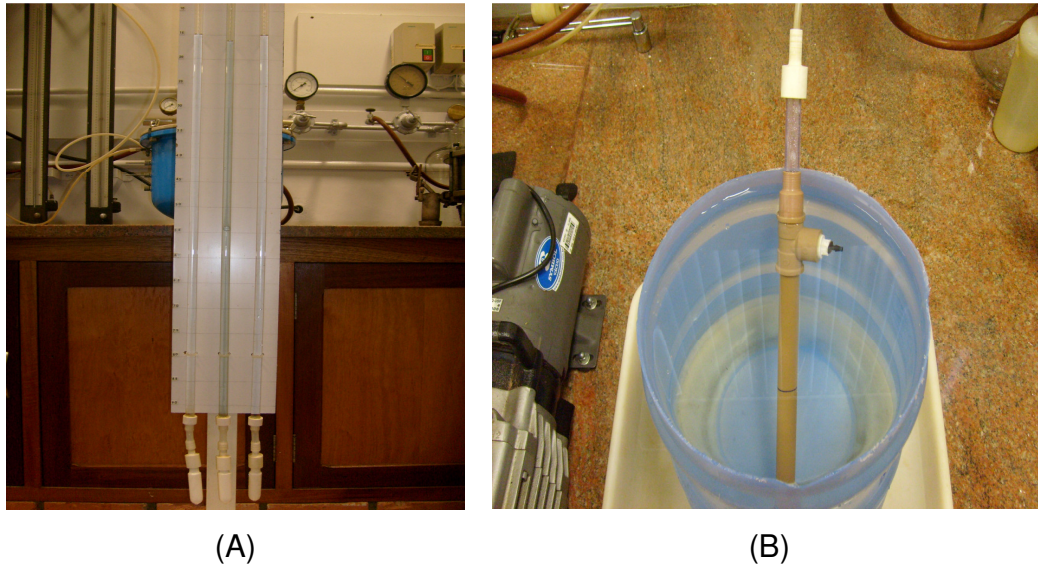


Figura 6 – Testes de condutância (A) e de borbulhamento (B) para a caracterização e padronização das cápsulas porosas

Realizou-se um teste visando obter o tempo necessário entre o evento da fertirrigação e a aplicação do vácuo. Utilizaram-se três repetições para cada solo, sendo os vasos preenchidos de maneira similar ao descrito anteriormente; em seguida realizou-se aplicação de solução 30% da concentração padrão (FURLANI et al., 1999), até atingir capacidade de vaso e protegendo a superfície do solo com filme plástico para evitar evaporação. As coletas de solução foram iniciadas imediatamente ao término da fertirrigação e em intervalos de 6 horas, em seguida as soluções foram submetidas a análises químicas para verificar o momento em que suas concentrações iônicas atingiam certo equilíbrio no tempo. Com isso determinou-se o momento entre a fertirrigação e aplicação do vácuo a serem utilizados nos Experimentos I e II (Figuras 7 e 8).

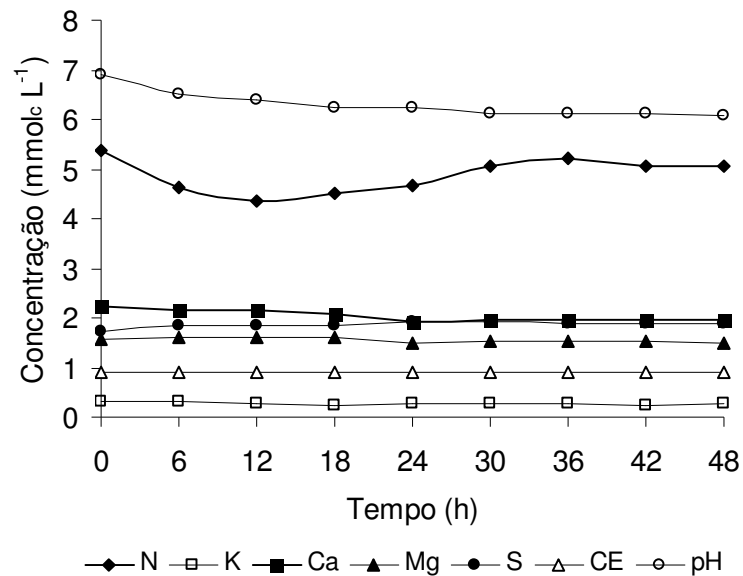


Figura 7 – Comportamento da concentração iônica da solução coletada via extratores de cápsula porosa em solo Franco Arenoso em função do tempo

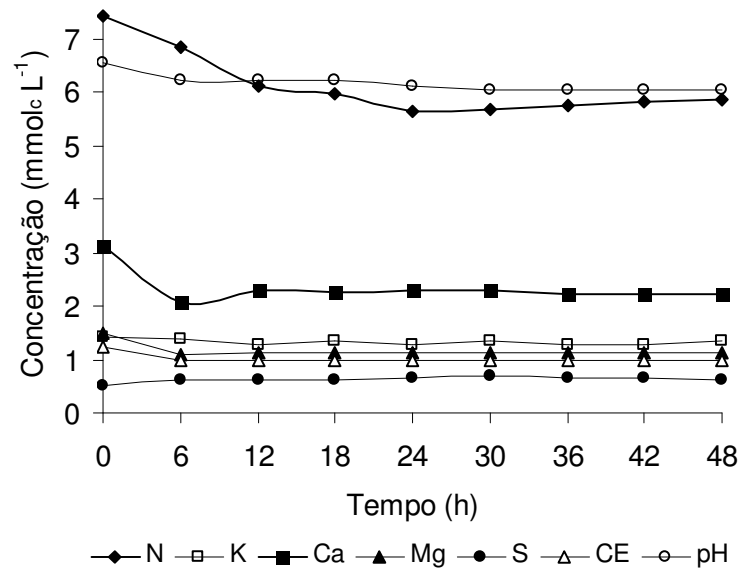


Figura 8 – Comportamento da concentração iônica da solução coletada via extratores de cápsula porosa em solo Franco Argiloso em função do tempo

Para a aplicação do vácuo nos dois experimentos, utilizou-se o tempo de 30 horas entre o evento da fertirrigação e aplicação dos vácuos nos extratores; esse tempo foi determinado com base no teste de equilíbrio iônico (Figuras 7 e 8).

### **2.2.5 Comparação das metodologias de extração de solução**

Foi realizada com a finalidade de avaliar o uso de extratores providos de cápsulas porosas na determinação da concentração iônica, condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico da solução do solo, e comparar com os resultados dos mesmos parâmetros obtidos na solução proveniente da pasta saturada. Essa avaliação comparativa foi realizada para todas as parcelas do Experimento II.

Imediatamente antes de cada coleta da solução nos extratores, retirava-se uma amostra de solo e acondicionando-as em recipientes de alumínio e lacrada para não haver perda de umidade; logo depois eram pesadas e postas para secar em estufa a 105°C até peso constante; com isso determina-se a umidade atual em base peso. Procedimento similar foi feito para determinação da umidade da pasta saturada.

Após a coleta do extrato obtido com o uso dos extratores com cápsulas porosas, foi realizada uma amostragem composta de solo em vários pontos circundando o extrator e equidistantes em relação a parede do vaso e o extrator, visando obter uma amostra homogênea do solo, proporcionando uma boa representatividade em cada unidade experimental, para serem submetidas ao preparo da pasta saturada (Figura 9).

A pasta saturada para determinação dos parâmetros concentração iônica, condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico, foi preparada utilizando-se 250 g de terra fina seca ar e adicionando-se gradualmente água desionizada até o ponto de saturação, ou seja, quando o material apresentasse superfície brilhosa, movimento lento em posição inclinada e fácil deslizamento da pasta sobre a espátula. Após o preparo da pasta, as amostras foram cobertas para evitar evaporação e contaminação, em seguida colocadas em repouso por 20 horas e posteriormente, foram extraídas as soluções por meio de sucção semelhante a aplicada ao extrator na respectiva parcela onde coletou-se o solo, conforme a metodologia proposta por Richards (1954). Num momento posterior foi determinada a CEes e a concentração de íons, sendo que o potencial hidrogeniônico foi determinado inserindo o eletrodo diretamente na pasta, visando determiná-lo de forma mais similar as condições reais de campo.

Para estimativa dos parâmetros avaliados, foi realizada uma correção para umidade da pasta saturada, conforme a equação (2).

$$C_{\text{estimada cp}} = \frac{C_{\text{cp}} \cdot U_{\text{cp}}}{U_{\text{ps}}} \quad (2)$$

em que:

$C_{\text{estimada cp}}$  - condutividade elétrica ou concentração de íons no extrato de saturação, estimada a partir dos valores medidos na solução do solo obtida com extrator de cápsula,  $\text{dS m}^{-1}$  ou  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ;

$C_{\text{cp}}$  - condutividade elétrica ou concentração de íons na solução do solo, obtida com extrator de cápsula porosa,  $\text{dS m}^{-1}$  ou  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ;

$U_{\text{cp}}$  - umidade do solo no momento da retirada da solução do extrator de cápsula porosa,  $\text{g g}^{-1}$ ,

$U_{\text{ps}}$  - umidade do solo na pasta saturada,  $\text{g g}^{-1}$ .

Os resultados encontrados foram correlacionados com os dados estimados para pasta saturada, utilizando para os cálculos os resultados obtidos da solução coletada via cápsulas.

A partir dos resultados obtidos na solução obtida pelo método da pasta saturada foram ajustadas curvas relacionando os valores da condutividade elétrica, de pH e da concentração dos íons na solução coletada através dos extratores providos de cápsulas porosas, com os valores encontrados na solução obtida pelo método da pasta saturada (RICHARDS, 1954).

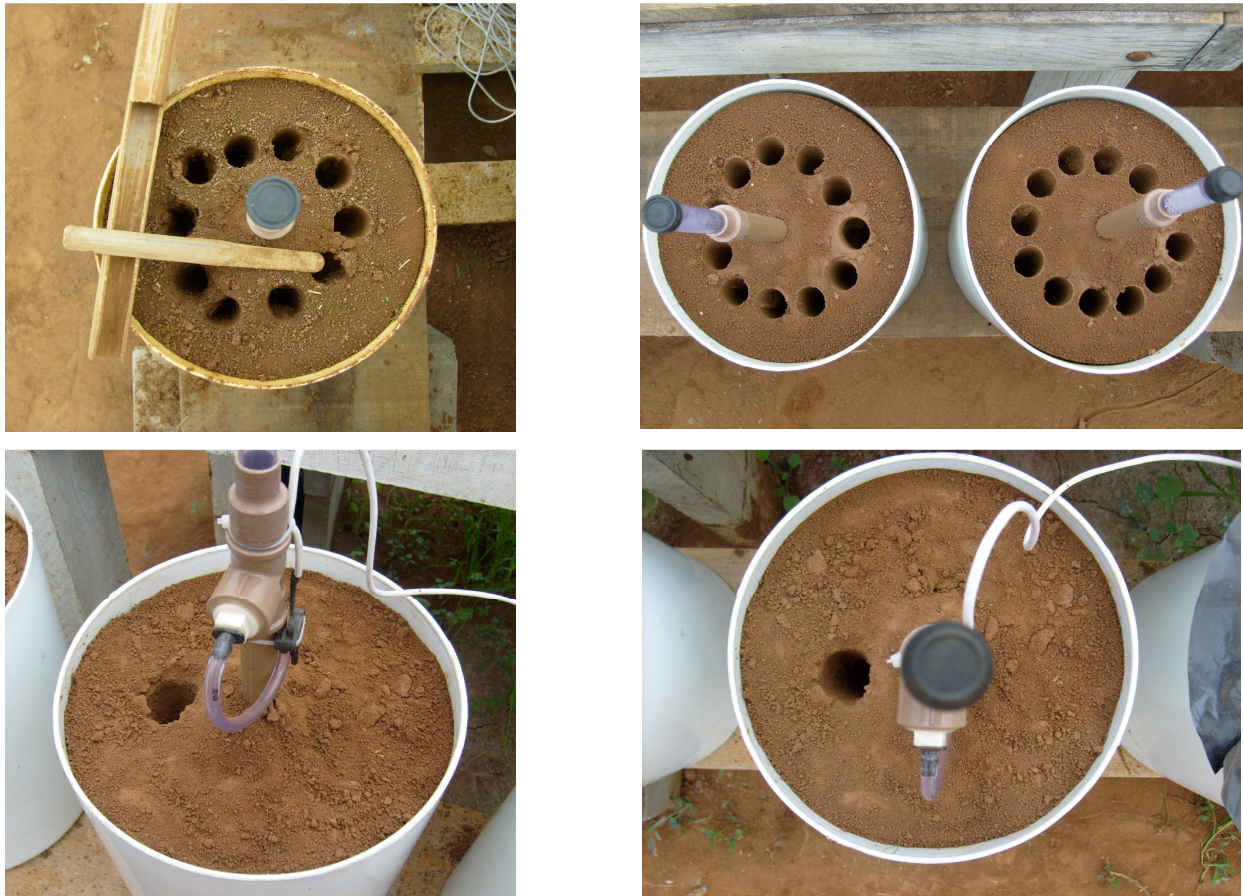


Figura 9 – Procedimento de coleta de solo para confecção da pasta saturada e determinação da umidade gravimétrica

### 2.2.6 Condução dos Experimentos I e II

O Experimento I foi realizado em vasos plásticos com capacidade para 12 L, preenchidos com os dois tipos de solo, conforme descrito anteriormente, semelhante ao sistema utilizado para determinação da caracterização hídrica. Simultaneamente foi instalado em cada vaso, um extrator de cápsula porosa conectado ao mesmo um transdutor de pressão (Figura 10C), instalado a uma profundidade de 0,15 m, da parte mediana da cápsula a superfície do solo.

A aquisição de dados se deu por meio de datalogger CR21, com leituras a cada cinco segundos e uma média a cada dois minutos. A aquisição do sinal foi obtido em milivolt (mV); posteriormente essas leituras eram transformadas em tensão por meio

das equações de calibrações geradas anteriormente, proveniente da calibração dos transdutores. Os sensores juntamente com a parte superior do extrator foram protegidos com papel alumínio visando reduzir o efeito da temperatura na expansão do gases no interior do extrator, e conseqüentemente, evitando variações bruscas de tensão (Figura 10D).

A fertirrigação foi realizada utilizando-se 30% da concentração padrão proposta por Furlani et al. (1999). Realizou-se uma única aplicação de solução nas unidades experimentais, as mesmas foram protegidas com filme plástico (Figura 10B) até o término da primeira coleta, em seguida a proteção foi retirada e em intervalos distintos para cada solo, foram realizadas as coletas para as demais umidades, sendo essas, determinadas por gravimetria, com secagem em estufa a 105°C até peso constante. Os níveis de umidade foram obtidos por secagem natural do solo, processos de secagem proporcionam maior teor de água disponível e uma reduzida presença do fenômeno da histerese (COSTA et al., 2008). A saturação do solo por fluxo ascendente da água por meio de imersão do vaso, assegurando que todos os poros foram saturados, já o molhamento por aplicação superficial localizada, há riscos de iniciar o processo de drenagem, sem que todos os poros estejam saturados, devido o possível fluxo preferencial em alguns pontos do vaso.

O Experimento II teve sua montagem semelhante ao primeiro, exceto por não apresentar conectados os transdutores de pressão, sendo a umidade do solo contido nos vasos, elevada à máxima capacidade de retenção, utilizando-se solução de concentrações de acordo com os tratamentos. As soluções foram aplicadas de forma semelhante ao Experimento I, no entanto, apresentando quatro níveis de concentração de solução aplicada, de 0, 30, 60 e 90% da solução padrão (Tabela 1) proposta por Furlani et al. (1999).



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 10 – Sensores conectados aos extratores instalados nas unidades experimentais (A), proteção dos solos com filme plástico (B), detalhe da montagem do sensor conectado ao extrator instalado em solo fertirrigado (C) e proteção dos extratores com papel alumínio e sistema de aquisição de dados (D)

### 2.2.7 Fertirrigação, extração e análises da solução

Para ambos os experimentos, o volume de solução foi calculado com base na capacidade de vaso para ambos os solos, e aplicada por meio de microtubos conectados na parte inferior de vasos (Figuras 10A e 10C) que continham o volume de água preestabelecido, sendo a taxa de aplicação variável devido a coluna de água no vaso apresentar variação no tempo; no entanto a vazão variava de 1,1 a 0,4 L h<sup>-1</sup>,



artifício esse usado para evitar movimento preferencial da água, tendo em vista que a medida que os poros do solo fossem sendo preenchidos, o fluxo mostrar-se-ia preferencial as paredes do vaso. Visou-se assim com isso uma distribuição homogênea da umidade.

A aplicação das tensões de sucção foi realizada 30 horas após a fertirrigação com auxílio de uma bomba à vácuo, sendo que este tempo foi determinado por meio do teste de equilíbrio iônico (Figuras 7 e 8), e o momento da coleta da solução do solo no Experimento I, foi determinado no instante em que o sinal do transdutor permanecia constante, ou seja, entendia-se que neste momento não estava mais ocorrendo fluxo de solução para o interior da cápsula. Vale salientar que para cada nível do fator umidade no primeiro experimento, obteve-se tempos diferentes entre a aplicação do vácuo e o momento da coleta, tendo em vista os diferentes potenciais de água no solo.

Já para o segundo experimento utilizou-se o tempo encontrado na máxima umidade no primeiro experimento, já que no segundo ensaio não houve diferentes níveis de umidade.

Para a coleta da solução utilizou-se uma seringa acoplada a um tubo de silicone flexível; em seguida as amostras de solução foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados e transportados para o laboratório, onde foram efetuadas análises de condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, nitrato, potássio, cálcio, magnésio, sulfato e fósforo das soluções. As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Química do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP.

