

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia  
Área de Concentração: Solos



Tese

**Atributos físicos, hídricos e químicos de solos em  
sistemas de produção de morango em Turuçu-RS**

**Adilson Luís Bamberg**

Pelotas, 2010.

**ADILSON LUÍS BAMBERG**

**ATRIBUTOS FÍSICOS, HÍDRICOS E QUÍMICOS DE SOLOS EM  
SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO EM TURUÇU-RS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Solos).

**Orientador:** Professor Dr. Luís Carlos Timm

**Co-orientadores:** Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto  
Professor Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto

Pelotas, 2010.

Dados de catalogação na fonte:  
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901  
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

B199a Bamberg, Adilson Luís  
Atributos físicos, hídricos e químicos de solos em sistemas de produção de morango em Turuçu-RS / Adilson Luís Bamberg ; orientador Luís Carlos Timm ; co-orientador Eloy Antonio Pauletto, Luiz Fernando Spinelli Pinto. – Pelotas, 2010. – 101f. ; il. – Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Área de concentração em Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2010.

1.Solos. 2.Variações temporais. 3.Qualidade do solo.  
4.*Fragaria X ananassa* Duch. 5.Morango. 6.Turuçu (RS).  
I.Timm, Luís Carlos. II.Pauletto, Eloy Antonio. III.Pinto, Luiz Fernando Spinelli. IV.Título.

CDD: 631.34

**ADILSON LUÍS BAMBERG**

**ATRIBUTOS FÍSICOS, HÍDRICOS E QUÍMICOS DE SOLOS EM  
SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO EM TURUÇU-RS**

Data da defesa: 02/07/2010

Banca examinadora:

---

Prof. José Miguel Reichert, PhD  
Universidade Federal de Santa Maria

---

Pesq. Dr. Carlos Reisser Júnior  
Embrapa Clima Temperado

---

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl  
Universidade Federal de Pelotas

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Liane Rodrigues de Lima  
Universidade Federal de Pelotas

Dedico:

Aos meus pais Roque e Lucia, pela educação, exemplos e princípios;

Aos meus irmãos César, Rogério e Igor, pelo apoio;

À minha esposa Jane e minha filha Fernanda, minhas inspirações.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Luís Carlos Timm, pela orientação deste trabalho, pela incansável luta por oportunidades e acima de tudo, por acreditar no potencial das pessoas.

Aos professores Eloy Antonio Pauletto e Luiz Fernando Spinelli Pinto, pela co-orientação, dedicação, sabedoria e experiências repassadas.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de doutorado no país e de doutorado-sanduíche no exterior.

Ao Departamento de Manejo do Solo da Universidade de Ghent, Bélgica, especialmente aos professores Donald Gabriels e Wim Cornelis, pela orientação e apoio à realização deste trabalho e do doutorado-sanduíche.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Aos funcionários do escritório da Emater de Turuçu, RS, Luís Carlos Philipsen, Dalgisa Philipsen, Lauro Francisco Schneid e às estudantes Carina Costa Estrela e Gabrieli Cunha Pereira, pelo apoio no trabalho de campo e contato com os produtores rurais envolvidos neste estudo.

Aos quinze produtores de morango de Turuçu, por permitir a utilização das suas áreas de produção de morango neste estudo.

Aos funcionários, bolsistas e estagiários do Departamento de Solos da UFPel, Paulo Antunes, Rosane Guidotti, Irani Ianarella, Leonardo Furtado, Wildon Panziera, Thiago da Silva, Guilherme Miritz, Guilherme Bartels, Gil Cunegatto Marques Neto, Cristiane Deuner e Marcio Nunes, pelo auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Agronomia, a citar: Gláucia, Carla, Magali, Leandro, Marcos, Roberto, Katiúscia, Marla, Fernanda, Juliana, Fioravante, Daiane, Luiz Henrique, Samira, Álvaro, Rul, Jose Parfitt, Ivan, Márcio, Otávio, Jonas, Vaírton, Manuel, Cecília, Fernanda, Jaqueline, Giulia e tantos outros, pela amizade, convívio e apoio em todos os momentos.

Ao professor Donald Nielsen e sua esposa Joanne, bem como ao professor Klaus Reichardt e sua esposa Ceres, pela amizade, pelos ensinamentos e pelos exemplos de vida.

Especialmente à minha esposa Jane, pelo incentivo, carinho, compreensão, apoio incondicional mesmo durante o longo tempo de afastamento, sempre me ajudando a superar as dificuldades.

Aos parentes, demais amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a viabilização deste sonho, um sincero muito obrigado.

## Resumo

BAMBERG, Adilson Luís. **Atributos físicos, hídricos e químicos de solos em sistemas de produção de morango em Turuçu-RS**. 2010. 100p. Tese - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

O revolvimento durante o preparo do solo e o uso da fertirrigação e de cobertura plástica afetam o manejo de sistemas de produção de morango, resultando em variações temporais dos atributos físicos, hídricos e químicos do solo ao longo do ciclo produtivo. Este trabalho teve o objetivo de determinar e compreender as alterações dos atributos físicos, hídricos e químicos de solos ao longo de um ciclo produtivo de morango em Turuçu, RS, bem como identificar os principais indicadores de qualidade desses solos utilizando a análise fatorial. Amostras de solo com estrutura preservada e não preservada foram coletadas na camada de 0,00-0,20m, em 15 áreas de produção de morango, em quatro diferentes tempos, destinadas à determinação das variáveis: diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e distribuição de agregados em classes de tamanho, porosidade total (TotPOR), macroporosidade (MacPOR) e microporosidade (MatPOR), curva de retenção de água no solo, parâmetro "S", capacidade de água disponível (CAD), capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo (CADs), densidade de partículas (Dp), densidade do solo (BulkDENS), granulometria, carbono orgânico (CO), Nitrogênio total (N), capacidade de troca de cátions (CTCefetiva), saturação por bases (V) e Respiração Basal (RB). Obteve-se o extrato de saturação do solo, do qual foram determinados: pH, condutividade elétrica (CEs),  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , razão de adsorção de sódio (RAS) e porcentagem de sódio trocável (PST). Realizou-se ainda a análise fatorial de 12 atributos dos solos utilizados na produção de morango em Turuçu para sintetizar a informação total em poucos fatores. Os atributos físicos, hídricos e químicos dos solos dos canteiros de produção de morango foram sujeitos a variações temporais significativas. O revolvimento do solo executado na construção de canteiros afetou as relações sólidos-poros, tornando o solo estruturalmente instável. Com o tempo, a estrutura do solo e tamanho dos poros sofreram modificações importantes, aumentando a CAD de modo a ser possível a redução da frequência dos eventos de irrigação. A concentração de nutrientes no extrato de saturação decaiu ao longo do ciclo produtivo, mas não o suficiente para impedir a ocorrência de salinização do solo. A análise fatorial possibilitou a síntese de 12 atributos em apenas três fatores: a agregação do solo, a capacidade do solo em armazenar água e ar nos poros, e a fertilidade química do solo. Sete atributos (CO, N, DMP, MacPOR, CAD, V, e pH) que compõem os três fatores obtidos foram selecionados como indicadores da qualidade do solo em áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. De forma geral, pode-se afirmar que os solos utilizados na produção de morango em Turuçu, RS tiveram suas condições físicas, hídricas e químicas melhoradas ao final do ciclo produtivo.

**Palavras-chave:** variações temporais, qualidade do solo, *Fragaria X ananassa* Duch.

## Abstract

BAMBERG, Adilson Luís. **Soil physical, hydric and chemical attributes in strawberry production systems in Turuçu-RS.** 2010. 100p. Thesis – Graduate Program in Agronomy, Area of Concentration: Soils. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brasil.