Os procedimentos e a metodologia utilizada nas determinações analíticas foram as seguintes: para determinação de potássio utilizou-se fotometria de chama; o nitrato e sulfato foram quantificados efetuando-se leituras de absorvância por meio de espectrofotometria ultravioleta em comprimento de onda de 410 e 420 nm (nanômetros), respectivamente, adotando-se uma técnica descrita por Yang et al. (1998), fundamentada no método colorimétrico; realizaram-se as análises de cálcio e magnésio em laboratório pertencente ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), onde foram quantificados por meio de espectrofotometria de absorção atômica, em absorvância e com comprimento de onda de 422 e 286 nm, respectivamente; o

fósforo foi quantificado por colorimetria pelo método da vitamina C, efetuando-se leituras de absorvância em comprimento de onda 650 nm, sendo que as amostras para determinação de fósforo remanescente foram centrifugadas e filtradas antes das leituras; as determinações da condutividade elétrica (CE) e do potencial hidrogeniônico (pH), foram realizadas por meio de condutivímetro e potenciômetro de bancada microprocessados, respectivamente, ambos com compensação automática de temperatura.

### **2.2.8 Parâmetros avaliados**

Os parâmetros analisados tanto na solução obtida por meio dos extratores de cápsula porosa, quanto a obtida por meio da pasta saturada, em ambos os solos, foram: concentração de nitrato  $[\text{NO}_3^-]$ , potássio  $[\text{K}^+]$ , cálcio  $[\text{Ca}^{2+}]$ , magnésio  $[\text{Mg}^{2+}]$ , sulfato  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , fósforo  $[\text{PO}_4^{3-}]$ , condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), volume de solução coletada via extratores e tempo de equilíbrio entre a tensão aplicada nos extratores e o potencial de água no solo.

### **2.1.9 Análise estatística**

Com a finalidade de realizar a análise de variância, inicialmente foi verificado se foram satisfeitas as suposições: os efeitos principais serem aditivos, erros independentes e distribuídos normalmente e variâncias homogêneas. Os parâmetros avaliados foram submetidos ao teste de normalidade, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, para verificação da ausência de normalidade, seguido de transformações caso fossem necessárias.

As variáveis foram analisadas estatisticamente pelo teste de F, desdobrando as análises sempre que a interação foi significativa. O fator quantitativo relativo aos níveis de umidade, concentração da solução usada na fertirrigação e o vácuo foram analisados estatisticamente por meio de regressão, visando o ajuste de equações a fim de correlacionar a concentração de íons e a condutividade elétrica da solução coletada

através dos extratores, com os fatores estudados, bem como com a solução obtida na pasta saturada.

## **2.3 Resultados e Discussão**

### **2.3.1 Resultados da calibração das cápsulas porosas e dos transdutores de pressão**

Os transdutores utilizados foram calibrados e ajustou-se um modelo linear com a seguinte equação:  $V_{(kPa)} = 0,0448mV - 5,0673$  com  $R^2 = 0,9998$ , sendo o sinal emitido em milivolt (mV) e a variável resposta em Vácuo (kPa), apresentando valor médio aproximado de 113 mV referente ao sistema sem tensão, ou seja, no momento zero de vácuo (Figura 4). Verificou-se ainda uma repetibilidade de 99% e erro máximo, médio e mínimo de 0,86, 0,039 e 0,0014 kPa, respectivamente.

Os valores de condutância para as cápsulas novas variaram de 0,028 a 0,039  $mm^2 s^{-1}$ , apresentando uma média de 0,034  $mm^2 s^{-1}$  e um coeficiente de variação de 4,5%, valores esses bastante satisfatórios e superiores ao padrão de 0,003  $mm^2 s^{-1}$ , recomendado por Cassel e Klute (1986), além de não apresentar borbulhamento em pressão de 100 kPa.

### **2.3.2 Resultados do teste de equilíbrio iônico**

A concentração iônica da solução em ambos os solos, apresenta uma variação significativa no tempo, principalmente nas primeiras 30 horas após o evento da fertirrigação e, a partir deste tempo as concentrações iônicas da solução tendem a estabilizar-se (Figuras 7 e 8). Nas primeiras horas, todos os íons mostraram elevada oscilação de concentração na solução em ambos os solos, como descrito por Chaves et al. (1991), esta dinâmica se deve aos elementos que se encontram dissolvidos e são afetados pelas cinéticas de várias reações, como o equilíbrio entre ácido e base,

complexação iônica, precipitação e dissolução de sólidos, oxidação, redução e troca iônicas.

O nitrato, por ser um íon de elevada dinâmica e mobilidade, apresentou uma maior instabilidade no tempo para os dois solos; todos os íons tiveram suas concentrações reduzidas com o transcorrer do tempo, exceto o sulfato que aumentou a concentração com o tempo, mostrando que a capacidade de adsorção aniônica é bem mais estável em ambos os solos (Figuras 7 e 8).

### **2.3.3 Experimento I – Características químicas da solução do solo**

Os valores de umidade foram avaliados em base peso e em intervalos de 10, 11 e 15 dias, que corresponderam a 100, 72, 61 e 43% para o solo arenoso e 100, 79, 66 e 60% para o solo argiloso. Cabe salientar que essa variação de umidade foi obtida por secagem natural por evaporação da água retida no solo, visto que não continha nenhum cultivo.

De acordo com a análise de variância, verifica-se que todos os parâmetros químicos avaliados na solução coletada em solo arenoso dentro dos níveis dos fatores umidade e vácuo, foram influenciados significativamente ao nível de 1% de probabilidade, exceto as variáveis  $[K^+]$  e  $[NO_3^-]$  dentro dos fatores umidade e vácuo, respectivamente. Observa-se ainda, significância ( $p < 0,05$ ) para as variáveis  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  dentro do fator vácuo, sendo que não verificou-se interação entre os fatores estudados. Quanto à precisão do experimento, constata-se uma ótima precisão para as variáveis cálcio e magnésio, e regular para as demais (Tabela 5).

Tabela 5 - Resumo da análise da variância para concentração de  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$  e  $[\text{SO}_4^{2-}]$  na solução coletada em solo Franco Arenoso por meio de extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e umidades no solo

Fonte de variação	GL	-----Quadrados médios-----				
		$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$
Umidade (U)	3	79,20**	0,004 <sup>ns</sup>	6,090**	3,600**	0,986**
Vácuo (V)	3	0,65 <sup>ns</sup>	0,024**	0,580*	0,153*	0,775**
U x V	9	0,41 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,103 <sup>ns</sup>	0,065 <sup>ns</sup>	0,020 <sup>ns</sup>
Resíduo	32	0,67	0,003	0,134	0,046	0,015
CV(%)		12,67	25,65	9,77	8,65	20,11
Média geral		6,4	0,22	3,75	2,47	0,60

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Os valores médios referentes à concentração dos íons na solução, foram afetados significativamente ( $p < 0,01$ ), no entanto, a variável concentração de cálcio dentro do fator umidade, apresentou efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade. Sendo que para os tratamentos do fator vácuo, bem como a interação deste com o fator umidade, não apresentaram efeito significativo para as variáveis estudadas (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo da análise da variância para concentração de  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ , e  $[\text{SO}_4^{2-}]$  na solução coletada no solo Franco Argiloso por meio de extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e umidades no solo

Fonte de variação	GL	-----Quadrados médios-----				
		$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$
Umidade (U)	3	86,218**	1,014**	3,778*	2,480**	0,331**
Vácuo (V)	3	03,812 <sup>ns</sup>	0,053 <sup>ns</sup>	1,113 <sup>ns</sup>	0,226 <sup>ns</sup>	0,010 <sup>ns</sup>
U x V	9	0,784 <sup>ns</sup>	0,028 <sup>ns</sup>	0,197 <sup>ns</sup>	0,032 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>
Resíduo	32	3,691	0,037	1,090*	0,224	0,006
CV(%)		22,24	11,94	20,78	20,31	24,25
Média geral		8,62	1,61	5,02	2,33	0,32

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Observa-se que a média geral das concentrações dos íons foram superiores em relação às quantidades aplicadas na fertirrigação (Tabela 1), fenômeno ocorrido, provavelmente devido ao teor de íons passíveis a solubilização já contidos naturalmente no solo (Tabelas 3 e 4).

Cabe ressaltar que ambos os solos foram fertirrigados até atingir a capacidade de vaso com solução com 30% da concentração padrão (Tabela 1).

Os resultados da concentração de nitrato e as respectivas equações de ajuste em função da umidade, e intensidade de vácuo aplicado nos extratores instalados em solo arenoso ( $S_1$ ) e solo argiloso ( $S_2$ ) para as condições estudadas são apresentadas na Figura 11.

A Figura 11A mostra a correlação entre a concentração de  $[NO_3^-]$  determinada na solução do solo e a umidade para ambos os solos, apresentando-se significativa ao nível de 1% de probabilidade. A concentração de nitrato na solução do solo apresentou ajuste quadrático em função da variação da umidade, com valores de coeficientes de determinação de 0,72 e 0,96 para os solos arenoso e argiloso, respectivamente.

A concentração de nitrato mostrou-se sempre inferior no solo arenoso, devido ao fato do teor inicial de nitrato já contido no solo arenoso antes da aplicação dos tratamentos, mostrar-se inferior ao do solo argiloso (Tabelas 3 e 4).

Na máxima umidade, as concentrações ainda eram estáveis, tendo em vista, a recente fertirrigação; ou seja, a primeira coleta foi realizada 30 horas depois do evento da fertirrigação, tempo necessário para distribuição de umidade e equilíbrio iônico (Figuras 7 e 8) na região próximo a cápsula porosa. Houve uma redução na concentração de nitrato de 4,0 e 5,5%, quando a umidade decresceu da máxima para 72 e 79% no solo arenoso e argiloso, respectivamente; esse decréscimo pode ser atribuído a adsorção deste íon nos colóides do solo e/ou sua mobilidade para regiões abaixo da esfera de influência da cápsula.

De acordo com Black e Waring (1979) a adsorção é causada pela atração eletrostática entre o nitrato e os sítios positivamente carregados dos materiais. A retenção do nitrato está relacionada às propriedades físicas e químicas dos solos, tais como pH, matéria orgânica, superfície de adsorção e concentração eletrolítica.

Posteriormente a concentração volta a aumentar com a redução da umidade nos dois materiais de solo, justificando assim o comportamento de ajuste quadrático (Figura 11A). Tendo em vista, que os sítios de adsorção tenham sido preenchidos, logo o teor de água foi reduzido e os íons permaneceram solúveis, conseqüentemente a concentração de nitrato aumentou. O incremento na concentração de nitrato na solução foi de 89,5 e 76,5% entre os níveis extremos de umidades para o solo arenoso e argiloso, respectivamente. Sendo assim, foi possível verificar uma maior capacidade de adsorção e de disponibilidade no material argiloso, mesmo quando corrigidos para uma mesma umidade em comparação com o solo arenoso.

De acordo com exposto na Figura 11B, verifica-se que a concentração de nitrato não foi afetada por nenhum nível do fator vácuo em nenhum dos solos estudados. Apresentando médias de 6,44 e 8,62 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de concentração de nitrato para o solo arenoso e argiloso, respectivamente.

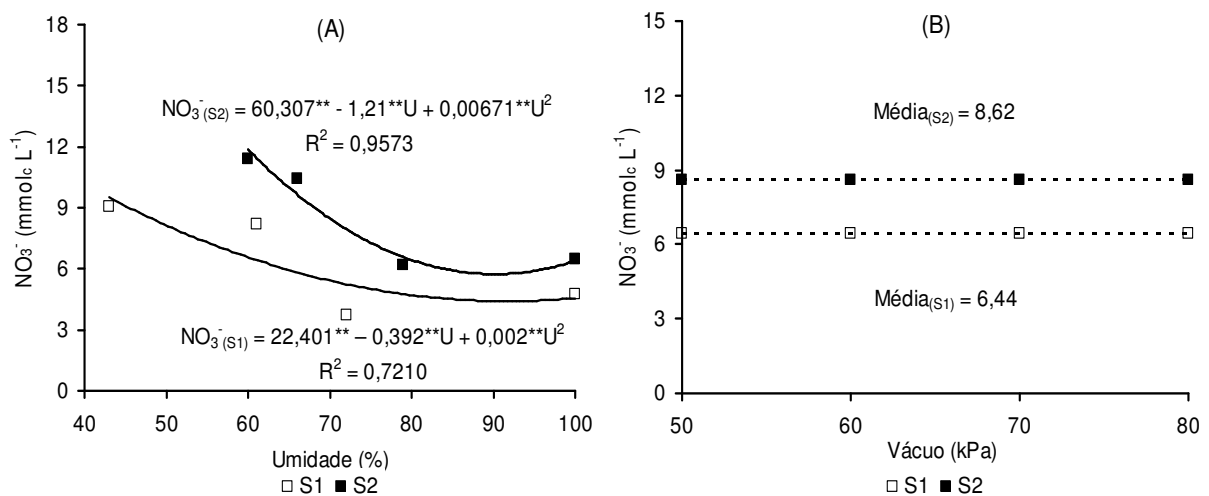


Figura 11 – Concentração de nitrato [ $\text{NO}_3^-$ ] na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades no solo (A) e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I

Na figura 12 são apresentados diagramas de dispersão da concentração de potássio [ $\text{K}^+$ ] para os dois solos estudados em função da variação de umidade e intensidade de aplicação de vácuo em extratores de cápsulas porosas. As equações de

ajuste para a concentração de potássio em função da umidade foram ajustadas linearmente ( $p < 0,01$ ) e crescente com a redução da umidade no solo  $S_2$  e com  $R^2$  igual a 0,9262 (Figura 12A). Para o solo argiloso a concentração obtida foi bem próxima à aplicada ( $1,49 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ); com valores variando de 1,27 a  $1,85 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  para a umidade de 100 e 60%, respectivamente. Verifica-se que a concentração do potássio comporta-se inversamente proporcional em relação à umidade; para esse caso observa-se uma relação entre as variações máximas de concentração/umidade de 1,14, ou seja, um aumento de 14% na concentração quando ocorre um decréscimo de 40% na umidade.

Já para o solo arenoso ( $S_1$ ) não houve ajuste significativo, ou seja, o decréscimo da umidade não afetou a concentração de potássio na solução, sendo que a concentração média em função da redução da umidade foi de  $0,22 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Esse comportamento pode ser devido ao fato de que a solução contendo  $1,49 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  aplicada via fertirrigação no solo  $S_1$  não tenha sido suficiente para saturar os sítios de adsorção e remanescer concentração para que houvesse influência significativa com a aplicação dos tratamentos, visto que o solo  $S_1$  apresentava teor inicial de potássio inferior em relação ao solo  $S_2$ , como pode ser visto nas Tabelas 3 e 4.

Avaliando o fator vácuo (Figura 12B), verifica-se um ajuste linear ( $p < 0,01$ ) e decrescente em função do aumento da intensidade de vácuo para ambos os solos, apresentando uma variação entre níveis extremos do fator vácuo de 0,09 e  $0,12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  nos solos  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente.

Esse resultado pode ser devido ao fato das soluções terem sido coletadas nas mesmas unidades experimentais quando aplicaram-se os tratamentos do fator umidade, mas permanecendo a aplicação da mesma intensidade de vácuo entre os diferentes níveis de umidades. Com base nisso, a tensão de 80 kPa associada à elevada disponibilidade de água no maior nível de umidade, proporcionou uma maior extração de potássio, com isso reduzindo a disponibilidade deste íon quando aplicou-se a mesma tensão para os demais níveis do fator umidade nas mesmas parcelas, assim resultando em uma baixa disponibilidade do íon na zona de captação de solução pela cápsula, devido a baixa redistribuição e elevada adsorção do potássio.



Conseqüentemente houve uma redução nos valores médios do íon de potássio para todas as umidades dentro dos níveis crescentes de vácuo para os dois solos estudados (Figura 12B).

Para os maiores vácuos, houve uma maior extração da solução contida nos microporos, na qual se observou menor concentração do íon potássio. Resultados semelhantes foram encontrados por Gloaguen et al. (2009), que verificaram que água gravitacional contida nos macroporos drenáveis tem maior concentração iônica de  $[K^+]$  que a água capilar.

Outro fator em questão, é que a concentração da solução extraída foi bem inferior em ambos os solos em relação à aplicada, que foi de  $1,49 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Logo essa concentração pode não ter sido suficiente para se deslocar até a zona de extração da cápsula, apresentando uma concentração média extraída de  $0,22$  e  $1,6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  para o solo arenoso e argiloso, respectivamente.

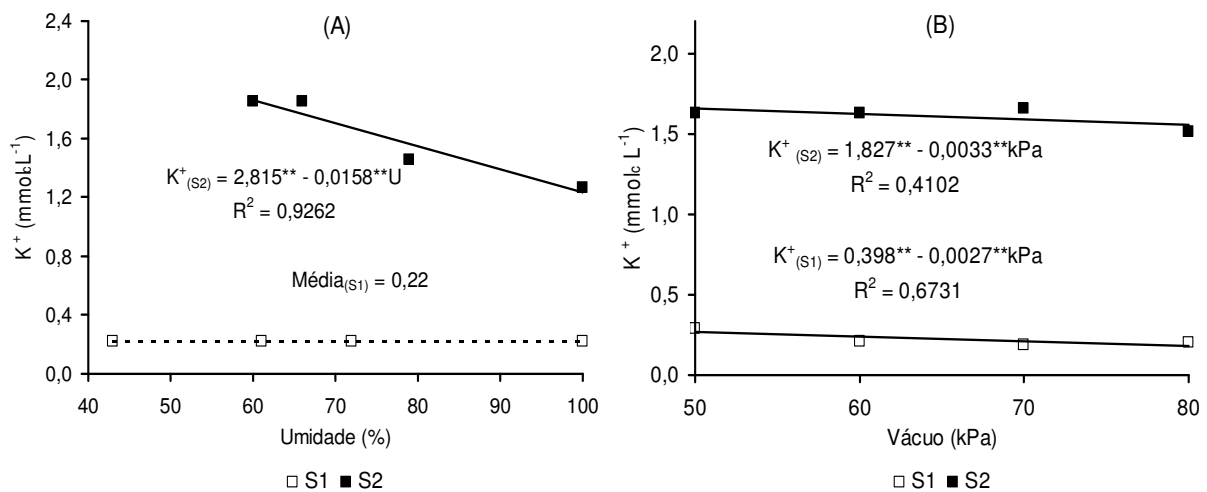


Figura 12 – Concentração de nitrito  $[K^+]$  na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I

O potássio apresenta taxas muito baixas de redistribuição no solo, em consequência da adsorção do íon pela matriz do solo, concentrando-se nas camadas superficiais (MIRANDA et al., 2005; RIVERA et al., 2006; SOUZA et al., 2009), sendo o

mesmo é transportado fundamentalmente pelo fluxo convectivo, junto com a água, em forma proporcional à sua concentração (PREVEDELLO, 1996).