Plowing during soil preparation and the use of fertigation and plastic mulching affects the management of strawberry production systems, resulting in temporal variations of soil physical, hydric and chemical attributes throughout the strawberry production cycle. This work had the objective of assessing and understanding the temporal variations of physical, hydric and chemical attributes during the strawberry production cycle in Turuçu, RS, Brazil, and to identify soil quality indicators of these soils by factor analysis. Soil samples with undisturbed and disturbed structure were collected in the 0,00-0,20m top layer of 15 strawberry production areas at four different times to determine the following variables: aggregate mean weight diameter (MWD), aggregate size distribution, total porosity (TotPOR), macroporosity (MacPOR), microporosity (MatPOR), soil water retention curve, “S” parameter, available water capacity (CAD), available water capacity considering soil salinity (CADs) particle density (Dp), bulk density (BulkDENS), particle size distribution, organic carbon (CO), total Nitrogen (N), cation exchangeable capacity (CECeffective), base saturation (V) and basal respiration (RB). Soil saturation extract was obtained, from which it was determined: pH, electric conductivity (ECs), potassium, sodium, calcium, magnesium, sodium adsorption rate (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP). Moreover, a factor analysis of 12 soil attributes from strawberry production systems was conducted to reduce the total information in few factors. Physical, hydric and chemical attributes of the soil from strawberry production seedbeds were subjected to temporal variations. Soil preparation that was executed for seedbed’s construction affected the solid-pores relations, and soil became structurally unstable. With time, soil structure and pore sizes were subjected to significant modifications in the way that the available water capacity was increased, allowing a reduction on the frequency of irrigation events. Concentration of nutrients in the soil saturation extract was diminished during the productive cycle, but it was not enough to forbid soil salinization. Factor analysis resulted in the synthesis of 12 attributes to only three factors: soil aggregation, soil capacity to store water and air in the pores, and soil chemical fertility. Seven attributes (CO, N, MWD, MacPOR, CAD, V, and pH) that compose the three yielded factors were selected as soil quality indicators in strawberry production areas in the region of Turuçu, RS, Brazil. In general, it can be affirmed that the soils involved on strawberry production in Turuçu, RS, Brazil had improved their physical, chemical and hydric conditions at the end of production cycle.

**Keywords:** temporal variations, soil quality, *Fragaria X ananassa* Duch.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Regiões Fisiográficas do Rio Grande do Sul.....	17
<b>Figura 2.</b> Mapa de Solos do Município de Turuçu, RS, Brasil. ....	19
<b>Figura 3.</b> Erosão hídrica em sulcos nas áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	23
<b>Figura 4.</b> Construção de canteiros para a produção de morango: a) revolvimento do solo já lavrado com enxada rotativa encanteiradora; b) lavoura pronta para receber a cobertura de plástico preto, o sistema de irrigação por gotejamento e as mudas de morango. ....	27
<b>Figura 5.</b> Canteiros com o morangueiro em estágio vegetativo: a) cobertura plástica do solo; b) em detalhe, as mangueiras com gotejadores utilizados na fertirrigação. ....	30
<b>Figura 6.</b> Localização das 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	34
<b>Figura 7.</b> Variação temporal das médias de porosidade total (TotPOR), macroporosidade (MacPOR), microporosidade (MatPOR) e densidade do solo (BulkDENS) em 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ...	39
<b>Figura 8.</b> Variação temporal de seis classes de tamanho de agregados (C1, C2, C3, C4, C5 e C6) separados por peneiramento úmido em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	42
<b>Figura 9.</b> Variação temporal do diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água em 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	43

<b>Figura 10.</b> Variação temporal do conteúdo de água na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e da capacidade de água disponível (CAD) dos solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	45
<b>Figura 11.</b> Variações temporais dos valores médios do parâmetro S de solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, Brasil. ....	47
<b>Figura 12.</b> Gráfico de distribuição das médias mensais de uma série histórica de 30 anos (normais climatológicas de 1971 a 2000) da temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial. ....	52
<b>Figura 13.</b> Regressão linear entre a condutividade elétrica na solução 1:5 ( $CE_{1:5}$ ) e no extrato de saturação (CEs) de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	54
<b>Figura 14.</b> Variação temporal de atributos químicos do extrato de saturação de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	59
<b>Figura 15.</b> Variação temporal da porcentagem de sódio trocável (PST) e da razão de adsorção de sódio (RAS) do extrato de saturação de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	62
<b>Figura 16.</b> Capacidade de água disponível obtida da forma tradicional (CAD, considerando CC e PMP) em relação à capacidade de água disponível calculada considerando a salinidade (CADs) dos solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	64
<b>Figura 17.</b> Comparação do comportamento de dois solos cultivados com morango em Turuçu, RS, com formatos das curvas de retenção distintos e dois níveis de salinidade. À esquerda, solo com baixo valor de condutividade elétrica do extrato de saturação ( $CEs = 0,9 \text{ dS m}^{-1}$ ), e à direita com alto valor de $CEs = 6,4 \text{ dS m}^{-1}$ . A-B) Curvas de retenção de água no solo ajustadas pelo modelo de Groenevelt et al. (2004); C-D) CEs e o correspondente potencial mátrico em que ocorre o ponto de murcha permanente (PMP); E-F) capacidade de água disponível considerando a salinidade (CADs) de dois solos em função da CEs. ....	66
<b>Figura 18.</b> Representação espacial dos atributos que compõe os três fatores selecionados pela análise fatorial. ....	80

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Indicadores da qualidade do solo e alguns processos que eles afetam. ..	22
<b>Tabela 2.</b> Características físicas da camada de 0,0-0,2 m do solo de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil .....	35
<b>Tabela 3.</b> Coeficientes de correlação de Pearson de CEs, pH, Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> e SB do extrato de saturação do solo de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	63
<b>Tabela 4.</b> Indicadores da qualidade do solo relacionados com as funções requeridas de um solo quanto à produção agrícola e proteção ambiental. ....	74
<b>Tabela 5.</b> Estatística descritiva de 12 atributos do solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	76
<b>Tabela 6.</b> Matriz dos coeficientes de correlações entre 12 atributos do solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	76
<b>Tabela 7.</b> Comunalidades dos 12 atributos de solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	77
<b>Tabela 8.</b> Autovalores, parcela da variância e variância acumulada resultante da análise fatorial usando a matriz de correlação de dados padronizados de 12 atributos de solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	78
<b>Tabela 9.</b> Pesos ou cargas fatoriais obtidos após a rotação de eixos dos 12 atributos determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil. ....	79

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Aspectos gerais da produção de morango em Turuçu-RS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Solos do município de Turuçu-RS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Qualidade do solo e a produção de morango .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Degradação do solo e a produção de morango em Turuçu-RS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5. Variabilidade temporal dos atributos do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6. Salinidade do solo: extrato de saturação e atributos químicos .....</b>	<b>29</b>
<b>3. ARTIGO 1 – VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Introdução.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Material e Métodos .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1. Área de estudo .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.2. Coleta e preparo de amostras.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.3. Análises físicas e hídricas do solo.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.4. Análise estatística.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3. Resultados e Discussão .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1. Atributos físicos do solo .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.2. Atributos hídricos do solo .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4. Conclusões .....</b>	<b>47</b>
<b>4. ARTIGO 2 – SALINIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO CULTIVADAS SOB FERTIRRIGAÇÃO .....</b>	<b>49</b>

<b>4.1. Introdução</b> .....	<b>49</b>
<b>4.2. Material e Métodos</b> .....	<b>51</b>
4.2.1. Áreas de estudo .....	51
4.2.2. Coleta e preparo de amostras.....	52
4.2.3. Análises laboratoriais.....	53
4.2.4. Capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo	54
4.2.5. Análise estatística.....	57
<b>4.3. Resultados e Discussão</b> .....	<b>57</b>
4.3.1. Variação temporal do extrato de saturação do solo .....	57
4.3.2. Capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo	64
<b>4.4. Conclusões</b> .....	<b>67</b>
<b>5. ARTIGO 3 – SELEÇÃO DE INDICADORES DA QUALIDADE DE SOLOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE MORANGO EM TURUÇU, RS ATRAVÉS DA ANÁLISE FATORIAL</b> .....	<b>68</b>
<b>5.1. Introdução</b> .....	<b>68</b>
<b>5.2. Material e Métodos</b> .....	<b>70</b>
5.2.1. Áreas de estudo .....	70
5.2.2. Manejo do solo das áreas estudadas.....	71
5.2.3. Coleta de amostras de solo .....	71
5.2.4. Análise estatística dos atributos do solo .....	72
<b>5.3. Resultados e Discussão</b> .....	<b>75</b>
<b>5.4. Conclusões</b> .....	<b>82</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>84</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>99</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A utilização do solo para fins agrícolas implica na modificação dos seus atributos físicos, químicos e biológicos que se apresentam em seu estado natural. A partir da definição de solo como um sistema trifásico, com corpo organizado e inter-relação entre seus componentes, modificando-se continuamente através do fluxo dinâmico de matéria e energia, entende-se que o solo passa por modificações de suas propriedades. Essas modificações são o resultado da ação simultânea de interferências naturais e humanas, mas a dinâmica, a intensidade e as consequências das ações humanas é que prevalecem.

Os solos possuem características peculiares, as quais refletem necessariamente sua história, os processos pedogenéticos, seus fatores de formação e a sua natureza. A ação antrópica sobre o solo é capaz de ampliar a sua capacidade agrícola mas, eventualmente, ela também é desorientada, desordenada e degradante. Em certos casos, o homem pode ser considerado, ainda que de maneira não convencional, como um dos fatores de formação do solo, dado o nível de intervenção em diversas situações. A mistura de horizontes em solos revolvidos, a aceleração de processos erosivos e a salinização de solos irrigados com água de má qualidade são exemplos de modificações significativas decorrentes da utilização não ordenada do solo.

Atualmente, a racionalização da exploração dos solos é a condição que a sociedade vem impondo aos setores de produção agrícola, dado o nível de conscientização desenvolvido nos últimos tempos, motivado pelo impacto da degradação ambiental que atinge grandes proporções. Danos ao ambiente solo, como a erosão, desagregação, desestruturação, encrostamento superficial, compactação, lixiviação acelerada de bases, acidificação, salinização e outros, são, muitas vezes, decorrentes da utilização de sistemas de cultivo que empregam

técnicas que se contrapõem à conservação dos solos e, conseqüentemente, à sustentabilidade da agricultura.

No estado do Rio Grande do Sul, particularmente na região sul, as diferenças com relação à utilização e ocupação do território são reconhecidas. A Encosta do Sudeste é, dentre as diversas fisiográficas, seguramente uma das que apresentam sérios problemas quanto à conservação de solos, não só devido à suscetibilidade em serem degradados, mas também pela forma com que são explorados e pela insuficiência de ações de recuperação e manutenção da capacidade produtiva. Inserido nessa realidade está o município de Turuçu. Predominantemente agrícola e tendo como base as unidades de produção familiar, o município tem a produção de morango como atividade alternativa de renda e emprego.

Visando melhorar aspectos da produção de morango e gerar maior renda e qualidade de vida, um grupo de agricultores constituiu a “Associação de Produtores de Morango de Turuçu-RS”. Mesmo que se observe o desenvolvimento regional provocado pela cultura do morango, existe a necessidade de se compreender o impacto do seu sistema de produção sobre os recursos naturais (solo e água). Muitos dos solos que cobrem a região são suscetíveis à erosão e degradação da sua estrutura quando não manejados adequadamente, podendo oferecer restrições ao uso agrícola. A variação temporal dos atributos físicos, hídricos e químicos do solo ao longo do ciclo produtivo, associada com o uso de fertirrigação e cobertura plástica do solo, influenciam o manejo do sistema de produção agrícola. A qualidade do solo, definida como a capacidade de desempenhar suas várias funções no meio ambiente, passa a ser também influenciada por estes fatores.

É reconhecida a propensão dos solos situados na Encosta do Sudeste da região sul do RS em sofrer degradação da qualidade. Se o manejo do solo, da água e da fertirrigação puder ser utilizado de forma mais eficiente, promovendo o aumento da produtividade agrícola e evitando o declínio da qualidade dos recursos naturais, torna-se oportuno avaliar e compreender as alterações que neles ocorrem ao longo do tempo, além de identificar os indicadores da qualidade do solo sensíveis às alterações provocadas pelo manejo.

Este trabalho teve o objetivo de determinar e compreender as alterações dos atributos físicos, hídricos e químicos de solos ao longo de um ciclo produtivo de morango em Turuçu, RS, bem como identificar os principais indicadores de qualidade desses solos utilizando a análise fatorial.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Aspectos gerais da produção de morango em Turuçu-RS**

A fruticultura é um importante componente do agronegócio brasileiro. O país ocupa a terceira posição na produção mundial de frutas, em sua maior parte composta por frutas de clima temperado (Andrigueto et al., 2008). Segundo o Instituto Brasileiro de Frutas (IBRAF, 2008), as exportações de frutas frescas vêm aumentando a uma taxa média de 1,81% desde 2003. No Rio do Grande do Sul (RS), a fruticultura também vem crescendo em importância econômica. Além de o setor responder por importante parcela do PIB gaúcho, o Estado possui a maior produção nacional de uva, pêssego, figo, pêra, nectarina e kiwi, e possui, igualmente, expressiva participação no mercado de ameixa, maçã, morango, caqui, banana e abacaxi (EMATER, 2005).

O município de Turuçu, localizado no sul do RS, com 3.970 habitantes (IBGE, 2005), possui sua economia baseada na agricultura, agroindústria e pecuária. Segundo levantamento feito pela EMATER em 2001, de um total de 641 propriedades rurais, 618 delas apresentavam até 50 ha (EMATER, 2001). Nessas propriedades têm-se como principais atividades a produção de fumo, de arroz, de milho, de frutíferas e pimenta vermelha, além da pecuária leiteira, destacando-se a produção e comercialização de morango “in natura”. Dispostos a conquistar novos mercados e ampliar a renda familiar, um grupo de cerca de 25 produtores de morango do município buscou o apoio da Emater e da Prefeitura Municipal local para se unir e formar a “Associação de Produtores de Morango de Turuçu-RS”.

A crescente preocupação com aspectos de segurança alimentar, rastreabilidade dos produtos e sustentabilidade ambiental tem promovido a

conscientização das autoridades e, principalmente, dos consumidores de morango “in natura”. Segundo Andrigueto et al. (2008), os consumidores têm o pleno direito de acesso a alimentos saudáveis e livres de qualquer fator adverso, estando em conformidade com os padrões de qualidade de sistemas produtivos que priorizem a conservação ambiental e a valorização de produtores e trabalhadores rurais. Ressaltam-se também o associativismo rural, as formas de produção adaptadas à realidade dos pequenos e médios produtores, buscando sua maior competitividade, geração e distribuição de renda e emprego, com desenvolvimento social e segurança alimentar.

Também preocupado com todos esses aspectos, recentemente o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) publicou as Normas Técnicas Específicas para a Produção Integrada de Morango (NTEPIMO), na forma de anexo à Instrução Normativa Nº 14 de 01/04/2008 (MAPA, 2008). Estas normas são amplas, contemplando áreas temáticas que vão desde a capacitação e organização de produtores até aspectos sanitários dos frutos. Merece aqui destaque especial os aspectos ligados ao manejo e conservação do solo (ex. construção dos canteiros em nível) e da água para a Produção Integrada de Morango, em que as práticas agrícolas são classificadas como obrigatórias, recomendadas, proibidas ou permitidas com restrições (MAPA, 2001). Pela possibilidade da abertura de novos mercados consumidores, inclusive em nível de exportação, os produtores têm a expectativa de sua adesão à Produção Integrada de Frutas. Porém, torna-se necessário o cumprimento de várias exigências, não mais somente relacionadas à sanidade e rastreabilidade de alimentos, mas também quanto ao uso sustentável do solo e da água envolvidos no sistema de produção.