Analisando o comportamento do cálcio [ $\text{Ca}^{2+}$ ] e do magnésio [ $\text{Mg}^{2+}$ ] na solução extraída, verifica-se um ajuste linear ( $p < 0,01$ ) e crescente com a redução dos níveis de umidade nos dois solos, apresentando coeficiente de determinação maior que 0,77 e 0,93 para cálcio e magnésio, respectivamente, e para ambos os solos (Figuras 13A e 13B).

A resposta da concentração de cálcio na solução coletada, apresentou comportamento similar, com coeficientes angular de 0,026 para solo  $S_1$  e 0,027 para o solo  $S_2$ , sendo o coeficiente linear da equação para o solo  $S_2$  maior em 29% em comparação ao solo  $S_1$ , comprovando o maior teor de cálcio no solo argiloso, tendo em vista que ambos foram submetidos a uma fertirrigação de mesma concentração. Observa-se para o cálcio por meio da média ponderada pela variação da umidade, valores de 3,6 e 4,9  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  para o solo arenoso e argiloso, respectivamente (Figura 13A).

Para o magnésio o comportamento com relação ao ajuste e coeficiente angular ( $p < 0,01$ ) mostrou-se similar ao cálcio, apresentando valores bem próximos entre os dois solos, sendo que na maior umidade a concentração do magnésio era praticamente igual para os dois solos, de tal forma que permaneceram bem próximas à medida que ocorreu redução da umidade (Figura 13B).

Utilizando-se valores médios da concentração obtida em todos os níveis de umidade para os dois íons [ $\text{Ca}^{2+}$ ] e [ $\text{Mg}^{2+}$ ], e em seguida por meio comparativo em relação respectiva de cálcio e magnésio aplicados (3,15 e 0,97  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ), constata-se valores superiores em 19 e 59% para cálcio e 154 e 140% para o magnésio, no solo arenoso e argiloso, respectivamente. Logo nota-se que o magnésio tem menos afinidade com os colóides do solo; mesmo em doses inferiores ao cálcio, sua disponibilidade em solução é 8,1 e 2,4 vezes superior ao cálcio, no solo arenoso e argiloso, respectivamente. (Figuras 13 A e 13C). Este efeito é possível, visto que o [ $\text{Mg}^{2+}$ ], com menor energia de ligação, é um íon que se encontra mais dissolvido em solução do que o [ $\text{Ca}^{2+}$ ] (LARCHER, 2000).

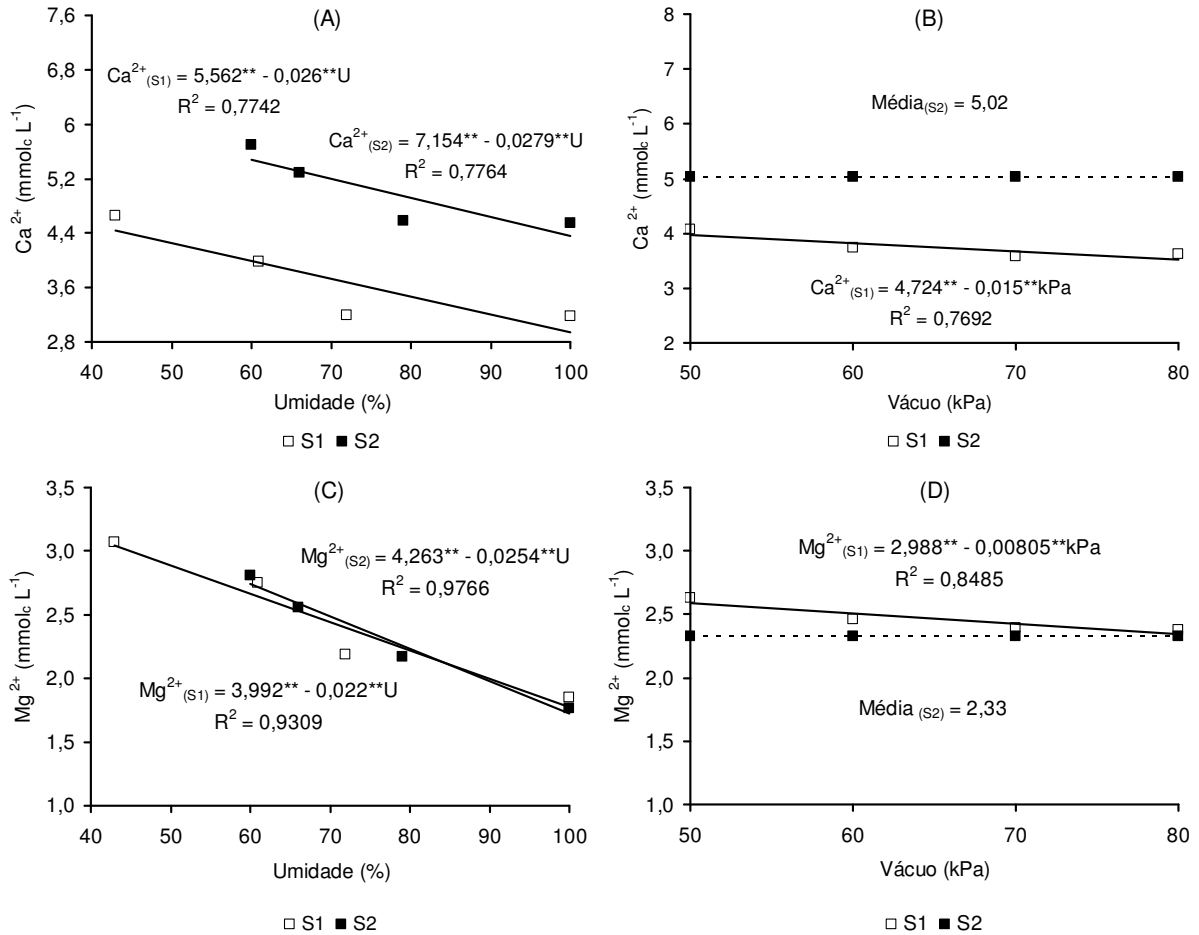


Figura 13 – Concentração de cálcio [ $Ca^{2+}$ ] e magnésio [ $Mg^{2+}$ ] na solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e solo Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes umidades (A e C) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B e D), Experimento I

Com relação ao fator intensidade de vácuo, para o mesmo foi verificado efeito significativo ( $p < 0,01$ ) para as concentrações de cálcio e magnésio na solução coletada em solo arenoso, justificando sua baixa energia de ligação, e conseqüentemente com aumento da tensão aplicada, sua concentração e disponibilidade mostraram-se reduzidas nos demais níveis do fator umidade, sendo o decréscimo mais acentuado para o cálcio (Figuras 13B e 13D). Resposta similar foi anteriormente observada para o íon potássio e relatada detalhadamente sobre esse comportamento em função do vácuo no estudo em questão.

Para o solo argiloso ( $S_2$ ) a concentração do cálcio e do magnésio não foi afetada pela intensidade de vácuo aplicada aos extratores, como respectivas médias de 5,02 e 2,33  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , mostrando que ambos os íons (Figuras 13B e 13D) apresentam maior adsorção e sobre tudo associada aos decréscimos de umidade, assim limitando a extração sob a tensão aplicada no referido solo.

A concentração de enxofre em forma de sulfato [ $\text{SO}_4^{2-}$ ] na solução coletada utilizando extratores de solução foi influenciada significativamente pelo fator umidade ao nível de 1% de probabilidade, com ajuste linear e decrescente em função da redução de umidade em ambos os solos (Figura 14A). Para o íon sulfato, verifica-se resposta bem distinta em relação à textura dos solos, de maneira que a disponibilidade do íon em solução foi superior no solo arenoso, sendo que sua fertilidade inicial foi inferior ao argiloso (Tabelas 3 e 4).

Outro fato relevante é o comportamento inverso do sulfato, quando comparado aos demais íons em resposta a redução do teor de água nos solos: em se tratando de um ânion, sua afinidade, disponibilidade em solução e mobilidade, são bem distintas das características dos cátions. Valores médios de 63 e 34% da concentração aplicada foram obtidos no solo arenoso e argiloso, respectivamente; demonstrando que ambos os solos apresentaram um elevado potencial de adsorção do sulfato, sendo que para o solo arenoso a adsorção foi inferior, possivelmente devido aos compostos funcionais de silício e traços de alumínio detectados na análise inicial do solo (Tabela 3), podendo ter ocorrido substituições que acarretaram déficit de carga positiva. Átomos de oxigênio localizam-se nas cavidades siloxanas e são considerados grupos funcionais que expressam carga negativa, deste modo, provocando redução de adsorção de sulfato.

A adsorção do sulfato no solo argiloso foi bem superior, tendo em vista seu elevado teor de argila e como característica natural da formação geoquímica, apresentam elevado teor de óxidos, e conseqüentemente alta capacidade de retenção de ânions, tornando a sua movimentação no perfil mais lenta, comparativamente a solos com menor quantidade desses grupos funcionais.

Para o fator vácuo analisado no solo arenoso, ajustou-se modelo linear ( $p < 0,01$ ) e decrescente com o incremento da tensão aplicada aos extratores de cápsula porosa;

observou-se um decréscimo de  $0,37 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  na concentração de sulfato para a faixa de tensão entre 50 e 80 kPa, mesmo assim essa redução não foi muito expressiva, quando comparado ao aplicado que foi de  $0,96 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , tal variação pode ter sido provocada por formações de compostos voláteis a base de enxofre no interior do extrator, devido à submissão do sistema ao incremento da energia de subpressão. Já para o solo argiloso, o fator vácuo não proporcionou resposta significativa para a concentração de sulfato na solução coletada, apresentando uma média  $0,32 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (Figura 14B).

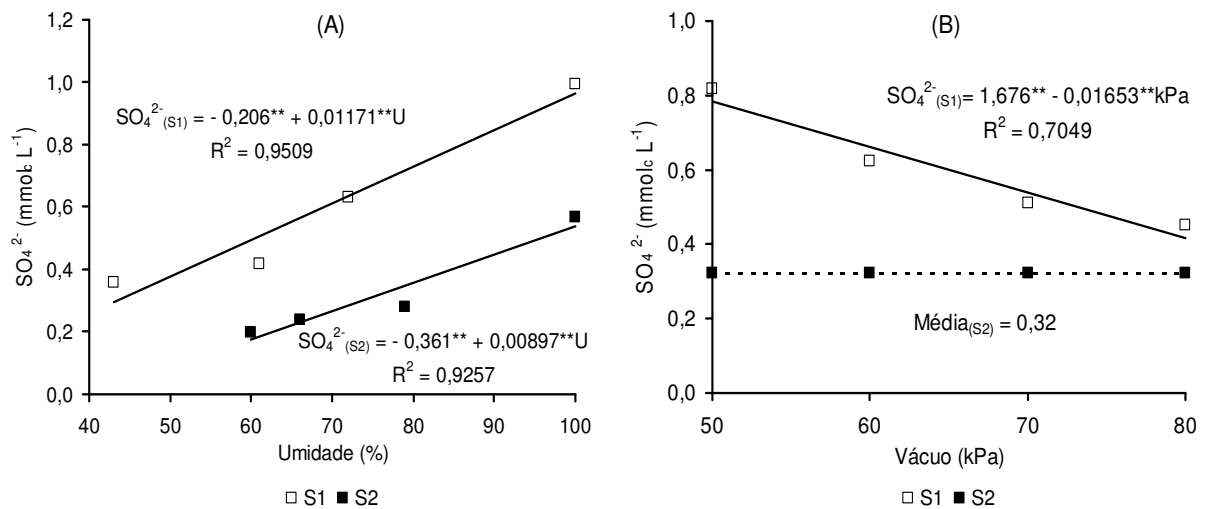


Figura 14 – Concentração de sulfato [ $\text{SO}_4^{2-}$ ] na solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e solo Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I

Com relação ao efeito do vácuo nas concentrações iônicas da solução no presente trabalho, difere dos resultados obtidos por Ranger, Marques e Jussy (2001) verificando que a qualidade da solução coletada varia de acordo com a tensão aplicada nos extratores, sendo a solução mais concentrada em altas tensões, e mais diluída sob baixas tensões.

De forma geral, todos os íons avaliados apresentaram tendência crescente de concentração com a redução da umidade dos solos, e não influenciada ou reduzida com o aumento da intensidade de vácuo aplicada aos extratores.

Esses resultados podem ser devido ao fato das soluções terem sido coletadas nas mesmas unidades experimentais quando aplicaram-se os tratamentos do fator umidade, mas permanecendo a aplicação da mesma intensidade de vácuo entre os diferentes níveis de umidades. Com base nisso, a tensão crescente associada à elevada disponibilidade de água no maior nível de umidade, proporcionou uma maior extração de íons, com isso reduzindo a disponibilidade quando aplicou-se a mesma tensão para os demais níveis do fator umidade nas mesmas parcelas, assim resultando uma baixa disponibilidade iônica na zona de captação de solução pela cápsula, devido a baixa redistribuição e elevada adsorção iônica.

#### **2.3.4 Experimento I – Condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, volume coletado e tempo de equilíbrio**

As variáveis condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), volume coletado (VC) e tempo (t) necessário para a tensão aplicada entrar em equilíbrio com o potencial de água no solo foram afetadas significativamente ( $p < 0,01$ ) para ambos os fatores e solos (Tabelas 7 e 8), exceto a variável pH dentro do fator vácuo, que respondeu significativamente ao nível de 5% de probabilidade para o solo arenoso (Tabela 7), e ao nível ( $p < 0,01$ ) para o solo argiloso (Tabela 8), e a variável condutividade elétrica não respondeu significativamente ao fator vácuo em ambos os solos (Tabelas 7 e 8).

Com relação à interação entre os fatores umidade e vácuo, a variável VC respondeu significativamente ao nível de 1 e 5% de probabilidade para solo argiloso e arenoso, respectivamente; o tempo de equilíbrio (t) mostrou-se significativo ( $p < 0,01$ ) em ambos os solos, e por fim a condutividade elétrica (CE) e o potencial hidrogeniônico (pH) não apresentaram resposta significativa para a interação em nenhum dos solos (Tabelas 7 e 8). Desta forma, para a interação os solos foram avaliados separadamente visando avaliar o efeito conjunto dos fatores.

Quanto à medida de variação relativa CV(%), usada para quantificar a precisão do experimento, constata-se uma ótima precisão para todas variáveis, exceto para (CE) e (VC) no solo argiloso que apresentou precisão regular (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7 - Resumo da análise da variância para as variáveis CE, pH, volume coletado (VC) e tempo (t) (necessário para a tensão aplicada entrar em equilíbrio com o potencial de água no solo) da solução coletada utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e diferentes umidades em solo Franco Arenoso

Fonte de variação	GL	-----Quadrados médios-----			
		CE	pH	VC	t
Umidade (U)	3	0,54**	0,652**	379,793**	2606,081**
Vácuo (V)	3	0,018 <sup>ns</sup>	0,027*	2398,421**	4,896**
U x V	9	0,004 <sup>ns</sup>	0,048 <sup>ns</sup>	14,966*	3,262**
Resíduo	32	0,008	0,009	8,625	0,001
CV(%)		9,53	1,3	5,21	1,41
Média geral		0,95	7,22	56,40	9,02

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Tabela 8 - Resumo da análise da variância para as variáveis CE, pH, volume coletado (VC) e tempo (t) (necessário para a tensão aplicada entrar em equilíbrio com o potencial de água no solo) da solução coletada utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo e diferentes umidades em solo Franco Argiloso

Fonte de variação	GL	-----Quadrados médios-----			
		CE	pH	VC	t
Umidade (U)	3	0,836**	0,139**	5475,791**	15147,892**
Vácuo (V)	3	0,014 <sup>ns</sup>	0,152**	1513,349**	0,173**
U x V	9	0,007 <sup>ns</sup>	0,043 <sup>ns</sup>	103,885*	0,836**
Resíduo	32	0,064	0,016	43,172	0,015
CV(%)		19,49	1,7	15,68	1,6
Média geral		1,29	7,34	41,91	32,28

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Foram obtidas equações lineares ( $p < 0,01$ ) para a condutividade elétrica em ambos os solos, sendo que para o solo argiloso mesmo com correção de umidades

para situação de teor igual ao arenoso, apresentou resposta superior e com sua curva se distanciando em relação ao arenoso à medida que a umidade decrescia, ou seja, com coeficiente angular superior em aproximadamente 55% (Figura 15A). Em relação a esse comportamento, constata-se com base na resposta similar da concentração dos íons em funções da redução de umidade, de forma não diferente o mesmo comportamento verifica-se para CE, sendo a mesma proporcional e crescente para o aumento da concentração iônica na solução e com a redução da umidade.