A fertirrigação por gotejamento é uma estratégia importante para o aumento da produtividade de morango em Turuçu, RS, com consideráveis ganhos na eficiência de sistemas de manejo irrigados. O menor consumo de água comparado com outros sistemas de irrigação associado com a aplicação localizada de fertilizantes, geralmente próxima do sistema radicular (Souza et al., 2009), resulta em maior eficiência na utilização de recursos como o solo, a água e fertilizantes (Hanson e May, 2004; Selim et al., 2009). Além disso, se o sistema de fertirrigação é corretamente planejado, dimensionado e manejado, considerando as condições do solo e do ambiente, a qualidade da água de irrigação e as variações da cultura ao

longo do seu ciclo, o risco de poluição do lençol freático e do solo também podem ser reduzidos (Mubarak et al., 2009b).

Porém, não há um consenso sobre como os efeitos combinados do processo de consolidação após o revolvimento do solo e a fertirrigação podem modificar os atributos do solo durante o ciclo de cultivo do morango. Sendo assim, é oportuno determinar tais atributos e sua variabilidade temporal levando em consideração as condições e as peculiaridades dos solos utilizados na produção de morango em Turuçu.

## 2.2. Solos do município de Turuçu-RS

O RS pode ser separado em onze regiões fisiográficas (Figura 1). Dentre elas, a Encosta do Sudeste ocupa uma estreita e extensa faixa territorial situada entre o Litoral e a Serra do Sudeste (Fortes, 1959). A parte mais elevada dessa região é composta, predominantemente, por sedimentos graníticos e granitóides erodidos do Escudo Sul-rio-grandense, associada com maciços de rochas graníticas que, em muitos locais, afloram na superfície.



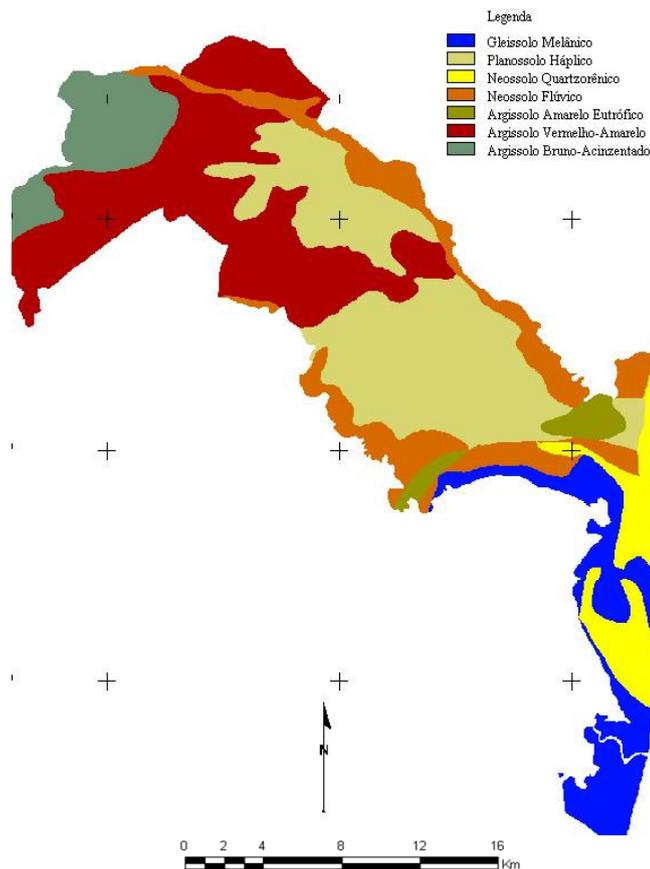
Fonte: <http://coralx.ufsm.br/ifcrs/fisiografia.htm>.

**Figura 1.** Regiões Fisiográficas do Rio Grande do Sul.

Os solos da parte alta da Encosta do Sudeste são predominantemente Argissolos com horizonte A relativamente arenoso, sendo pouco profundos (Cunha e Silveira, 2000). Diferentemente da região do Planalto, Missões e parte da Fronteira Oeste, a Região do Escudo Sul-rio-grandense não recebeu os maciços derrames de basalto contendo material mais rico que pudesse resultar em solos com maior fertilidade natural. O basalto tem maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , enquanto que os granitos de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . Quando a rocha é intemperizada, por serem divalentes,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  ficam mais fortemente retidos na superfície dos colóides, resistindo mais às perdas por lixiviação em relação ao  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  dos granitos que, por serem monovalentes, são facilmente lixiviados (Silveira, 2006).

No estado do Rio Grande do Sul, particularmente na Mesorregião da Metade Sul, existem grandes diferenças com relação à utilização e à ocupação do território. Enquanto que na maioria das várzeas e campos da região predominam médias a grandes propriedades, com orizicultura e pecuária extensiva, algumas regiões da Serra do Sudeste e da Encosta do Sudeste estão sustentadas na agricultura de pequena propriedade, onde o solo é cultivado de forma mais diversificada com hortigranjeiros, grãos, oleaginosas, frutíferas e pecuária de leite e de corte. Nos últimos anos, essa realidade vem sendo modificada pela introdução de florestas plantadas e, principalmente, pelo monocultivo mais intenso com fumo. Apesar do aumento da renda, esse modelo traz grandes mudanças para a produção agrícola, trazendo reflexos para a qualidade do solo e da água.

As áreas que são utilizadas para a produção de morango em Turuçu, RS estão situadas em locais de relevo suave ondulado a ondulado e, em algumas situações, com relevo forte ondulado associado à presença de afloramentos rochosos. Nessa região podem ser encontrados solos rasos, com profundidade do perfil inferior a 0,5 m, a pouco profundos, com profundidade do perfil entre 0,5 m e 1,0 m (Neossolos) associados a solos profundos, com perfil de profundidade maior que 1,0 m (Argissolos) (Figura 2).



Fonte: Tagliani (2007).

**Figura 2.** Mapa de Solos do Município de Turuçu, RS, Brasil.

### 2.3. Qualidade do solo e a produção de morango

Para compor um sistema de produção que cumpra os requisitos exigidos pela Produção Integrada de Frutas, principalmente os relacionados ao uso sustentável dos recursos naturais, é preciso levar em consideração as características e peculiaridades regionais de relevo, solo e água. A atividade agrícola encontra dificuldades para se desenvolver na região sul do RS em função da aptidão agrícola dos solos da região, pois a grande maioria das terras agricultáveis é mais indicada para a produção de culturas perenes do que para anuais. Adicionalmente, a região que engloba a Associação de Produtores de Morango de Turuçu possui, em sua grande maioria, relevo suave ondulado a ondulado, com predomínio de Argissolos com horizonte A relativamente arenoso (Cunha e Silveira, 2000) sendo, na maioria dos casos, pouco a medianamente profundos. Segundo Streck et al. (2008b), os Argissolos dessa região do RS, por possuírem horizonte A arenoso, apresentam

baixos teores de matéria orgânica e de argila, tornando-se suscetíveis à erosão hídrica e sujeitos à rápida decomposição de resíduos culturais, exigindo intensas práticas de manejo e conservação do solo para evitar sua degradação.

Para adequar o manejo das áreas de produção de morango em Tururuçu, com o intuito de evitar a degradação do solo, melhorar a qualidade do fruto produzido e, com isso, ser possível a certificação, é necessário o diagnóstico de possíveis pontos críticos bem como a caracterização dos atributos do solo. Contrastar os valores das variáveis do solo em estudo com os valores médios de referência encontrados na literatura, bem como o enquadramento desses valores nos limites superiores e inferiores de cada variável, observando as faixas de variação que cada variável costuma ter, são ferramentas úteis para a ciência do solo e aos agricultores (Reynolds et al., 2002). A partir do diagnóstico de possíveis situações críticas de cada uma das variáveis, pode-se adequar o manejo do solo para melhorar a produtividade e qualidade dos produtos produzidos bem como evitar a degradação do solo.

Avaliar uma variável de cada vez apresenta, contudo, a inconveniência de não se levar em consideração os efeitos combinados, a dependência, as relações causa-efeito e a interdisciplinaridade entre as áreas da ciência do solo. Dentro de uma visão mais integrada, tem sido proposta a utilização de grupos de variáveis que se relacionam intimamente com os processos de maior importância para o solo, conhecidos como atributos indicadores da qualidade do solo. Numa visão qualitativa e conceitual, Doran e Parkin (1994) definiram a chamada “qualidade do solo”, como sendo a sua capacidade em cumprir suas diversas funções nos limites de um ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade do ambiente, promovendo a saúde de plantas e animais e servindo de base para a sobrevivência e bem estar do ser humano.

Sob um ponto de vista mais específico, Topp et al. (1997) definiram um solo agrícola com “boa qualidade física” como sendo aquele que é “resistente” o bastante para manter boa estrutura, para manter as plantas eretas e resistir à erosão e compactação, mas também “frágil” o suficiente para permitir o crescimento irrestrito das raízes e a proliferação da fauna e flora. De acordo com os mesmos autores, o solo com boa qualidade física deve possuir também características de transmissibilidade e armazenamento de fluidos, que permitam corretas proporções de água, nutrientes dissolvidos e ar para uma máxima performance das plantas e

mínima degradação ambiental. Existem várias percepções sobre o que é um bom solo, e nenhuma delas é totalmente errada ou certa, pois ela é dependente do ponto de vista do observador e das funções que se espera que o solo seja capaz de desempenhar.

Para Doran (1997), a avaliação da qualidade do solo e a direção das mudanças com o tempo são os primeiros indicadores para se buscar o manejo sustentável. Mas, para Costa et al. (2006), mensurar a qualidade do solo não é tarefa fácil. A dificuldade advém do fato de que a qualidade do solo depende de suas propriedades intrínsecas, de suas interações com o ecossistema e, ainda, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos.

A habilidade do solo em desempenhar suas funções pode ser avaliada medindo-se os atributos físicos, químicos e biológicos sendo que, do ponto de vista agrícola e ambiental, ela tem sido avaliada a partir de indicadores da qualidade do solo. A Tabela 1 mostra alguns indicadores propostos por Karlen et al. (1997).

Mendes et al. (2006) afirmam que o uso de certos atributos físicos do solo para o estudo de sua qualidade apresenta vantagens relacionadas ao baixo custo, metodologias simples e rápidas, além da relação direta com atributos químicos e biológicos do solo. Como exemplo, a diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água é um atributo de fácil determinação, relacionada com os processos envolvidos na degradação do solo (Tippkötter, 1994), podendo integrar um Índice de Qualidade do Solo (IQS) que integre outros atributos indicadores (Conceição et al., 2005). Os IQS são normalmente constituídos pelo estabelecimento de um conjunto de dados mínimo contendo diversas variáveis de solo. Podem ser determinados por metodologias-padrão como a análise integrada onde diversos indicadores são levados em consideração mediante a utilização de ferramentas de análise multivariada, como a Análise de Regressão Linear e Múltipla, a Análise dos Componentes Principais e a Análise Fatorial.

A ferramenta de Análise Fatorial tem tido utilização crescente em estudos de indicadores da qualidade do solo. Ela tem a capacidade de reduzir o número total das variáveis analisadas, sintetizando a informação disponibilizada por um grupo de variáveis. Com a obtenção de alguns fatores, estes podem ser considerados como variáveis novas e originais, capazes de representar a maior parte da variância existente em um grupo de diferentes variáveis. Além disso, o que torna esse método

mais relevante é a possibilidade de os fatores serem relacionados com determinadas funções que o solo exerce no ambiente (Shukla et al., 2006).

**Tabela 1.** Indicadores da qualidade do solo e alguns processos que eles afetam.

<b>Indicador</b>	<b>Processo Afetado</b>
Matéria Orgânica	Ciclagem de nutrientes, retenção de água e poluentes, estrutura do solo
Infiltração	Potencial de escoamento superficial e lixiviação, eficiência de uso da água pelas plantas, potencial erosivo
Agregação	Estrutura do solo, resistência à erosão, emergência de plantas, infiltração
pH	Disponibilidade de nutrientes, adsorção e mobilidade de pesticidas
Biomassa Microbiana	Atividade biológica, ciclagem de nutrientes, capacidade de degradação de pesticidas
Formas de N	Disponibilidade às plantas, potencial de lixiviação, taxas de mineralização e imobilização
Densidade do Solo	Penetração das raízes, espaço poroso ocupado por ar e água, atividade biológica
Profundidade do perfil	Volume de solo para o desenvolvimento das plantas, disponibilidade de água e nutrientes
Salinidade	Infiltração de água, desenvolvimento de plantas, estrutura do solo
Nutrientes disponíveis	Capacidade de suportar o desenvolvimento de plantas, poluição ambiental

#### **2.4. Degradação do solo e a produção de morango em Turuçu-RS**

O solo é considerado como um sistema aberto, continuamente inter-relacionado com o ambiente devido às transferências e trocas de matéria e energia com a atmosfera (Brady e Weil, 2002; Hillel, 2004). Ele deve ser capaz de exercer funções distintas, atuando como um meio para o crescimento das plantas, regulando o fluxo de água no ambiente, estocando e promovendo a ciclagem de elementos na biosfera e servindo como um tampão ambiental na formação, atenuação e

degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (Larson e Pierce, 1994; Doran, 1997; Karlen et al., 1997). Para cumprir tais funções, a superfície do solo, geralmente composta pelo horizonte A, possui maior atividade biológica e é geralmente enriquecida com matéria orgânica e nutrientes em relação às camadas inferiores, sendo a mais fértil. Mas, por situar-se na interface com a atmosfera é também a mais vulnerável quanto à perda de sua habilidade em cumprir suas funções no meio ambiente (Hillel, 2004). Enquanto que os riscos econômicos e ambientais da degradação do solo e da desertificação são amplamente conhecidos, os processos e mecanismos que estão envolvidos nesses processos são pouco compreendidos (UNEP, 1992; Shukla e Lal, 2004).

A agricultura praticada na Encosta do Sudeste é limitada pela aptidão natural dos solos, sendo uma parte considerável das terras agricultáveis mais indicada para a produção de culturas perenes do que anuais (Cunha e Silveira, 2000). O relevo ondulado e o solo de textura arenosa, com baixo teor de matéria orgânica na superfície e aumento no teor de argila em profundidade (alto gradiente textural) levam a uma alta suscetibilidade à erosão hídrica das terras na Encosta do Sudeste. Além disso, os solos possuem CTC e fertilidade natural relativamente baixas, em consequência da textura arenosa e dos baixos teores de matéria orgânica. A alteração da cobertura vegetal, principalmente pelo corte das matas ciliares e das nascentes para o aumento da área de produção agrícola, tem contribuído para que os solos das pequenas propriedades apresentem áreas degradadas, sem práticas de conservação do solo (Bamberg et al., 2009) (Figura 3).



**Figura 3.** Erosão hídrica em sulcos nas áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

A erosão hídrica e o assoreamento dos corpos d'água relacionam-se diretamente com a degradação do solo. Segundo Omuto (2008), que estudou os processos de degradação da qualidade física em diferentes tipos de solo, existem evidências de que ela é um processo gradual que se inicia com a deterioração da estrutura do solo e termina em perdas diferenciais de partículas por erosão. A erosão hídrica resulta da ação de chuvas torrenciais em eventos que provocam enxurradas e levam sedimentos, nutrientes e resíduos de agro-químicos para as partes mais baixas. A camada superficial e mais rica do horizonte A do solo é transportada para o leito de riachos, açudes, lagos e outros. Surgem, com isso, problemas de assoreamento e contaminação dos mananciais, utilizados para irrigação de hortifrutigranjeiros, além de afetar o abastecimento e a saúde da população. O prejuízo também ocorre para espécies da fauna aquática regional, por modificação do habitat natural desses organismos.