A solução aplicada de 30% da solução padrão, continha  $613 \text{ mg L}^{-1}$  proporcionando uma condutividade elétrica  $0,8 \text{ dS m}^{-1}$ , resultando num fator de 767, que se difere do fator proposto por Richards igual a 640, isso se deve a característica eletrolítica (tipos e proporções) dos sais utilizados na fertirrigação.

O fator vácuo não exerceu influência significativa sobre a condutividade elétrica da solução para os dois tipos de solos estudados, apresentando médias de 0,95 e 1,27  $\text{dS m}^{-1}$  para os solos arenoso e argiloso, respectivamente. (Figura 15B).

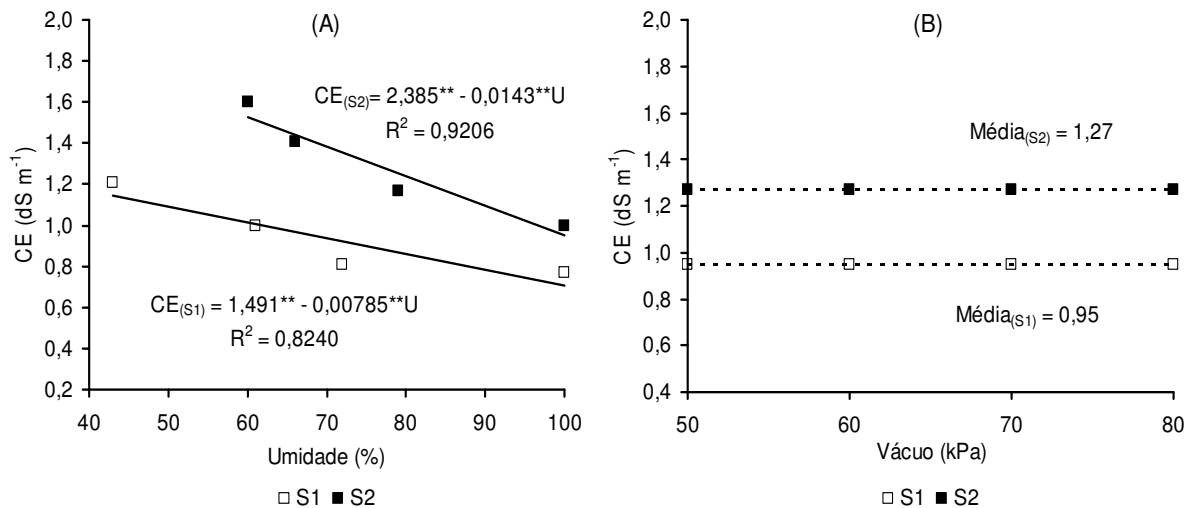


Figura 15 – Condutividade elétrica (CE) na solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e solo Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I

O potencial hidrogeniônico (Figura 16A) foi ajustado linearmente ( $p < 0,01$ ) e de forma decrescente com a redução dos níveis do fator umidade para o solo arenoso, fato



ocorrido devido à quantidade de íons de hidrogênio que permaneceram em solução, enquanto houve redução do teor de água no solo, assim proporcionando um decréscimo no pH; a diminuição nos valores de pH está associada ao aumento na saturação por bases, visto que os íons  $[H^+]$  e  $[Al^{3+}]$ , responsáveis pela acidez, substituem as bases  $[K^+]$ ,  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  na fase lábil (ALLOWAY, 1990) ou, ainda, pode ser atribuído à produção de ácidos orgânicos provenientes da decomposição da matéria orgânica (MORAES, 1991). No solo argiloso não houve ajuste significativo, provavelmente por possuir elevado poder tampão, ou seja, características químicas que dificultam ou requerem medidas alternativas caso seja necessário a variação do pH.

Para o solo arenoso o fator vácuo não provocou efeito significativo, logo que a solução neste solo apresentava-se bastante estável e facilmente disponível, assim não sofrendo efeito com a variação da tensão aplicada aos extratores, apresentando um pH médio de 7,21. Para o solo argiloso o pH respondeu de forma linear ( $p < 0,01$ ) e decrescente com o incremento do vácuo aplicado, verificando-se que houve uma maior extração de íons hidrogênio à medida que aumentava a intensidade de vácuo aplicado, obtendo-se uma redução do pH em 0,25, quando variou-se de 50 para 80 kPa de vácuo aplicado aos extratores (Figura 16B).

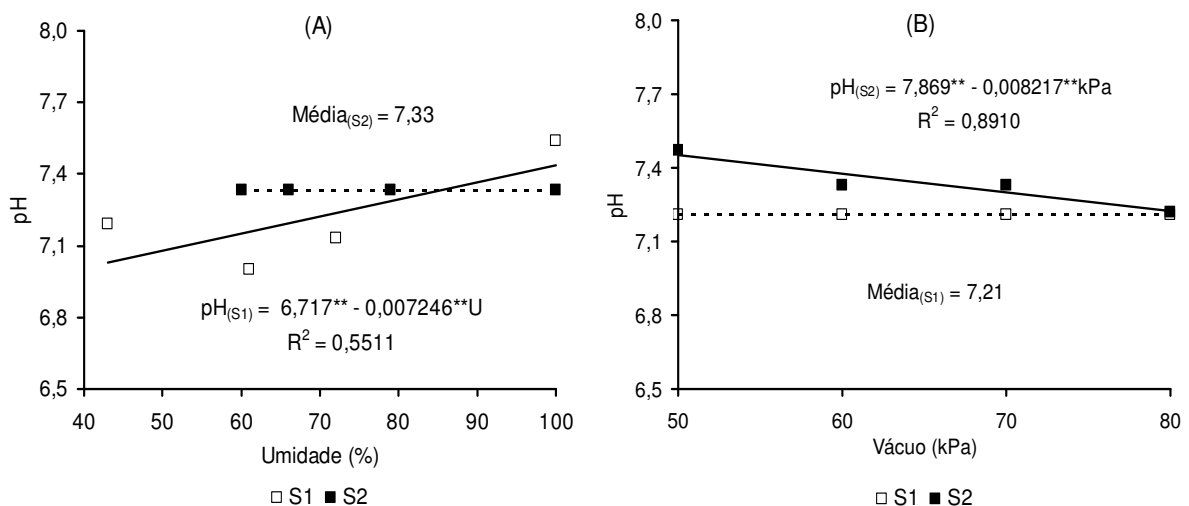


Figura 16 – Potencial hidrogeniônico (pH) na solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e solo Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes umidades (A) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B), Experimento I

Para a variável volume coletado (VC) da solução via extratores de cápsula porosa, constatou-se interação entre os fatores umidade e vácuo (U x V) por meio da análise de variância (Figura 17). Sendo que para ambos os solos o VC, tanto no desdobramento da umidade dentro de cada vácuo (Figuras 17A e 17C), bem como do vácuo dentro de cada umidade (Figuras 17B e 17D), responderam significativamente por meio de modelo linear ( $p < 0,01$ ) e de forma crescente com o incremento dos níveis de ambos os fatores, exceto o fator vácuo para o solo argiloso na umidade de 60% que não apresentou ajuste significativo (Figura 17D).

Avaliando o efeito da umidade dentro de cada nível de vácuo, constata-se que o volume coletado aumentou com o incremento do vácuo e da umidade, sendo a variação mais expressiva observada entre as tensões de 50 e 60 kPa. Os volumes obtidos variaram entre 28 e 74 mL nas tensões de 50 e 80 kPa no menor e maior nível de umidade no solo arenoso, respectivamente (Figura 17A). O volume coletado é uma variável relevante a ser analisada, considerando que o número de determinações e a metodologia utilizada nas análises químicas exijam um volume satisfatório de solução, desde que as limitações e objeções sejam respeitadas para cada situação em estudo, no que diz respeito à quantidade e qualidade da solução obtido via extratores de cápsula porosa; a intensidade de vácuo pode ser aumentada a fim de obter-se um maior volume de solução, ou em condições de umidades razoavelmente inferiores a capacidade de campo, desde que seja realmente necessário.

Para o solo argiloso a resposta foi similar ao arenoso, mas como este apresenta maior energia de retenção de água, obteve-se volumes entre 8 e 79 mL nas tensões de 50 e 80 kPa no menor e maior nível de umidade, respectivamente (Figura 17C). Para a maior tensão foi possível verificar um afastamento da curva com o aumento dos níveis de umidade em relação às demais, mostrando efeito diferenciado na capacidade de sucção em elevadas umidades.

No maior nível de vácuo e em todos os níveis de umidade, os valores de volume coletado foram bem próximos, variando cerca de 14%, no entanto com a redução do vácuo as retas foram afastando-se, demonstrando uma maior variação no volume

coletado de 69% entre os níveis extremos de umidade para a tensão de 50 kPa, constatando-se ainda uma ótima correlação com  $R^2 > 0,9$  (Figura 17 B).

O fator vácuo afetou de forma linear ( $p < 0,01$ ) para os dois níveis intermediários de umidade e ao nível de 5% de probabilidade para o maior nível de umidade, sendo que para o menor nível do fator umidade, a variável (VC) não apresentou resposta significativa, pois neste momento o solo encontrava-se com baixa disponibilidade de água, sendo que o aumento da intensidade de vácuo não provocou variação na variável estudada (Figura 17D). A diferença percentual entre as médias do (VC) em todos os níveis de umidade dentro do vácuo de 80 kPa, mostrou-se 26% menor em relação ao argiloso. Com base nestes resultados, verifica-se que em solo argiloso com umidade de 60% em base peso, foi possível coletar o volume de 8 e 20 mL nas tensões de 50 e 80 kPa, respectivamente. De forma geral o incremento do vácuo afetou significativamente o volume coletado, corroborando com resultados encontrados por Poss et al. (1995).

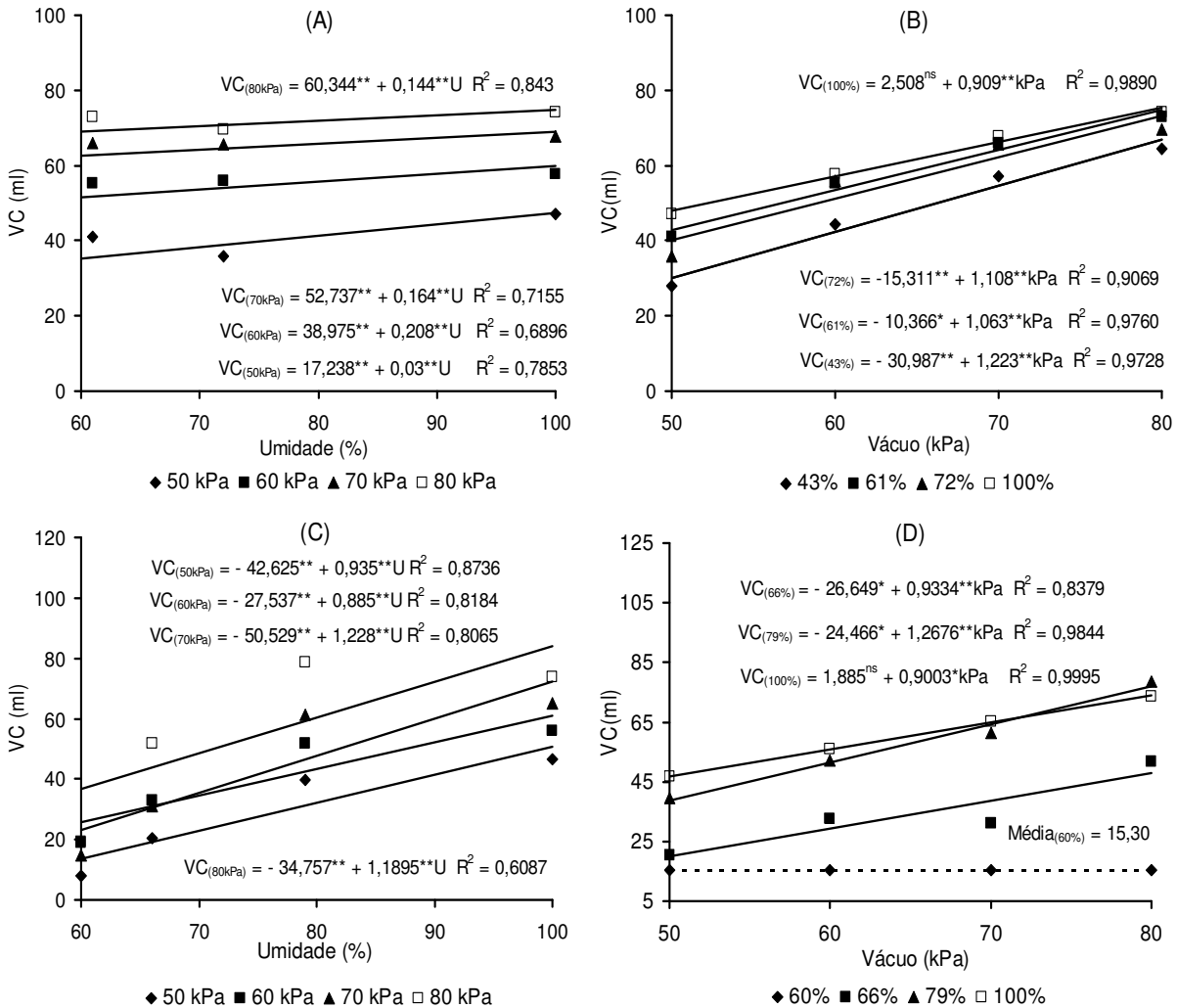


Figura 17 – Volume coletado (VC) de solução em solo Franco Arenoso (A e B) e solo Franco Argiloso (C e D) em função de diferentes umidades (A e C) no solo e intensidades de aplicação de vácuo (B e D), Experimento I

Analisando o comportamento do tempo necessário para atingir o equilíbrio entre o vácuo aplicado aos extratores e o potencial de água no solo (Tabela 9), verifica-se um aumento deste com o decréscimo nos níveis dos fatores vácuo e umidade, exceto nos dois menores níveis do fator umidade para o solo arenoso e no menor nível para o argiloso. O tempo aumentou com o incremento do vácuo, isso devido à baixa umidade dos solos nesses níveis, reduzindo o fluxo de solução para o interior da cápsula. O menor valor de tempo obtido foi de 0,37 horas para ambos os solos com vácuo de 80

kPa e na umidade de 100% e, os maiores foram de 33,13 e 64,40 horas dentro do menor nível de umidade no solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Avaliando a variável tempo entre os dois materiais de solos, verifica-se que a mesma não diferiu para o maior nível do fator umidade, sendo que para os demais níveis de umidade e em todos os níveis do fator vácuo o solo argiloso apresentou valores de tempo estatisticamente superiores pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A média da variável tempo para ambos os solos apresentou um aumento de 3% com o incremento do vácuo; já as médias para cada solo apresentaram um aumento de 98 e 99% à medida que a umidade decresceu da máxima para 43 e 60% nos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Tabela 9 – Valores médios do tempo de equilíbrio entre o vácuo aplicado extratores providos de cápsulas porosas e o potencial de água nos solos Franco Arenoso e Franco Argiloso em diferentes umidades

Solo	U <sup>1</sup> (%)	-----Vácuo (kPa) -----				Médias
		50	60	70	80	
Franco Arenoso	43	29,20 Db	29,93 Cc	31,83 Bc	33,13 Ac	31,02
	61	2,50 Dd	2,63 Cd	4,57 Bd	4,87 Ad	3,64
	72	1,13 Ae	1,13 Ae	0,63Bf	0,53 Cf	0,86
	100	0,67 Af	0,67 Af	0,47 Bh	0,37 Cg	0,55
Franco Argiloso	60	62,97 Ca	62,97 Ca	64,17 Ba	64,40 Aa	63,63
	66	62,97 Aa	62,33 Bb	62,33 Bb	62,17 Cb	62,45
	79	2,80 Ac	2,63 Bd	2,63 Be	1,90 Ce	2,49
	100	0,67 Af	0,67 Af	0,50 Bg	0,37 Cg	0,55
	Médias	20,37	20,37	20,89	20,96	
		CV(%) = 1,85		Média Geral		20,65

\* Médias seguidas da mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 0,05 de probabilidade <sup>1</sup>Umidade em base peso

Na Figura 18 estão expostas as equações que descrevem o comportamento do tempo de equilíbrio em função da diferença de potencial entre o vácuo aplicado nos extratores e a tensão de água em ambos os solos. Verifica-se para a variável tempo,

um ajuste linear ( $p < 0,01$ ) e decrescente para todas as umidades com o incremento da diferença de potencial em ambos os solos, exceto para os dois menores níveis de umidade no solo arenoso (Figura 18A) e no menor nível no solo argiloso (Figura 18B); a resposta foi linear ( $p < 0,01$ ) e crescente, no entanto menos expressiva.

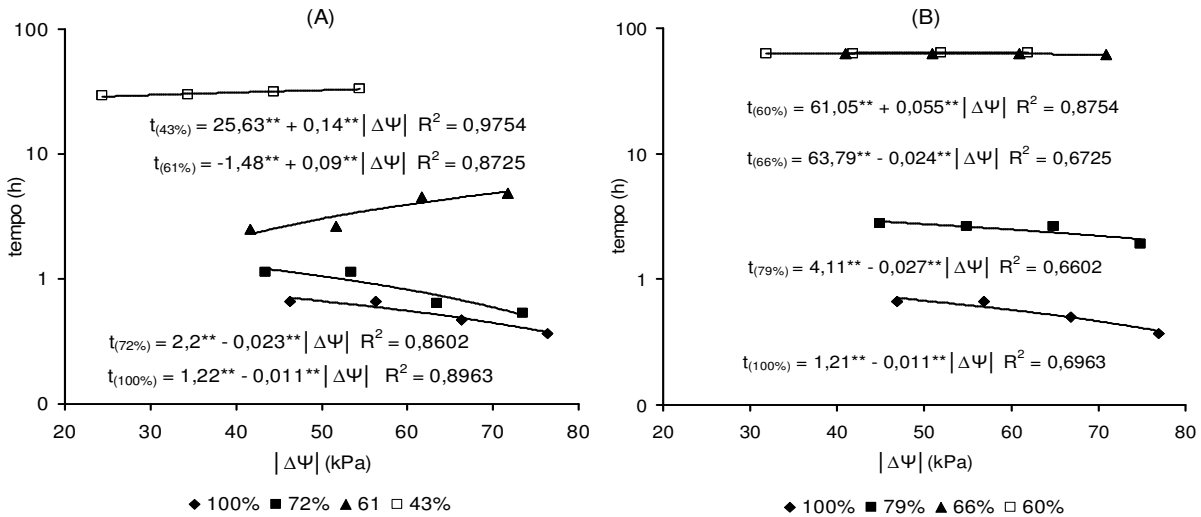


Figura 18 – Tempo de equilíbrio ( $t$ ) em função da diferença dos potenciais  $|\Delta\Psi|$  de vácuo e da água nos solos Franco Arenoso (A) e Franco Argiloso (B) em diferentes umidades, Experimento I

### 2.3.5 Experimento II – Características químicas da solução do solo

Todos os íons determinados na solução coletada em ambos os solos, bem como o pH e a CE foram afetados significativamente ( $p < 0,01$ ) pelo aumento na concentração da solução aplicada na fertirrigação (F). Não foi verificado efeito significativo da intensidade do vácuo (V), nem da interação entre os fatores F x V aplicados nos extratores, sobre a concentração de íons, CE, nem no pH da solução coletada; exceto para o sulfato que foi afetado significativamente ( $p < 0,05$ ) pela interação no solo argiloso (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 - Resumo da análise da variância para concentração de  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ ,  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , CE e pH da solução coletada no solo Franco Arenoso fertirrigado com distintas concentrações, utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo

Fonte de variação	GL	Quadrados médios						
		$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	CE	pH
Ferti (F)	3	330,15**	1,143**	62,289**	34,944**	10,422**	5,014**	0,199**
Vácuo (V)	2	0,63 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,012 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,059 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,029 <sup>ns</sup>
F x V	6	0,40 <sup>ns</sup>	0,013 <sup>ns</sup>	0,075 <sup>ns</sup>	0,017 <sup>ns</sup>	0,083 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,058 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	0,46	0,016	0,042	0,021	0,051	0,002	0,029
CV (%)		9,41	25,41	5,37	5,72	14,06	3,87	2,52
Média geral		7,28	0,58	3,82	2,56	1,60	1,07	6,80

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Tabela 11 - Resumo da análise da variância para concentração de  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ ,  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , CE e pH da solução coletada no solo Franco Argiloso fertirrigado com distintas concentrações, utilizando extratores providos de cápsulas porosas submetidos a diferentes intensidades de vácuo

Fonte de variação	GL	Quadrados médios						
		$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	CE	pH
Ferti (F)	3	200,07**	6,271**	63,808**	18,271**	63,753**	3,854**	0,380**
Vácuo (V)	2	0,05 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>	0,088 <sup>ns</sup>	0,007 <sup>ns</sup>	0,012 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,035 <sup>ns</sup>
F x V	6	0,38 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,120 <sup>ns</sup>	0,017 <sup>ns</sup>	0,044*	0,002 <sup>ns</sup>	0,097 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	0,40	0,007	0,058	0,017	0,160	0,001	0,053
CV (%)		7,69	4,35	5,19	6,38	4,75	3,21	3,35
Média geral		8,23	1,89	4,66	2,06	2,66	1,20	6,90

\* e \*\*: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup>: não significativo

Considerando-se os valores de média geral da concentração de  $[\text{NO}_3^-]$  e  $[\text{K}^+]$  (7,28 e 0,58, respectivamente) na solução coletada em solo arenoso (Tabela 10), verifica-se uma relação  $\text{NO}_3^-/\text{K}^+$  de 12,55, sendo esta superior a relação  $\text{NO}_3^-/\text{K}^+$  da solução aplicada (2,92), conforme mostrado na (Tabela 1). Para o solo argiloso também foi verificada diferença na relação  $\text{NO}_3^-/\text{K}^+$  (4,35) na solução coletada (Tabela 11) em comparação com a solução aplicada (2,92), esse aumento na relação em ambos os

solos pode ser atribuído as diversas causas, tais como: a conversão de outros compostos nitrogenados para nitrogênio na forma nítrica, e também a atividades microbiológicas das bactérias nitrificantes.

Esta diferença na relação  $\text{NO}_3^-/\text{K}^+$  entre a solução aplicada e a solução coletada, pode ser atribuída a maior mobilidade do  $[\text{NO}_3^-]$  em relação  $[\text{K}^+]$ , proporcionando elevada variação, tanto de disponibilidade, quanto de perdas, caracterizando grande dinâmica deste íon. O nitrato por ser um ânion, não é retido em solos cuja predominância de cargas seja negativa, apresentando por isso, grande potencial de rápida disponibilidade, bem como de lixiviação. Percebe-se ainda que essa relação foi menos afetada no solo argiloso, devido ao maior teor de  $[\text{K}^+]$  presente neste solo; desta forma, uma maior quantidade de  $[\text{K}^+]$  foi disponibilizado para a solução do solo.

Não foi verificado efeito significativo da interação entre os fatores fertirrigação (F) x vácuo (V), de forma que o efeito de cada fator foi avaliado isoladamente. O teor de  $\text{NO}_3^-$  na solução coletada aumentou de acordo com o incremento deste íon na solução aplicada, sendo esse comportamento semelhante para ambos os solos (arenoso e argiloso). Independentemente do solo avaliado, a equação que apresentou melhor ajuste foi do tipo linear, apresentando  $R^2 > 0,99$ . A partir das equações de regressão obtidas, pode-se verificar que o coeficiente angular foi maior que 1, demonstrando que a concentração de  $[\text{NO}_3^-]$  na solução coletada foi superior a concentração da solução aplicada, sendo esse valor superior em 53,7% para o solo argiloso ( $S_2$ ) e 8,39% para o solo arenoso ( $S_1$ ) (Figura 19A). Ainda na Figura 19A, verificam-se os maiores valores no solo  $S_2$ , no entanto, essa diferença entre os solos tende a diminuir com aumento da concentração aplicada.

Blanco (2004) avaliou o uso de extratores providos de cápsulas porosas para monitoramento da concentração de nitrato na solução de um solo cultivado com tomateiro. Os resultados encontrados por este autor estão de acordo com os encontrados neste trabalho, sendo a concentração dos íons proporcional as doses aplicadas via fertirrigação.

De acordo com Moraes (1991), dentre os ânions presente nos solos, o nitrato é o que apresenta maior mobilidade. Gomes et al. (2004) avaliaram a mobilidade de nitrato



proveniente de água residuária em colunas, com dois tipos de solo (arenoso e argiloso), e verificaram que o solo arenoso apresentou maior taxa de lixiviação.

Miranda e Duarte (2002) avaliaram a mobilidade de nitrato em três tipos de solo (Latosolo Vermelho Amarelo, fase arenosa; Latossolo Vermelho Amarelo, fase arenosa-argilosa e Terra Roxa Estruturada) acondicionados em colunas verticais de solo não saturado. Segundo esses autores o processo de lixiviação foi mais efetivo no solo arenoso.

Para o efeito da intensidade do vácuo (Figura 19B), não foi verificada resposta significativa, não sendo possível obter equações de regressão para explicar tal efeito, evidenciando que a determinação da concentração de  $[\text{NO}_3^-]$  na solução coletada por intermédio de extratores providos de cápsula porosa não é influenciada pela intensidade do vácuo aplicado. Avaliando a concentração de  $[\text{NO}_3^-]$  para os dois solos, as médias obtidas foram de 7,28 e 8,23  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  para o solo arenoso e argiloso, respectivamente.

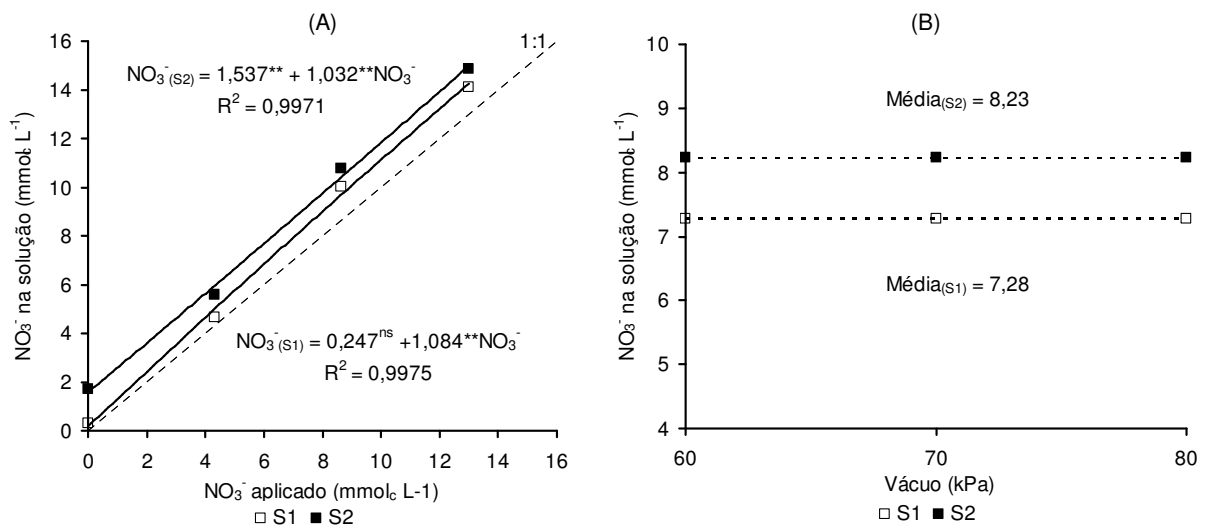


Figura 19 – Concentração de nitrato  $[\text{NO}_3^-]$  da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) e Franco Argiloso ( $S_2$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

A concentração de potássio  $[K^+]$  na solução coletada utilizando extratores providos de cápsulas porosas foi afetada significativamente pela concentração de  $[K^+]$  na solução aplicada nos dois tipos de solos. Ainda para os mesmos foram obtidas equações de regressão lineares, com satisfatórios coeficientes de determinação ( $R^2 > 0,93$ ). Pode-se verificar que, com exceção da concentração obtida na solução coletada referente ao nível zero na solução aplicada, onde foi encontrada uma elevada concentração de  $[K^+]$ , a concentração na solução aplicada tende a ser inferior na solução coletada com os extratores. Este fato pode ser observado a partir dos coeficientes angulares das equações, visto que para ambos os solos o coeficiente foi menor que 1 (Figura 20A). Este comportamento pode ser explicado pela elevada capacidade de troca de cátions dos solos estudados. Blanco (2004) também encontrou certa linearidade entre doses de potássio aplicado no solo e concentração na solução do solo coletada com extratores.

Não foi verificado efeito significativo da intensidade do vácuo, aplicados nos extratores, sobre a concentração de  $[K^+]$  na solução coletada, independente do solo avaliado, conforme pode ser observado na Figura 20B, onde se verifica uma constância nos valores independente da intensidade do vácuo, com médias de 0,49 e 1,89  $mmol_c L^{-1}$  para o solo arenoso e argiloso, respectivamente. Os maiores valores obtidos no solo argiloso pode ser atribuído a uma maior concentração natural deste íon no solo (Tabelas 3 e 4). Esses resultados corroboram com os encontrados por Maria et al. (1993), que avaliaram o movimento de cátions em colunas de solo de texturas média e argilosa, e observaram que os maiores valores para K lixiviados em colunas com solo argiloso, sendo essa resposta atribuída a uma maior fertilidade inicial do solo. Fato este semelhante, em parte, ao obtido neste trabalho.

O potássio apresenta taxas muito baixas de redistribuição no solo, em consequência da adsorção do íon pela matriz do solo, concentrando-se nas camadas superficiais, o que aparentemente demonstra que, além de ser retido nas camadas superiores ao ser adsorvido pela matriz do solo (MIRANDA et al., 2005; RIVERA et al., 2006; SOUZA et al., 2009), o mesmo é transportado fundamentalmente pelo fluxo

convectivo, junto com a água, em forma proporcional à sua concentração (PREVEDELLO, 1996).

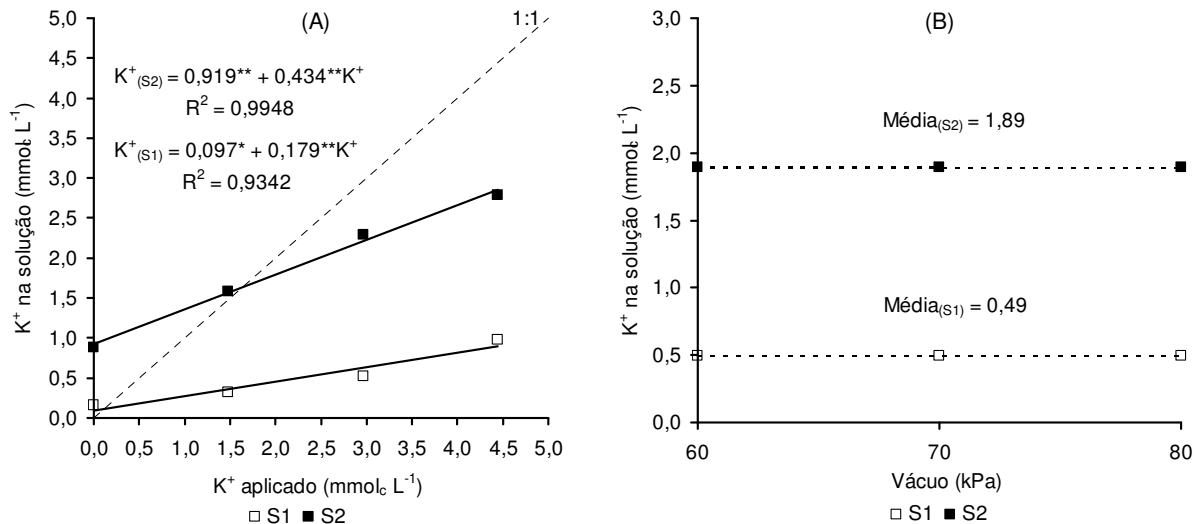


Figura 20 – Concentração de potássio [K<sup>+</sup>] da solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

A concentração de cálcio [Ca<sup>2+</sup>] na solução coletada via extratores foi alterada significativamente de acordo com o incremento deste íon na solução aplicada, sendo o comportamento semelhante para ambos os tipos de solos. Independente do tipo de solo, a equação de regressão que melhor se ajustou foi do tipo linear, com R<sup>2</sup> maior que 0,99 (Figura 21A). Essas equações apresentaram coeficientes angulares bem similares (0,650 e 0,664), a partir dos quais observa-se que as linhas de tendência são praticamente paralelas. Pode-se verificar a partir da equação de regressão que, em ambos os solos, a concentração de [Ca<sup>2+</sup>] na solução coletada tende a ser inferior a concentração da solução aplicada em cerca de 35%.

Não foi observada resposta significativa da intensidade do vácuo (Figura 21B) aplicado nos extratores sobre a concentração de [Ca<sup>2+</sup>] na solução coletada, sendo, no entanto, observado diferença entre os tipos de solos, apresentando valores médios de 3,82 e 4,66 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> para os solos S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub>, respectivamente. Considerando que nos dois solos foi aplicada a mesma concentração, essa diferença deve-se ao maior teor de [Ca<sup>2+</sup>] no solo S<sub>2</sub>, conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4.

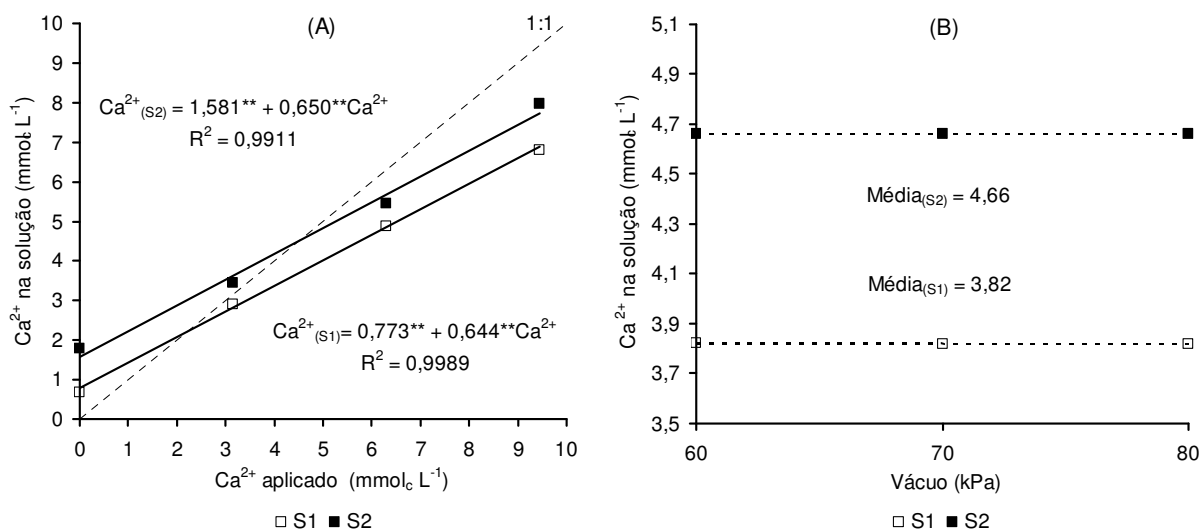


Figura 21 – Concentração de cálcio  $[Ca^{2+}]$  da solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes concentrações solução da aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

Avaliando-se a concentração de magnésio  $[Mg^{2+}]$  na solução coletada utilizando extratores, em relação a concentração na solução aplicada, verificou-se resposta linear crescente, de acordo com o incremento de  $[Mg^{2+}]$  na solução aplicada. Verificou-se comportamento semelhante para os dois tipos de solo, podendo esse fenômeno ser explicado com equação linear, apresentando elevados coeficientes de determinação ( $R^2 > 0,99$ ). Apesar da resposta para ambos os solos serem explicados pelo mesmo tipo de equação, percebe-se que nas menores doses aplicadas, a concentração na solução coletada não diferiu entre os solos, no entanto, nas maiores doses, observa-se uma tendência para os maiores valores serem obtidos no solo arenoso (Figura 22A).