A dispersão e perda da fração coloidal em áreas agrícolas também é um fator a ser levado em consideração. Os componentes do solo de tamanho coloidal (argilas, óxidos e materiais orgânicos) precisam manter-se floculados para evitar a sua translocação (Lavelle e Spain, 2002). A aplicação de fertilizantes que possuem elevado índice salino (por exemplo, salitre do Chile) e que apresentam na sua composição íons dispersantes como o  $\text{Na}^+$  pode resultar na dispersão da fração coloidal do solo, a mais importante do ponto de vista de fertilidade do solo para a produção agrícola. A salinização do solo provoca ainda a redução da capacidade de água disponível às plantas. A acumulação de sais solúveis na camada superficial, principalmente por causa da adubação excessiva, promove o aumento da pressão osmótica, resultando em diminuição da água disponível para as plantas e, conseqüentemente, da potencialidade produtiva das culturas sensíveis à salinidade.

A degradação da estrutura do solo é resultado da produção agropecuária intensiva em solos de baixa capacidade produtiva e de baixa resistência, requerendo a aplicação de práticas rígidas e permanentes de conservação do solo. O predomínio do sistema de preparo convencional do solo, as faltas de cobertura vegetal no inverno e da aplicação de culturas diversificadas em rotação e sucessão têm desequilibrado o ciclo da matéria orgânica, particularmente nos Argissolos, Neossolos e Cambissolos da região (Flores et al., 2005). Segundo Tisdall e Oades (1982) e Golchin et al. (1994), a contínua perda de matéria orgânica influencia diretamente o processo de agregação, resultando na degradação estrutural do solo.

A manutenção do pH em faixas de valores adequados para a produção agrícola é um passo importante no manejo do solo. A acidificação do solo afeta a atividade biológica, a disponibilidade de nutrientes e a nutrição das plantas (Johnston, 2004). Este tipo de degradação é comum nos solos da região, dado o baixo poder tampão de solos com predominância da fração areia.

## **2.5. Variabilidade temporal dos atributos do solo**

Ferramentas e princípios de agricultura de precisão têm sido adotados, predominantemente, com o intuito de se levar em consideração a variabilidade espacial dos atributos dos solos e das plantas. Para McBratney e Whelan (1999), o objetivo da agricultura de precisão é adequar os recursos aplicados e as práticas agronômicas com as necessidades dos solos e das plantas conforme elas variam no espaço e no tempo. Pouca atenção tem sido destinada à caracterização da variabilidade temporal dos atributos do solo, muito menos para as implicações dessa sobre o manejo adotado pelos agricultores. Assim, é essencial haver um entendimento dos componentes de variabilidade dos solos e das plantas, não só do ponto de vista espacial, mas também no tempo, antes que qualquer decisão ou ações específicas de manejo sejam adotadas na agricultura (Shi et al., 2002).

O solo apresenta uma distribuição heterogênea de partículas sólidas com diferentes composições, tamanhos e formas. Ele é uma mistura dinâmica, sob consideráveis modificações em função de fatores naturais (clima, biota, gravidade) e antropogênicos (revolvimento, tráfego de máquinas). Essas modificações geram a necessidade de se identificar e compreender as variações temporais dos atributos do solo, mais propriamente em quantificar os efeitos dos sistemas de manejo do solo ao longo dos anos. Sistemas de manejo são considerados como os principais agentes de mudança da estrutura e das condições ambientais do solo, e muitas das propriedades do solo tornam-se extremamente dependentes da dinâmica da sua estrutura (van Es et al., 1999; Alletto e Coquet, 2009). Algumas variáveis apresentam pequenas variações com o tempo, podendo-se citar a distribuição das partículas do solo por tamanho (Cassel, 1983), porque elas são mais dependentes de interferências naturais como os processos de formação do solo e o material de origem. Diferentemente, outras variáveis de solo como a resistência à penetração

(Onofiok, 1988), a macroporosidade, a concentração de nitrogênio total e a população microbiana podem variar mais em relação ao tempo, pois elas também dependem das condições climáticas sazonais, das práticas de manejo e revolvimento do solo, do desenvolvimento das culturas e da atividade biológica (Reynolds et al., 2007).

Apesar de o plantio direto ser amplamente difundido e preconizado na agricultura brasileira, especialmente no cultivo de culturas como a soja, o milho, o trigo e o algodão, há muitas culturas em que o revolvimento do solo ainda é utilizado. O preparo do solo consiste de técnicas utilizadas pelo homem para modificar o estado natural, criando condições físicas e edáficas mais favoráveis à germinação das sementes e ao estabelecimento e desenvolvimento das plantas.

O preparo do solo para a produção de morango em Turuçu inicia-se com a lavração do solo. Posteriormente, são utilizadas enxadas rotativas para revolver o solo e construir canteiros, de modo a se obter um ambiente favorável ao desenvolvimento das mudas após o transplante (Figura 4). No entanto, cada vez que um implemento agrícola mobiliza o solo, os atributos físicos e hídricos são alterados. A configuração dos poros da camada revolvida é muito instável, pois o resultado do revolvimento é a fragmentação das unidades estruturais do solo, aumentando o volume de poros interagregados. Têm-se então uma camada de aproximadamente 0,2 m de solo descompactado, com alta porosidade total e alta relação macroporos/microporos. A camada resultante tende a ser um ambiente favorável para a elongação das raízes das plantas, mas é estruturalmente instável, sendo suscetível a modificações com o tempo. O que ocorre em solos revolvidos é uma diminuição gradual da porosidade interagregados com o tempo, até que se atinja um novo equilíbrio (Cassel, 1983; Leij et al., 2002). Durante o mesmo tempo, a distribuição dos poros por tamanho também se modifica, resultando em mudanças na curva de retenção de água e na condutividade hidráulica da camada de solo revolvida (Ahuja et al., 1998; Leij et al., 2002). Essas modificações são conhecidas como a reconsolidação natural que ocorre, sobretudo, em função dos ciclos de umedecimento e secagem que o solo é submetido após o revolvimento (Rousseva et al., 1988; Ahuja et al., 1998), afetando os valores dos atributos do solo.

Segundo Ahuja et al. (1998), durante o umedecimento do solo pela chuva ou irrigação, a consolidação decorre de três importantes mecanismos: (1) impacto das gotas da chuva; (2) estresse efetivo que causa o colapso da matriz do solo pelo seu

próprio peso; e (3) forças dinâmicas da água movendo-se pelos poros, que tendem a adensar o solo. Ainda, durante a redistribuição da água no solo que se segue à infiltração, as tensões geradas pela relação água-poros também aumentam o estresse efetivo da matriz do solo, aproximando as partículas entre si. Para Mapa et al. (1986), a parte mais intensa da reconsolidação ocorre no primeiro ciclo de umedecimento e secagem, sendo progressivamente menor nos ciclos subsequentes.



**Figura 4.** Construção de canteiros para a produção de morango: a) revolvimento do solo já lavrado com enxada rotativa encanteiradora; b) lavoura pronta para receber a cobertura de plástico preto, o sistema de irrigação por gotejamento e as mudas de morango.

O processo de consolidação do solo contribui decisivamente para a variabilidade temporal dos atributos físicos e hídricos de solos agrícolas revolvidos, de maneira que a variabilidade temporal de alguns atributos pode ser até mesmo maior que a espacial. Van Es et al. (1999) estudaram a significância relativa de diferentes fontes de variabilidade espacial e temporal sobre a infiltração de água no solo em múltiplas escalas. Eles concluíram que, para áreas agrícolas, os efeitos temporais do preparo do solo são as mais importantes fontes de variação quando comparados com o tipo de solo. Mesmo em curto espaço de tempo, espera-se que os atributos físicos e hídricos do solo possam variar significativamente, tais como durante o ciclo de uma cultura, especialmente logo após o preparo. Mapa et al. (1986) concluíram que a condutividade hidráulica é altamente sensível a variações temporais. Esses autores observaram valores de condutividade hidráulica próximos da saturação aproximadamente 100 vezes menor do que inicialmente, a alguns

meses após o revolvimento do solo, concluindo ser o resultado do processo de consolidação do solo.