Avaliando as equações obtidas, verifica-se que para ambos os solos as equações superestimam em cerca de 56,4% (S<sub>1</sub>) e 12,9% (S<sub>2</sub>) as concentrações de  $[Mg^{2+}]$  na solução coletada, em relação à concentração desse íon na solução aplicada.

Para o efeito da intensidade do vácuo sobre a concentração de magnésio na solução coletada, não foi verificada influência significativa, sendo observada diferença apenas entre os solos avaliados (Figura 22B).

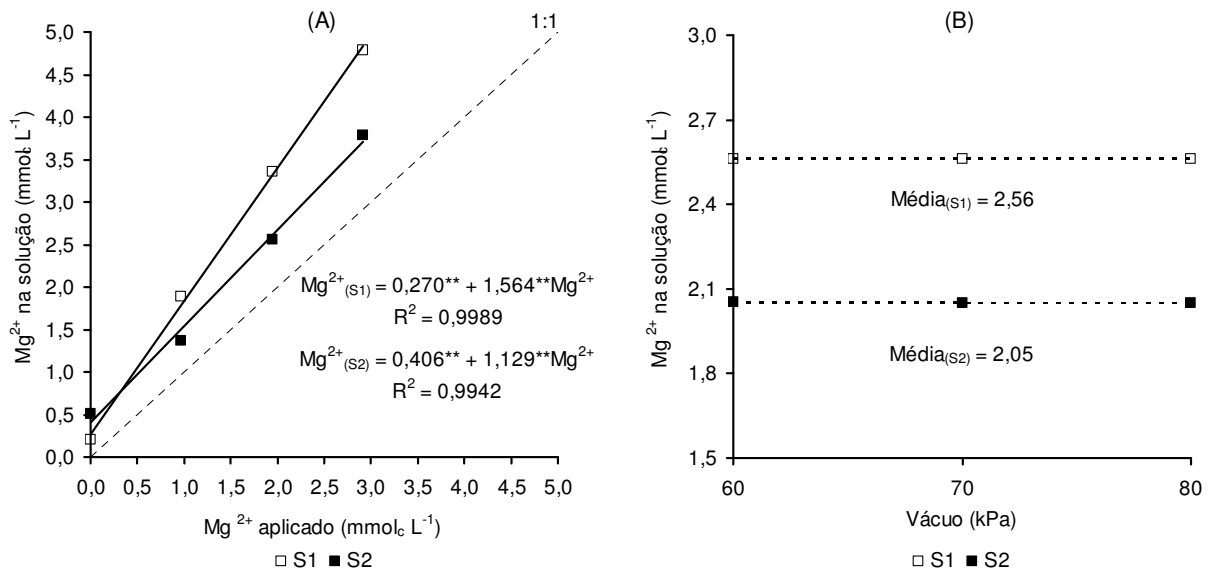


Figura 22 – Concentração de Magnésio [Mg<sup>2+</sup>] da solução extraída em solo arenoso (S<sub>1</sub>) e argiloso (S<sub>2</sub>) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

Avaliando a concentração de magnésio nos dois tipos de solo, constata-se que os maiores valores foram obtidos na solução extraída do solo arenoso (Figura 22A). Sabe-se que a textura do solo influencia significativamente a dinâmica do cálcio e do magnésio, apresentando forte correlação com a concentração destes íons (NEU, 2005). Em solos argilosos, esses cátions são retidos pela matriz do solo de forma mais eficiente, enquanto que nos solos arenosos esses íons são liberados com maior facilidade para solução do solo.

Moraes (1991), avaliando o movimento de nutrientes em um Latossolo, verificou que as curvas de movimento do cálcio e do magnésio na solução do solo são semelhantes, apresentando acentuado deslocamento.

No entanto, no presente trabalho obteve-se resultados que demonstram que as concentrações de [Ca<sup>2+</sup>] e de [Mg<sup>2+</sup>] apresentaram comportamentos distintos, visto que obteve-se curvas que subestimam a concentração do [Ca<sup>2+</sup>], e superestimam a concentração do [Mg<sup>2+</sup>]. Este efeito é possível, visto que o Mg<sup>2+</sup>, com menor energia de ligação, é um íon que se encontra mais dissolvido em solução do que o [Ca<sup>2+</sup>] (LARCHER, 2000).

Na literatura são encontrados relatos que cápsulas porosas poderiam liberar  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  para solução coletada, podendo provocar alterações químicas na solução extraída (SUAREZ, 1987; MORAES; DYNIA, 1990; JONES; EDWARDS, 1993). Silva, Rosolem e Wong (2004) avaliaram a liberação de  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  por cápsulas e constataram que ocorreu liberação desses íons pelas cápsulas, no entanto, segundo esses autores, os teores liberados foram pequenos, não constituindo, portanto, fonte de contaminação da solução do solo extraída por meio de vácuo. Vale salientar ainda que esses autores trabalharam com as cápsulas porosas sob condições supersaturadas, ficando imersas em água durante todo o experimento.

A concentração de sulfato  $[SO_4^{2-}]$  na solução coletada utilizando extratores de solução foi influenciada significativamente pela concentração da solução aplicada, bem como pela interação entre os fatores F x V ao nível de 5% de probabilidade. Desta forma, os solos foram avaliados separadamente visando avaliar o efeito conjunto dos fatores (Figuras 23 e 24).

Para o solo arenoso ( $S_1$ ) foi obtido efeito linear e positivo, sendo a concentração de  $[SO_4^{2-}]$  crescente de acordo com o aumento deste íon na solução aplicada (Figura 23A). A equação de melhor ajuste foi do tipo linear, apresentando satisfatório coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,99$ ). Verifica-se ainda que a linha de tendência dessa equação apresentasse bem próxima a linha de relação 1:1, o que demonstra uma elevada proximidade entre os dados. Fato este que pode ser observado no coeficiente angular da equação de regressão (0,848), de forma que a concentração de  $[SO_4^{2-}]$  obtida na solução extraída com os extratores subestima em cerca de 20% a concentração aplicada no solo (Tabela 1).

Para o efeito da intensidade do vácuo não foi verificada resposta significativa, não sendo obtida equação de regressão que pudesse explicar o comportamento. Assim, para as diferentes intensidades de vácuo aplicadas, obtendo-se uma média  $1,61 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (Figura 23B).

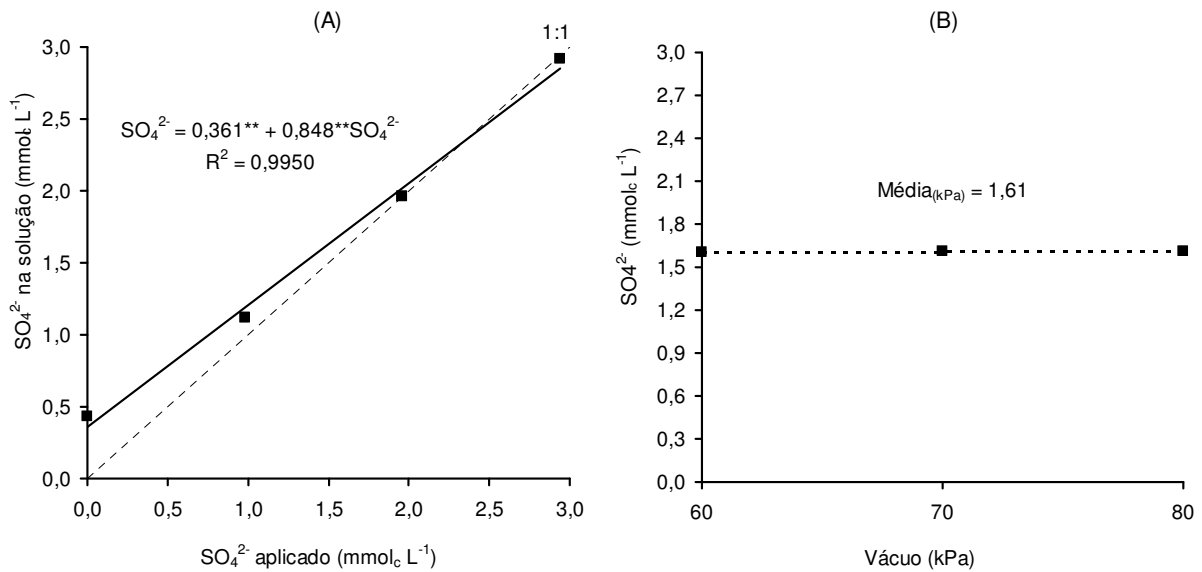


Figura 23 – Concentração de sulfato [ $SO_4^{2-}$ ] da solução extraída em solo Franco Arenoso ( $S_1$ ) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

Com relação ao solo argiloso, verificou-se efeito significativo da interação entre os fatores fertirrigação (F) e intensidade do vácuo (V), de forma que foram avaliados isoladamente o efeito da fertirrigação em cada vácuo (Figura 24A) e o efeito da intensidade do vácuo em cada fertirrigação (Figura 24B).

Para o efeito da fertirrigação foi verificada resposta linear e crescente, com equações lineares apresentando satisfatórios coeficientes de determinação ( $R^2 > 0,86$ ).

Pode-se verificar ainda que para todos os vácuos, as equações ajustadas apresentam linhas de tendência acima da linha de relação 1:1, evidenciando uma superestimação entre os valores obtidos na solução extraída com os extratores em relação à concentração da solução aplicada, em cerca de 81,24; 83,16 e 79,08%, para as tensões de 60, 70 e 80 kPa, respectivamente (Figura 24A).

Com relação ao efeito da intensidade do vácuo em cada fertirrigação, os resultados obtidos evidenciam que não houve efeito significativo, não sendo assim encontrada equação de regressão que possibilitasse explicar tal evento (Figura 24B). Os maiores valores foram encontrados nas maiores concentrações aplicadas (2,94 e 1,96 mmol L<sup>-1</sup>), fato este já esperado devido a maior disponibilidade do [ $SO_4^{2-}$ ] na

solução do solo, no entanto, nas menores concentrações foram obtidos resultados inferiores. Este comportamento pode se atribuído a uma provável aumento de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  ocasionado nas maiores concentração, fato este não observado nos dois menores níveis.

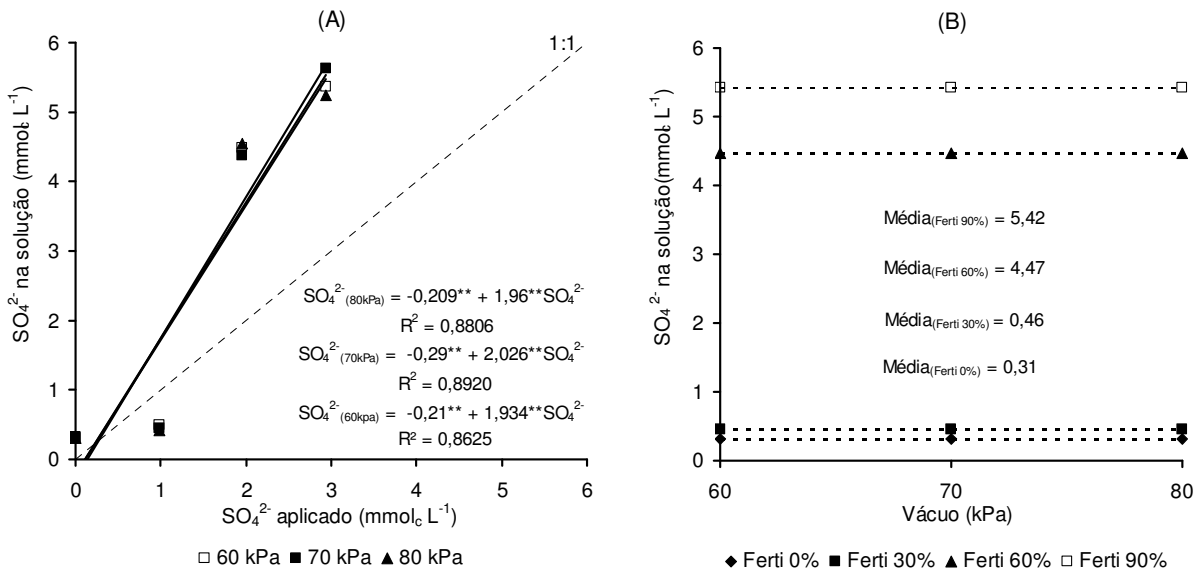


Figura 24 – Concentração de sulfato  $[\text{SO}_4^{2-}]$  da solução extraída em solo Franco Argiloso (S2) em função de diferentes concentrações da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

De forma geral não foram encontradas evidências sobre o efeito da tensão aplicado nos extratores sobre a concentração de íons na solução extraída (Figura 24B).

Na literatura são encontrados trabalhos que evidenciam efeito significativo da intensidade do vácuo sobre a concentração de íons na solução extraída. Segundo Gloaguen et al. (2009), aplicando-se tensões menores, coletar-se-á solução do solo em maior parte da água oriunda dos macroporos, caracterizada como capilar gravitacional, apresentando menor concentração de íons (MARQUES et al., 1996; LACLAU et al., 2003). Ranger, Marques e Jussy (2001) afirmam que a qualidade da solução coletada varia de acordo com a tensão aplicada nos extratores, sendo a solução mais concentrada em altas tensões, e mais diluída sob baixas tensões.

No entanto, outros autores verificaram que não há interferência da intensidade do vácuo sobre a concentração de íons na solução extraída por extratores de cápsulas



porosas, sendo o efeito significativo apenas para o volume de solução coletada (POSS et al., 1995). Beier e Hansen (1992) verificaram que diferentes intensidades de vácuo não interferiram na concentração iônica. Resultados estes semelhantes aos encontrados no presente trabalho.

Foram obtidas equações de regressão que possibilitam explicar significativamente a condutividade elétrica da solução extraída em relação à condutividade elétrica da solução aplicada (Figura 25A). Para ambos os solos, as equações lineares apresentaram os melhores ajustes, com elevados coeficientes de determinação ( $R^2 > 0,98$ ). Inicialmente os valores da solução extraída são superiores aos valores obtidos na solução aplicada, sendo observado comportamento inverso com o aumento da salinidade na solução. A partir das equações de regressão, verifica-se uma subestimativa em cerca 30% e 20%, nos solos argiloso e arenoso, respectivamente. Verifica-se ainda que nas menores concentrações da solução aplicada os maiores valores foram obtidos no solo argiloso, no entanto, essa diferença foi reduzida à medida que se aumentou a concentração de íons na solução.

Segundo Ferreira e Martinez (1997), a condutividade elétrica depende, além de outros fatores, do número de cargas iônicas presentes na solução, cargas das espécies iônicas, mobilidade de cada íon, área efetiva dos eletrodos e distância entre os eletrodos. Para Richards (1954), o teor e o tipo de argila predominante no solo podem agir como interferentes na concentração de íons na solução e, conseqüentemente, no valor da CE. A argila age como um acumulador de íons por meio sistemático de adsorção e posterior dessorção iônica, sendo influenciada principalmente pela temperatura e concentração iônica da solução. Assim, quanto maior as concentrações de íons específicos, maior será a adsorção deste no complexo coloidal.

Extratores providos de cápsulas porosas tem sido utilizados com bastante ênfase para monitoramento da condutividade elétrica por diversos pesquisadores (SILVA et al., 2000; DIAS et al., 2005; LEONARDO et al., 2007; ELOI; DUARTE; SOARES, 2007), sendo obtidos resultados bastante satisfatórios.

A condutividade elétrica da solução coletada não foi afetada significativamente pelas intensidades de vácuo (Figura 25B), em nenhum dos solos estudados, desta

forma, não foi possível ajustar equações de regressão que explicasse tal fenômeno, apesar de se observar uma leve tendência de aumento para o solo arenoso, e de redução para o solo argiloso, em decorrência do acréscimo do vácuo aplicado. Esse comportamento pode ser explicado pela ausência de resposta às intensidades de vácuo quanto a concentração de íons na solução extraída pelos extratores, uma vez que a condutividade elétrica de uma solução está diretamente relacionada com a concentração de íons (NUNES FILHO et al., 2000; ANDRADE et al., 2002; RIBEIRO; MAIA; MEDEIROS, 2005; D'ALMEIDA et al., 2005; BATISTA; SOARES; SANTOS, 2006).

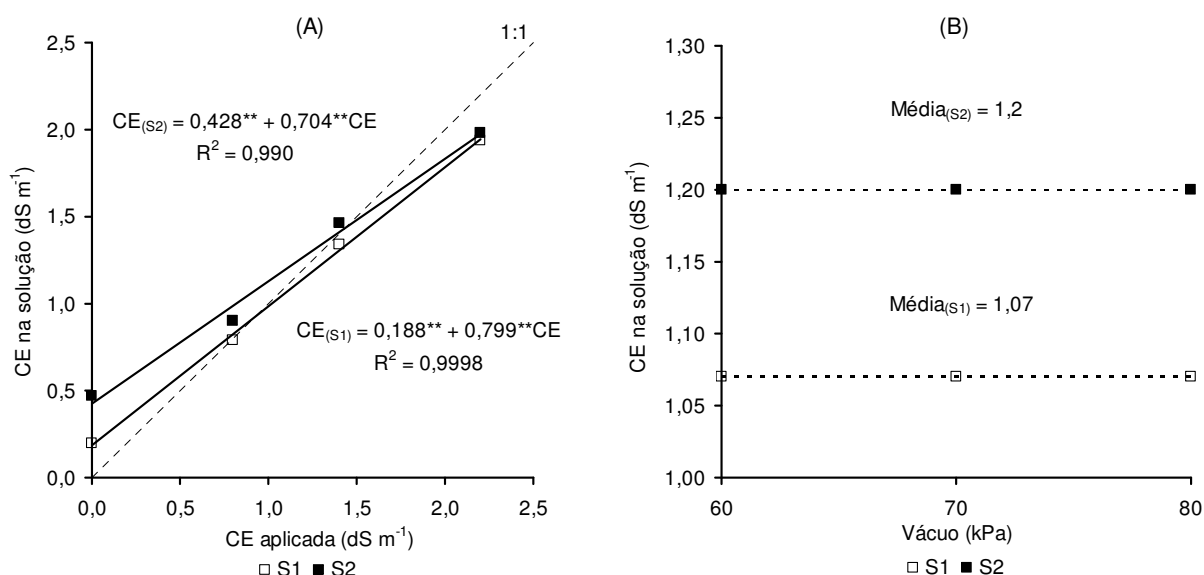


Figura 25 – Condutividade elétrica (CE) da solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função da condutividade elétrica da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

O pH das soluções aplicadas foram reduzindo a medida que se aumentou a concentração de sais na solução (Figura 26A), partindo de uma água desionizada com pH de 7,01, para um pH de 5,2 na solução com maior concentração salina. Esse efeito já era esperado, pois, sabe-se que o pH de uma solução varia conforme a concentração eletrolítica.

Para os dois tipos de solo, foram obtidos valores de pH na solução extraída via extratores acima dos determinados na solução aplicada. Esses resultados estão de acordo com Suarez (1987), que também verificou aumento dos valores de pH em decorrência do uso de cápsulas na extração de solução de solo. No entanto, os resultados encontrados neste trabalho diferem, em parte, dos obtidos por Silva, Rosolem e Wong (2004), que observaram redução no pH da solução coletada com extratores, em relação ao pH da solução aplicada. Porém, vale salientar que esses autores trabalharam com as cápsulas imersas apenas em água, além de que as características físico-químicas dos solos, bem como a composição e tipo de fertilizantes utilizados e todas demais interações, interferem no potencial hidrogeniônico.

Para o solo arenoso ( $S_1$ ) verifica-se uma resposta linear crescente, com um coeficiente angular de 0,165, de forma que a partir da equação de regressão, o pH da solução coletada é superior em 16,5% em relação ao pH da solução aplicada. Enquanto que para o solo argiloso ( $S_2$ ), verificou-se resposta inversa, sendo o pH da solução extraída inferior ao pH da solução aplicada em cerca de 15,3%.

Avaliando o efeito da intensidade do vácuo no pH da solução extraída (Figura 26B), verifica-se uma redução em decorrência do aumento da tensão aplicada, independente do solo analisado, apesar de não ser possível obter uma equação de regressão que explicasse significativamente esse efeito.

Sabe-se que o aumento na tensão aplicada nos extratores favorece a extração de solução contida nos microporos do material de solo, onde os valores de pH tendem a serem menores, devido a presença de íons de hidrogênios na superfície das argilas (força de Van der Waals), e pela interação com os silicatos ( $H_4SiO_4$ ) que acidificam a solução (GERARD et al., 2003; LACLAU et al., 2003; GEIBE et al., 2006).

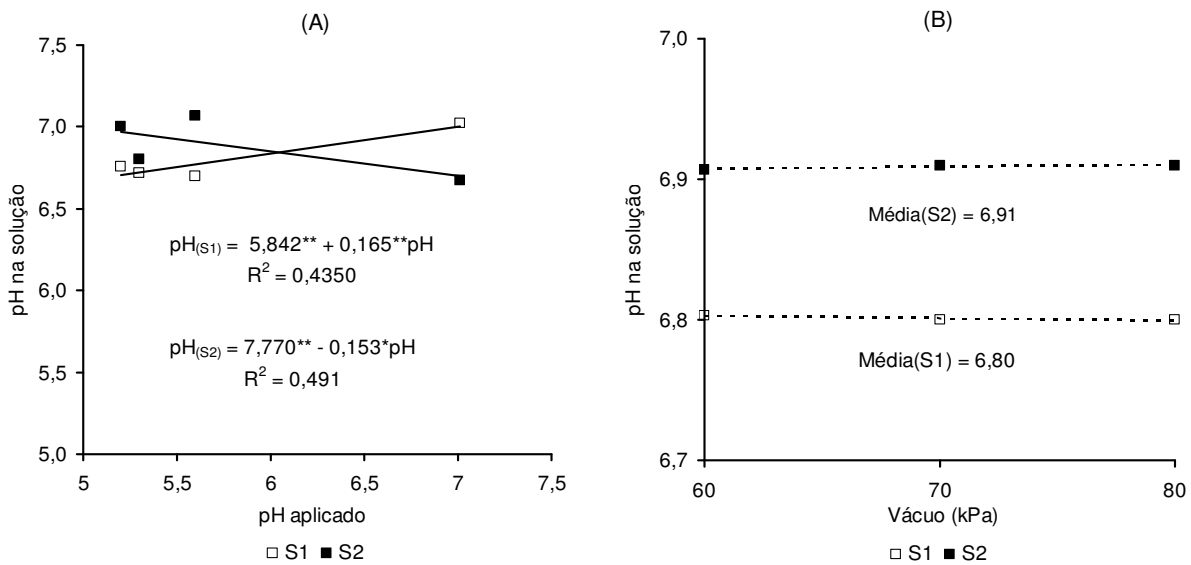


Figura 26 – pH da solução extraída em solo Franco Arenoso (S<sub>1</sub>) e Franco Argiloso (S<sub>2</sub>) em função dos diferentes potenciais hidrogeniônicos da solução aplicada (A) e da intensidade do vácuo (B), Experimento II

### 2.3.6 Teste de fósforo remanescente

Tendo em vista que a solução obtida tanto via extratores, quanto via pasta saturada, não apresentaram teor mínimo de fósforo possível de ser detectado pela análise laboratorial. Realizou-se para ambos os solos um teste de fósforo remanescente.

O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado para os dois solos com três repetições, utilizando-se a solução de equilíbrio após a agitação de cada amostra de solo de 5 cm<sup>3</sup> com 50 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> com concentração de 10 mmol L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, durante 24 horas (ALVAREZ; FONSECA, 1990).

O resultado revelou 12 e 7 mg L<sup>-1</sup> de fósforo remanescente na solução de equilíbrio, mostrando assim o elevado poder de adsorção deste elemento aos sítios dos colóides do solo arenoso e argiloso, respectivamente. Além disso, verifica-se um maior poder de adsorção do P no solo argiloso, sendo que 88% do fósforo adicionado foram retidos nos sítios de adsorção das estruturas físicas, e/ou em compostos de Al, Fe e Ca (FURTINI NETO et al., 2001).

A maior concentração de fósforo utilizada neste trabalho, foi de 28,35 mg L<sup>-1</sup> para o maior nível de fertirrigação no segundo experimento; mesmo assim, a dose não foi suficiente para que o fósforo preenchesse os sítios de adsorção e ficasse lábil em solução, por este motivo não foi detectada sua presença na solução obtida via cápsulas, bem como via pasta saturada.

### **2.3.7 Relação da concentração iônica e condutividade elétrica determinadas nas soluções extraídas via cápsula porosa e no extrato de saturação**

A comparação entre as concentrações iônicas determinadas na solução do solo via cápsulas porosas e corrigidas para umidade de saturação e as determinadas no extrato coletado na pasta saturada são demonstradas na Figura 27.

Visando auxiliar a comparação dos métodos, utilizaram-se os índices estatísticos propostos por Willmott (1981) e Kolmogorov-Smirnov apresentados por Campos (1983); os mesmos estão representados simbolicamente por “d” e “D”, respectivamente.

As determinações de nitrato nas amostras obtidas pelas duas metodologias apresentaram boa correlação ( $R^2=0,8826$ ), ou seja, podendo-se constatar que a concentração de nitrato estimada usando a concentração na solução do solo com correção para umidade de saturação subestimou em média o medido no extrato saturado em 6% (Figura 27). O índice de concordância de Willmott de 0,98 mostra que a metodologia proposta nesse trabalho tem uma boa exatidão em relação a metodologia padrão de determinação no extrato de saturação. O D calculado de Kolmogorov-Smirnov de 0,15 foi inferior ao tabelado (0,652), representando assim que os métodos não diferiram estatisticamente entre si (Figura 27A).

Para o potássio (Figura 27B) verificou-se um ajuste significativo ( $p<0,01$ ), com subestimativa de 6%, um coeficiente de correlação de 0,9968, índice de Willmott de 0,99 representando que os pontos não mostraram dispersão elevada em relação à reta 1:1 e D calculado igual a 0,16, sendo inferior ao valor tabelado no teste, mostrando que os métodos comparados não diferem significativamente entre si. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2000) ao monitorarem as

concentrações de potássio na solução do solo com cultivo de tomates, concluindo que a concentração deste íon pode ser determinada com boa precisão na solução obtida via extratores providos de cápsulas porosas.

Verifica-se para o nitrato e o potássio que nas menores concentrações os valores aproximam-se da reta 1:1, afastando-se nos maiores valores, indicando possivelmente uma maior solubilização dos sais pelo método da pasta, tendo em vista que sua umidade é maior em relação à umidade do solo onde se encontrava as cápsulas extratoras.

Para a concentração de cálcio e magnésio na solução em ambos os solos, quando comparados entre as metodologias, apresentaram satisfatórios coeficientes de determinação (0,8991 e 0,9985), respectivamente, não diferindo-se entre as metodologias de acordo do índice de Kolmogorov-Smirnov. Sendo que para o cálcio não houve elevada dispersão dos pontos em relação à reta 1:1, com índice de 0,94, sendo que o mesmo não foi observado por o magnésio, que apresentou elevada dispersão ( $d=0,77$ ), e as concentrações corrigidas em função da umidade superestimaram em 9 e 50% os valores de concentração iônica do cálcio e magnésio determinados na solução obtida da pasta saturada para os dois solos estudados (Figuras 27C e 27D).

Observa-se ainda que os valores de concentração de cálcio obtidos na solução do extrato saturado são inferiores aos determinados na solução obtida via extratores, possivelmente devido à reação do cálcio com outros sais, como por exemplo, formação de sulfato de cálcio ocorrendo precipitação e indisponibilidade do cálcio, mesmo na pasta com elevado teor de água, não foi possível liberar o cálcio para a solução, sendo que alguns sais requerem muita umidade e bastante tempo para disponibilizar íons em solução. O magnésio apresentou comportamento similar ao cálcio, afastando-se da reta 1:1 à medida que se aumentava a concentração, consequência do aumento de sua predisposição em associar-se com outros compostos do complexo sortivo do solo.

A concentração de sulfato apresentou comportamento distinto em relação às metodologias para os dois solos estudados (Figura 27E). Ambos os casos não diferiram com relação às metodologias de acordo com índice proposto por Kolmogorov-Smirnov,

apresentando valores calculados inferiores aos tabelados estatisticamente com base no número de observações e no grau de significância adotado (5%). Verificou-se ajuste significativo ao nível de 1% de probabilidade e coeficiente de determinação de 0,9761 e 0,9908 para o solo franco arenoso ( $S_1$ ) e franco argiloso ( $S_2$ ), respectivamente. Para o solo  $S_2$  constatou-se elevada dispersão dos valores em relação à reta 1:1, ou seja, valores inferiores de concentração foram obtidos na solução do extrato saturado do solo franco argiloso em relação a solução obtida via cápsulas porosa.

Fenômeno similar foi observado para cálcio anteriormente, reforçando desta maneira uma possível associação do sulfato com sais de cálcio, bem como, com outros sais, sendo a redução do sulfato mais expressiva que a do cálcio. Em se tratando de íons bivalentes, um cátion [ $Ca^{2+}$ ] reage com um anion [ $SO_4^{2-}$ ], essa diferença se deve à concentração de sulfato utilizada na fertirrigação (Tabela 1) ter sido inferior a concentração de cálcio.

Para o solo franco arenoso ( $S_1$ ) a concentração de sulfato subestima em 12% os valores de concentração encontrados na solução obtida no extrato saturado. Mesmo assim a concentração de [ $SO_4^{2-}$ ] foi bem similar em ambas as metodologias, constatando-se a elevada disponibilidade iônica no referido tipo de solo (Figura 27E)

Os valores de condutividade elétrica da solução do solo obtida com extratores providos de cápsula porosa correlacionadas ao método padrão, apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99, obtendo-se praticamente valores iguais para os dois métodos, superestimando em apenas 1% os valores de condutividade elétrica corrigida em função da umidade em relação à condutividade elétrica do extrato saturado. Apresentando ainda elevado índice de Willmott igual a 0,98 e não diferindo com relação as metodologias (Figura 27F).

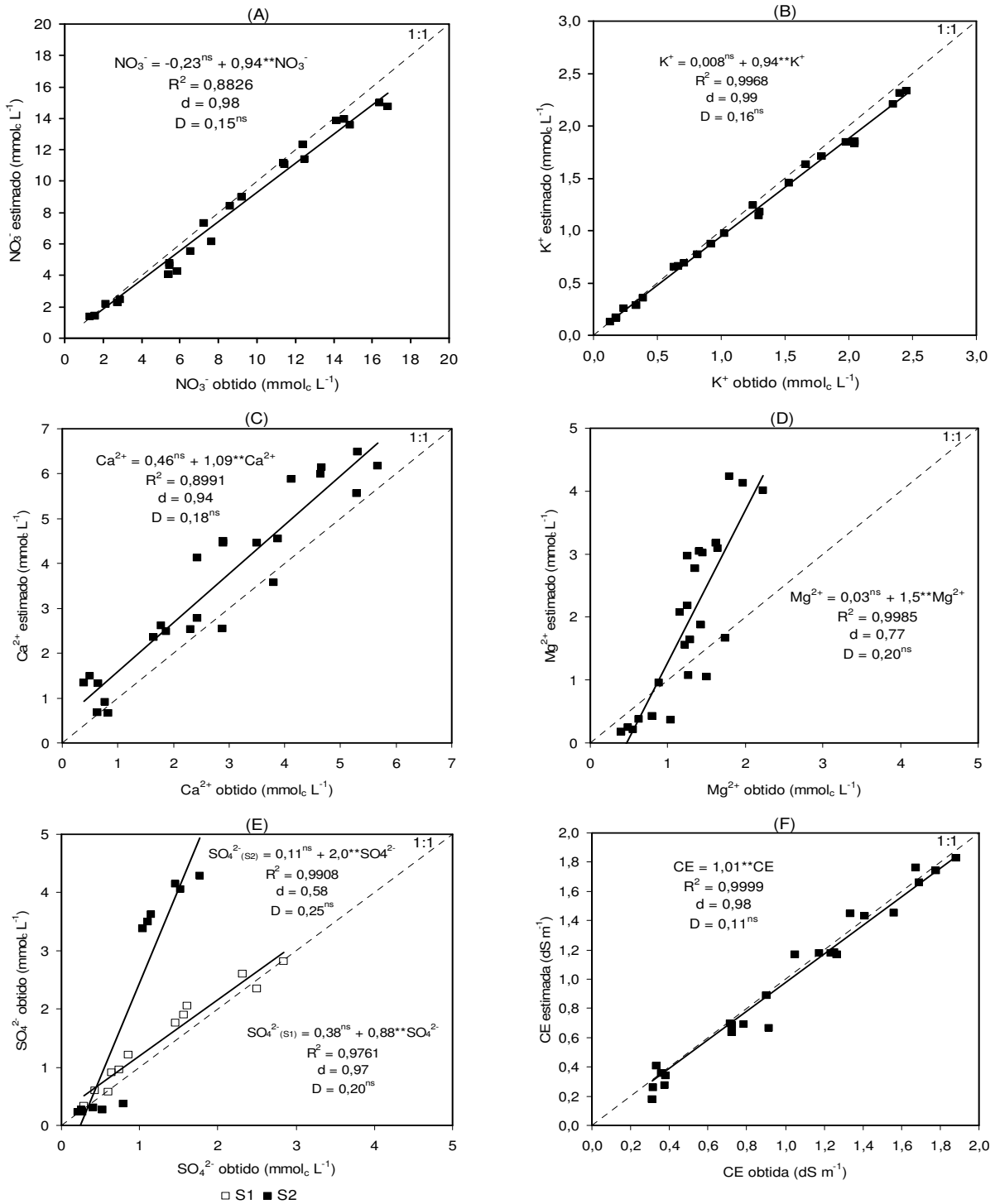


Figura 26 – Relação entre os valores de:  $[\text{NO}_3^-]$  (A),  $[\text{K}^+]$  (B),  $[\text{Ca}^{2+}]$  (C),  $[\text{Mg}^{2+}]$  (D),  $[\text{SO}_4^{2-}]$  (E) e CE (F) no extrato de saturação, obtidos e estimados a partir das concentrações na solução obtida com extratores de cápsula porosa com correção em função da umidade para ambos os solos utilizados no experimento II



Os resultados encontrados para as condições do presente estudo, no que diz respeito à concentração iônica e sua comparação entre os métodos de extração utilizando-se extratores providos de cápsulas porosas e da pasta saturada, diferem-se em parte dos resultados encontrados por Silva (2002) para os íons de cálcio, magnésio e sulfato, corroborando com o mesmo para os íons nitrato, potássio e condutividade elétrica.

Cabe salientar que as condições de estudo, os fertilizantes utilizados e tempo de monitoramento, são fatores relevantes e específicos no monitoramento da concentração iônica da solução do solo, tendo em vista sua grande variabilidade espacial e temporal, bem como a interferências e interações químicas, físicas e biológicas no meio.