Mubarak et al. (2009a) chamam a atenção para a necessidade de mais estudos relacionados à variação temporal das variáveis do solo, especialmente os que possam contribuir para a otimização da aplicação da água de irrigação em sistemas fertirrigados. A comunidade científica tem um importante papel nesse sentido, e está começando a explorar a dinâmica da variabilidade temporal das propriedades físicas do solo e processos relacionados às práticas de manejo do solo (Ahuja et al., 2006; Strudley et al., 2008). Além disso, as variações temporais das propriedades hidráulicas do solo durante o ciclo das culturas sob fertirrigação continuam sendo não bem compreendidas (Mubarak et al., 2009a, b). Grande parte dos agricultores e técnicos não mede esforços para satisfazer as maiores necessidades das plantas para resultar em alta produtividade. No entanto, poucos têm a percepção sobre a variabilidade temporal dos atributos do solo e quanto isso pode afetar a produtividade agrícola e os custos de produção.

Para Reichert et al. (2009), estudar os atributos físicos do solo de áreas agrícolas ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas pelos sistemas de manejo. Num intervalo de tempo maior, é importante para estabelecer se o solo está sendo degradado ou mantendo sua capacidade de produção agrícola. Em intervalos de tempo mais curtos, como durante a safra agrícola de morango, a compreensão do comportamento do solo desde o seu preparo até a fase final de produção possibilita identificar e propor alternativas de manejo de irrigação. Essas podem ser mais adaptadas e compatíveis com a situação dos atributos do solo ao longo do ciclo produtivo, melhorando a eficiência e utilização da água e dos nutrientes aplicados. Considerando que a consolidação altera a estrutura do solo, não só a quantidade de água armazenada e disponível às plantas, mas também a porosidade de aeração, a caracterização da variabilidade temporal dos atributos físicos, hídricos e químicos do solo é uma importante ferramenta de suporte à decisão para melhorar o manejo dos recursos naturais utilizados na produção de morango em Turuçu, RS.

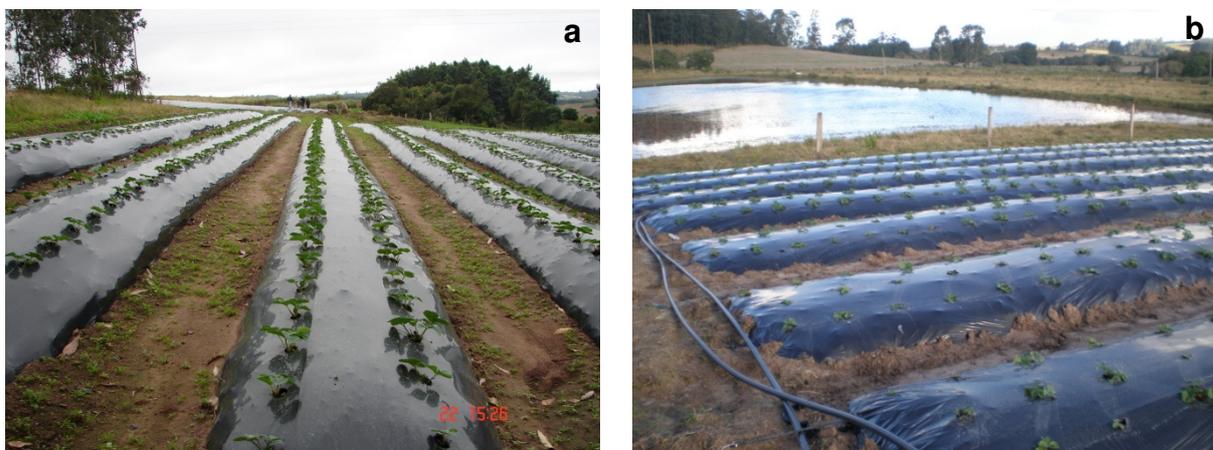
## 2.6. Salinidade do solo: extrato de saturação e atributos químicos

A limitação da produtividade das culturas causada pela salinidade do solo é normalmente encontrada em regiões áridas e semi-áridas. Os solos dessas zonas climáticas geralmente possuem altos níveis de sais, particularmente de  $\text{Na}^+$ , que podem afetar, principalmente, a agregação e a estrutura do solo (Zheng et al., 2009). O problema acontece quando a presença de solutos na solução do solo ocorre em concentrações prejudiciais à produção das culturas, ou pela combinação de baixas precipitações e altas taxas de evaporação, resultando em acúmulo de sais nos horizontes superficiais (Hillel, 2000; FAO, 2002). Solos sequencialmente irrigados com água de alta condutividade elétrica (CE) também podem acumular sais nas camadas superficiais exploradas pelas raízes das plantas. Em certos casos, sais podem ainda se fixar nas cargas elétricas do solo a partir da ascensão do lençol freático, que os mobiliza e transporta-os até a zona de atividade radicular a partir de camadas subsuperficiais previamente acumulados em eras geológicas anteriores (Hillel, 2000).

A irrigação também pode aumentar a quantidade de sais do solo e modificar a sua estrutura (Emdad et al., 2004). Em condições de campo, solos irrigados e expostos à aplicação de água com alta concentração de sais influenciam os atributos químicos do solo, podendo aumentar a dispersão e a quebra dos agregados, resultando em selamento e encrostamento superficial (Shainberg e Letey, 1984). Em lavouras irrigadas, a salinidade tem afetado entre 20 e 30 milhões de hectares das áreas mundiais irrigadas (FAO, 2000). Mesmo em regiões climáticas úmidas e sub-úmidas, os processos de salinização derivados de práticas de irrigação têm sido noticiados (FAO, 1988).

O manejo das culturas e as estratégias utilizadas para buscar aumento da produtividade podem ser responsáveis por profundas modificações no equilíbrio dinâmico da água e solutos do solo. A utilização de cobertura do solo com lona plástica é uma técnica utilizada em áreas de produção de morango em Turuçu que visa aumentar a produtividade e reduzir custos de produção. O plástico que cobre o solo evita o contato direto do fruto com o solo e o desenvolvimento de plantas indesejáveis, dispensando a capina e a aplicação de herbicidas para controlar invasoras (Figura 5). O plástico também diminui as perdas de água por evaporação, diminuindo a necessidade de aplicação de água via irrigação.

A aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos de forma incorreta eleva a concentração de sais no solo. Produtores de morango de Turuçu utilizam altas doses de fertilizantes minerais aplicados sob a forma de adubação de base (na preparação dos canteiros) e de cobertura (via fertirrigação, ao longo do ciclo de produção). A produção de frutos da cultura do morango é extremamente sensível à presença de sais no solo, pois valores superiores a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  reduzem a produtividade potencial da cultura do morango (Ehlig e Bernstein, 1958; Osawa, 1965), considerada uma das culturas mais sensíveis à salinidade do solo.



**Figura 5.** Canteiros com o morangueiro em estágio vegetativo: a) cobertura plástica do solo; b) em detalhe, as mangueiras com gotejadores utilizados na fertirrigação.

De acordo com Darwish (2005), solos cultivados em sistemas intensivos como em ambientes protegidos são altamente suscetíveis aos efeitos adversos da acumulação de sais. No Líbano, a salinidade do solo em estufas tornou-se um sério problema com a adição anual de  $30 \text{ t ha}^{-1}$  de esterco líquido, além da aplicação de fertilizantes convencionais na forma de compostos solúveis e pouco solúveis, excedendo a dose de  $1800 \text{ kg ha}^{-1}$  por safra. Consequentemente, a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs) no interior das casas de vegetação atingiu valores de 15 a  $20 \text{ dS m}^{-1}$ , seis vezes maior que no solo externo aos ambientes protegidos.

Levando-se em consideração a intolerância da cultura do morango à presença de sais, o manejo da adubação empregado pelos produtores de Turuçu e as condições ambientais dos canteiros que dificultam a lixiviação do excesso de sais, a salinidade do solo pode ocorrer de modo a limitar a produtividade de

morango naquele município. Por isso, é relevante determinar se as evidências levantadas com relação ao processo de salinização podem ser confirmadas; se ocorre, em que nível esse problema ocorre e qual a sua variabilidade temporal ao longo do ciclo de produção de morango. De acordo com Janzen et al. (1997), as alterações que ocorrem no solo afetam seus constituintes, de modo que cada um se adapta através de diferentes escalas: a solução do solo pode ser alterada dentro de alguns minutos, a população microbiana dentro de alguns dias e a mineralogia dentro de alguns séculos ou ainda milênios.