### 3 CONCLUSÕES

Considerando as condições em que o presente estudo foi desenvolvido e com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- É possível, com auxílio de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão, monitorar o volume e a concentração iônica da solução extraída, bem como a variação de tensão em tempo real;
- Os transdutores de pressão apresentaram elevado desempenho, possibilitando o monitoramento da tensão no interior dos extratores em tempo real e instantâneo;
- O tempo mínimo necessário para que a concentração iônica na solução tendesse a um equilíbrio, foi de 30 horas após o evento de fertirrigação para ambos os solos estudados;
- O tempo de equilíbrio entre a aplicação do vácuo aos extratores providos de cápsulas porosas até o momento da coleta da solução, aumenta em função da redução de umidade, bem como com o incremento do vácuo aplicado aos extratores para ambos os solos;
- A redução da umidade proporcionou um aumento na concentração da solução para todos os íons avaliados e na condutividade elétrica, exceto para a concentração de sulfato e o volume coletado em ambos os solos, o potencial hidrogeniônico no solo Franco Arenoso foi reduzido, e não houve efeito significativo sobre o potássio no solo Franco Arenoso;
- O incremento do vácuo aplicado não afetou a concentração iônica da solução em ambos os solos, exceto para o potássio, o cálcio, o magnésio e o sulfato, que tiveram suas concentrações reduzidas na solução coletada em solo Franco Arenoso; o pH foi reduzido no solo Franco Argiloso e o volume coletado aumentou com o incremento de vácuo para ambos os solos;
- O aumento da concentração iônica da solução aplicada, proporcionou um aumento na concentração iônica e na condutividade elétrica da solução obtida, exceto o potencial hidrogeniônico que foi reduzido no solo Franco Argiloso; já o incremento do vácuo

aplicado não proporcionou efeito significativo para nenhum parâmetro avaliado em ambos os solos no Experimento II;

- Com a utilização de extratores providos de cápsulas porosas usados na extração de solução nos solos estudados, foi possível determinar a concentração de íons e condutividade elétrica com elevada precisão;

- A concentração de fósforo na solução aplicada não foi suficiente para que o mesmo ficasse disponível em solução, com isso denota-se a necessidade de maiores investigações da dinâmica deste elemento na fertirrigação.

## REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B.J. Soil processes and the behaviour of metals. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). **Heavy metals in soils**. Ipswich: John Wiley, 1990. p. 7-28.

ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.; NESS, R.L.L.; CRUZ, M.G.M. Modelagem da concentração de íons no extrato de saturação do solo, na Região da Chapada do Apodi. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 33, n. 2, p. 5-12, 2002.

BAR-YOSEF, B. Advances in fertirrigation. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 1-77, 2000.

BATISTA, R.O.; SOARES, A.A.; SANTOS, D.B. Riscos da fertirrigação com esgoto sanitário e as relações entre os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e a salinidade total. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 53, n. 307, p. 394-398, 2006.

BEIER, C.; HANSEN, K. Evaluation of porous cup soil-water samplers under controlled field conditions: comparison of ceramic and PTFE cups. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, n. 2, p. 261-271, 1992.

BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. O enxofre no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 17., 1988, Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA; IAPAR; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 11-29.

BLACK, A.S.; WARING, S.A. Adsorption of nitrate, chloride and sulphate by some Highly Weathered soils from South-East Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 17, n. 2, p. 271-282, 1979.

BLANCO, F.F. **Tolerância do tomateiro à salinidade sob fertirrigação e calibração de medidores de íons específicos para determinação de nutrientes na solução do solo e na planta**. 2004. 115 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

BURGUEÑO, H. **La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico**. Culiacán: BURSAR, 1996. v. 1, 45 p.

BURT, C.; CONNOR, K.; RUEHR, T. **Fertigation**. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 1998. 295 p.

CAMERON, F.K. **The soil solution: the nutrient medium for plant growth**. Easton: The Chemical Publ., 1911. 136 p.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4. ed. Piracicaba, ESALQ; FEALQ, 1983. 349 p.

CASARINI, E.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, E. F. F. Produtividade da roseira em função de doses de nitrogênio e potássio aplicadas via fertirrigação em ambiente protegido. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 19, n. 3, p. 250-256, 2007.

CASSEL, D. K.; KLUTE, A. Water potential: tensiometry. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p. 563-596.

CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. Especificação química da solução do solo para interpretação da absorção de cálcio e alumínio por raízes de cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 447-453, 1991.

COELHO, A. M. Fertirrigação. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. **Quimigação**: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação. Brasília: Embrapa, SPI, 1994. cap. 8, p.201-227.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 475-480, 2005.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 32, n. 2, p. 515-523, 2008.

D'ALMEIDA, D.M.B.A.; ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M.; NESS, R.L.L. Importância relativa dos íons na salinidade de um cambiossolo na Chapada do Apodi. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 615-621, 2005.

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

DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; MEDEIROS, J.F.; TELES FILHO, J.F. Salinidade e manejo da fertirrigação em ambiente protegido. I: efeitos sobre o crescimento do meloeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 208-218, 2006.

DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F.; FOLEGATTI, M.V. **Manejo da fertirrigação utilizando extratores de solução do solo**. Piracicaba: ESALQ, Divisão de Biblioteca e Documentação, 2004. 23 p. (Série Produtor Rural, 25).

DIAS, N.S.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; SILVA, E.F.F. Uso de extratores de cápsula porosa na determinação da salinidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. 1 CD ROM

DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 496-504, 2005.

DOMINGUEZ VIVANCOS, A. **Fertirrigacion**. Madrid: Mundi-Prensa, 1993. 217 p.

ELKINS, D.M.; ENSMINGER, L.E. Effect of soil pH on the availability of adsorbed sulfate. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, p.931-934, 1971.

ELOI, W.M. **Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre o cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) em ambiente protegido**. 2007. 110 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ELOI, W.M.; DUARTE, S.N.; SOARES, T.M. Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre características do tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 1, p. 83-89, 2007.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ENSMINGER, L.E. Some factors affecting the absorption of sulfate by Alabama. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 18, p. 259-264, 1954.

FERREIRA, P.A.; MARTINEZ, M.A. Movimento e modelagem de sais no solo. In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (Ed.). **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB; SBEA, 1997. cap. 6, p. 171-206.

FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A.; GARCIA, R.A. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão. II - concentração de cátions e ânions na solução do solo e absorção de nutrientes pelas plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 433-442, 2006.

FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 1999. 52 p. (IAC. Boletim Técnico, 180).

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R. do; RESENDE, A. V. de; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA; FAEPE, 252 p. 2001.

GÄRDENÄS, A.I.; HOPMANS, J.W.; HANSON, B.R.; SIMÜNEK, J. S. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 74, p. 219–242, 2005.

GEIBE, C. E.; DANIELSSON, R.; HEES, P. A. W. VAN; LUNDSTRÖM, U. S. Comparison of soil solution chemistry sampled by centrifugation, two types of suction lysimeters and zero-tension lysimeters. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 21, n. 12, p. 2096-2111, 2006.

GERARD, F.; RANGER, J.; MÉNÉTRIER, C.; BONNAUD, P. Silicate weathering mechanisms determined using soil solutions held at high matric potential. **Chemical Geology**, Salt Lake, v. 202, n. 3/4, p. 443-460, 2003.

GLOAGUEN, T.V.; PEREIRA, F.A.C.; GONÇALVES, R.A.B.; PAZ, V.S. Sistema de extração seqüencial da solução na macro e microporosidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 544-550, 2009.

GOMES, E.P. **Viabilidade de mudanças tecnológicas na irrigação da tomaticultura de mesa**. 2005. 96 p. Tese (Doutorado em Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GOMES, E.R.S.; SAMPAIO, S.C.; CORRÊA, M.M.; VILAS BOAS, M.A.; ALVES, L.F.A., SOBRINHO, A.T. Movimento de nitrato proveniente de água residuária em colunas de solos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 557-568, 2004.

GROSSMANN, J.; UDLUFT, P. The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 42, n. 1, p. 83-93, 1991.

HARWARD, M.E.; REISENAUER, H.M. Reactions and movement of inorganic soil sulfur. **Soil science**, Baltimore v. 101, p. 326-335, 1966.



HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOAGLAND, D.R.; MARTIN, J.C.; STEWART, G.R. Relation of the soil solution to the soil extract. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 20, n. 5, p. 381-395, 1920.

JIMÉNEZ, S.; ALÉS, J. I.; LAO, M. T.; PLAZA, B.; PÉREZ, M. Evaluation of nitrate quick tests to improve fertigation management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 2461–2469, 2006.

JORDAN, H.V.; ENSMINGER, L.E. The role of sulphur in soil fertility. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 10, p. 407-434, 1958.

KAMPRATH, E.J.; NELSON, W.L.; FITTS, J.W. The effect of pH, sulfate and phosphate concentrations on the adsorption of sulfate by soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 19, p. 463-466, 1956.

KLUTE, A; GARDNER, W.R. Tensiometer response time. **Soil Science**, Baltimore, v. 93, n. 1, p. 204-207, 1962.

LACLAU, J.P.; RANGER, J. ; NZILA J.D. ; BOUILLET, J.P.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 2. Chemical composition of soil solution. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 180, n. 1/3, p. 527-544, 2003.

LAO, M.T.; JIMÉNEZ, S.; EYMAR, E.; FERNÁNDEZ, E.J. Nutrient levels of the solution obtained by means of suction cups in intensive tomato cultivation. **Phyton**, Buenos Aires, v. 4, n. 7, p. 29-37, 2004.

LAO, M.T.; JIMÉNEZ, S.; EYMAR, E.; FERNÁNDEZ, E.J.; JIMÉNEZ, R. Determination of Spatial Variability of Nutrient Composition of Soil Solutions in Greenhouses by Using Suction Cups. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 5/6, p. 865-879, 2003.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531 p.

LEONARDO, M.; BROETTO, F.; VILLAS BOAS, R.L.; ALMEIDA, R.S.; MARCHESE, J.A. Produção de frutos de pimentão em diferentes concentrações salinas. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 73-82, 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica de água no solo**. 2. ed. Piracicaba: O autor, 2000. 509 p.

LORD, E.I.; SHEPHERD, M.A. Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 435-449, 1993.

MACINTIRE, W.H, SHAW, W.M. ROBINSON, B. The divergent behavior of  $KPO_3$  and  $K_2SO_4$  in soils, with and without limestone and dolomite. **Soil Science**, Baltimore, v. 59, p. 155-162, 1945.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1976. 528 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARIA, I.C.; ROSSETTO, R.; AMBROSANO, E.J.; CASTRO, O.M.; NEPTUNE, A.M.L. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 1, p. 87-98, 1993.

MARQUES, R., RANGER, J., GELHAYE, D., POLLIER, B., PONETTE, Q.; GÆDERT, O. Comparison of chemical composition of soil solutions collected by zero-tension plate lysimeters with those from ceramic-cup lysimeters in a forest soil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, n. 3, p. 407-417, 1996.

MARSH, K.B; TILLMAN, R.W; SYERS, J.K. Charge relationships of sulfate sorption by soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 2, p. 318-323, 1987.

MEDEIROS, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado**. 2007. 82 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1978. 593 p.

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 101-129.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Recife, v. 6, n. 2, p. 235-241, 2002.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; LIBARDI, P.L.; FOLEGATTI, M.V. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 677-685, 2005.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under a drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Wageningen, v. 22, n. 2, p. 163-90, 2000.

MORAES, J.F.V. Movimento de nutrientes em latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 85-97, 1991.

MORAES, J.F.V.; DYNIA, J.F. Uso de cápsulas porosas para extrair solução do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 10, p. 1523-1528, 1990.

MORRISON, R. D.; LOWERY, B. Effect of cups properties, sampler geometry and vacuum on the sampling rate of porous cup samplers. **Soil Science**, Baltimore, v. 149, p. 308-316, 1990.

MOTA, P.R.A.; VILLAS BOAS, R.L.; SOUSA, V.F. Concentração de sais da solução avaliada pela condutividade elétrica na zona radicular do crisântemo sob irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 532-542, 2006.

MUCHOVEJ, R.M.C; RECHCIGL, J.E. Impacts of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil processes and water quality**. Boca Raton: Lewis Publ., 1994. p. 91-135

NEU, V. **Influencia da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus – AM**. 2005. 93 p. (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NUNES FILHO, J; SOUSA, A.R.; SÁ, V.A.L.; LIMA, B.P. Relações entre a concentração de íons e a salinidade de águas subterrâneas e superficiais, visando à irrigação, no sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 189-193, 2000.

O'NEILL, M.K.; ROTH, R.L. Orthophosphoric acid as phosphorus fertilizer in trickle irrigation, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 283-286, 1979.

OSAKI, F. **Calagem e adubação**. 2. ed. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola, 1991. 503 p.

PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Ed.). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 11-84.

POSS, R.; NOBLE, A.D.; DUNIN, F.X.; REYENGA, W. Evaluation of ceramic cup samplers to measure nitrate leaching in the field. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 46, n. 4, p. 667-674, 1995.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 1996. 446 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RANGER, J.; MARQUES, R.; JUSSY, J. H. Forest soil dynamics during stand development assessed by lysimeter and centrifuge solutes. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 144, p. 129-145, 2001.

REEVE, R.C.; DOERING, E.J. Sampling the soil solution for salinity appraisal. **Soil Science**, Baltimore, v. 99, n. 5, p. 339-344, 1965.

RHOADES, J.D.; OSTER, J.D. Solute content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: ASA; SSSA, 1986. pt. 1. Agronomy, p. 995-1006. (Monograph 9).

RIBEIRO, G.M.; MAIA, C.E.; MEDEIROS, J.F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v. 9, n. 1, p. 15-22, 2005.

RICHARDS, L.A.. Methods for mounting porous plates used in soil moisture measurement. **Agronomy Journal**, Madison, v. 41, p. 489-490, 1949.

\_\_\_\_\_. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RIVERA, R.N.C.; DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Modelagem da dinâmica do potássio no solo sob irrigação por gotejamento: validação do modelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 388-394, 2006.

ROLSTON, D.E.; MILLER, R.J.; SCHULBACH, H. Management principles: fertilization. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D. **Trickle irrigation for crop production design operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 317-344.

SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. **Aferição do controle da irrigação feito pelos agricultores utilizando tensiômetros de faixas**. São Paulo: IPT, 1994. 15 p. (IPT, Comunicação Técnica).

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R. A. Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 80-94, 1986.

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

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

SILVA, E.F.F.; ANTI, G.R.; CARMELLO, Q.A.C.; DUARTE, S.N. Extratores de cápsulas porosas para o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução de um solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 785-789, 2000.

SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; FOLEGATTI, M.V.; ROJAIS, E.G. Utilização de testes rápidos e extratores de solução do solo na determinação de nitrato e potássio. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 460-467, 2003.

SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D.; DUARTE, S.N.; FERREIRA, Y.R.P. Determinação da salinidade do solo utilizando extratores de cápsulas porosas e soluções diluídas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1999, Pelotas, **Anais...** Pelotas: SBEA, 1999. 1 CD ROM.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A.; WONG, J. Liberação de cálcio e magnésio por cápsulas porosas de porcelana usadas na extração de solução do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 605-610, 2004.

SILVA, T.S.M.; PAZ, V.P.S.; COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SANTANA, G.S. Condutividade elétrica da solução de solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo sob aplicação de cloreto de potássio com uso da reflectometria do domínio do tempo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 174-183, 2005.

SMETHURST, P.J. Soil solution and other soil analyses as indicators of nutrient supply: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n. 1/3, p. 397-411, 2000.

SOUSA, V.F. **Níveis de irrigação e doses de potássio aplicadas via fertirrigação por gotejamento no maracujazeiro amarelo**. 2000. 178 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2000.

SOUSA, V.F.; SOUZA, A.P. Fertirrigação II: Tipos de produtos, aplicação e manejo. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 47, p. 15-20, 1992.

SOUZA, A.L.; MATSURA, E.E.; MIRANDA, J.H.; ROQUE, M.W.; BIZARI, D.R.; ROQUE, W. Reflectometria no domínio do tempo em estudos de lixiviação de potássio em colunas de solo não-saturado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1219-1222, 2009.

SOUZA, T.R. **Dinâmica de nutrientes no perfil do solo em sistemas de adubação sólida e fertirrigação na citricultura**. 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2006.

SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R. **Potassium in agriculture: phosphate potash**. Atlanta: American Society of Agronomy; Phosphate Institute, 1985. p. 201-276.

SUAREZ, D.L. Prediction of pH errors in soil:water extractors due to degaussing. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 64-67, 1987.

TAVARES, A.C.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade para a cultura do pimentão (*Capsicum annuum*) utilizando medidores de íons da solução do substrato**. 2005. 101 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

TOWNER, G.D. Theory of time response of tensiometers. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 607- 621, 1980.

VALERO, R.M.M. **Uso da técnica da "TDR" na estimativa da umidade e condutividade elétrica em substratos orgânicos**. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Água e Solo.) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

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

VILLAS BÔAS, R.L.; ANTUNES, C.L.; BOARETTO, A.E.; SOUSA, V.F.; DUENHAS, L.H. Perfil da pesquisa e emprego da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V.; CASARINI, E.; BLANCO, F.F.; BRASIL, R.P.C.; RESENDE, R.S. (Coord.). **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 2001. v. 2, cap. 3, p. 71-103.

WAGNER, G.H. Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. **Soil Science**, Baltimore, v. 94, p. 379-387, 1962.

WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York: Wiley, 1994. 345 p.

YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E.; KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1108-1115, 1998.

ZHANG, G.Y; YU; T.R. Coordination adsorption of anions. In: YU, T.R. **Chemistry of variable charge soils**. New York: Oxford University Press, 1997. p. 175-218.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)