### **3. ARTIGO 1 – VARIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO**

#### **3.1. Introdução**

Descrições e conhecimentos das variações temporais dos atributos físicos do solo têm sido objetos de muitas pesquisas, interessadas na quantificação dos efeitos de sistemas de manejo do solo ao longo dos anos. Sistemas de manejo são os principais agentes de mudança sobre as condições ambientais do solo, e muitas de suas propriedades tornam-se extremamente dependentes da dinâmica da estrutura do solo (van Es et al., 1999; Alletto e Coquet, 2009). Algumas variáveis apresentam poucas variações com o tempo, por exemplo, a distribuição das partículas do solo por tamanho (Cassel, 1983), pois são mais dependentes de interferências naturais como os processos de formação do solo e o material de origem. Outras variáveis tais como a resistência do solo à penetração (Onofriok, 1988) e a macroporosidade podem variar mais em relação ao tempo, pois elas também dependem das condições climáticas sazonais, das práticas de manejo, do desenvolvimento das culturas e da atividade biológica (Reynolds et al., 2007).

A variabilidade temporal dos atributos físicos de solos utilizados para a agricultura pode ser até mesmo maior que a variabilidade espacial. Van Es et al. (1999) estudaram a significância relativa de diferentes fontes de variabilidade espacial e temporal sobre a infiltração de água no solo em múltiplas escalas. Eles concluíram que, para áreas agrícolas, os efeitos do manejo do solo são mais importantes fontes de variação do que o tipo de solo. Mesmo num curto espaço de tempo, espera-se que os atributos físicos e hídricos do solo possam variar significativamente, tais como durante o ciclo de uma cultura, especialmente logo após o preparo. Mapa et al. (1986) concluíram que a condutividade hidráulica é altamente sensível às variações temporais. Esses autores observaram valores de condutividade hidráulica próxima da saturação aproximadamente 100 vezes menores logo após o revolvimento do que alguns meses após, concluindo ser o resultado do processo de consolidação do solo.

No sul do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, está localizado o município de Turuçu, onde sistemas de produção de morango têm sido conduzidos com a utilização de várias tecnologias. Agricultores familiares cultivam morango em pequenas áreas através da construção de canteiros que são cobertos com plástico preto, contando com sistemas de irrigação dimensionados e desenvolvidos para a aplicação de fertilizantes líquidos (fertirrigação). Recentemente, esses agricultores também instalaram tensiômetros para o monitoramento do potencial matricial do solo como uma ferramenta de decisão para encontrar o melhor momento de voltar a irrigar.

A fertirrigação tem se tornado uma importante prática que, associada à irrigação nessa região resulta em consideráveis aumentos na eficiência de sistemas de manejo irrigados. O menor consumo de água comparado com outros sistemas e a aplicação localizada de fertilizantes químicos, geralmente próximos do sistema radicular (Souza et al., 2009), resulta em maior eficiência na utilização de recursos como o solo, a água e os fertilizantes (Hanson e May, 2004; Selim et al., 2009). Além disso, se o sistema de fertirrigação é corretamente planejado, dimensionado e manejado, considerando as condições do solo e do ambiente, a qualidade da água de irrigação e as variações da cultura ao longo do seu ciclo, o risco de poluição do lençol freático e do solo também podem ser reduzidos (Mubarak et al., 2009b). Porém, a irrigação também pode modificar as condições da estrutura do solo (Emdad et al., 2004). Em condições de campo, solos irrigados são expostos à aplicação de água com qualidade variada. Por exemplo, a alta concentração de sais na água de irrigação pode influenciar os atributos químicos do solo que podem aumentar a dispersão do solo e a quebra dos agregados, promovendo selamento e encrostamento superficial (Shainberg e Letey, 1984).

Não há um consenso sobre como os efeitos combinados do revolvimento do solo e a fertirrigação podem modificar as propriedades físicas do solo durante o ciclo de cultivo do morango. Mubarak et al. (2009a) evidenciam a necessidade de mais estudos relacionados à variação temporal das variáveis do solo, especialmente as que possam contribuir para a otimização da aplicação da água de irrigação em sistemas fertirrigados. A comunidade científica tem um importante papel nesse sentido, e está iniciando a explorar a dinâmica da variabilidade temporal das propriedades físicas do solo e processos relacionados às práticas de manejo do solo (Ahuja et al., 2006; Strudley et al., 2008). Além disso, as variações temporais das

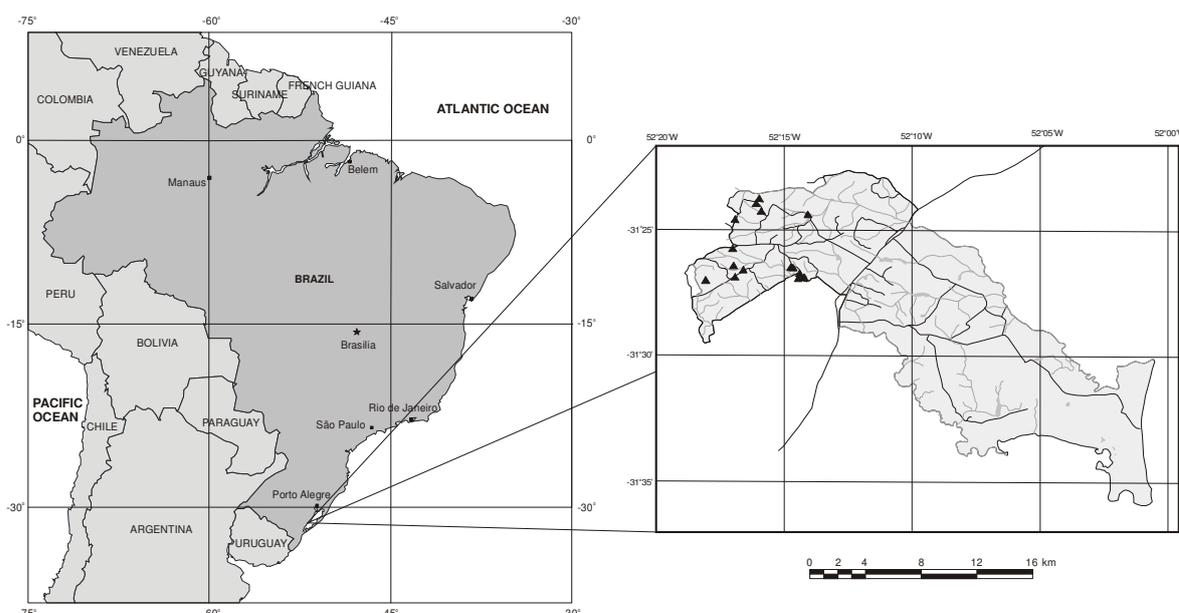
propriedades hídricas do solo durante o ciclo das culturas sob fertirrigação continuam sendo mal compreendidas (Mubarak et al., 2009a, b).

O objetivo deste trabalho foi determinar a variação temporal dos atributos físicos e hídricos do solo de sistemas de produção de morango conduzidos por 15 produtores utilizando cobertura plástica e fertirrigação em Turuçu, RS, Brasil.

## 3.2. Material e Métodos

### 3.2.1. Área de estudo

Quinze áreas de produção de morango conduzidas por produtores da associação de produtores de morango em Turuçu, RS, Brasil, foram selecionadas para esse estudo (Figura 6). A região compreende uma transição entre as províncias geomorfológicas do Escudo Sul-riograndense e da Planície Costeira Interna. Argissolos, Cambissolos e Gleissolos (Embrapa, 2006) são os três grandes grupos de solos encontrados na região. A temperatura média regional é 17,8 °C e a precipitação média anual é 1367 mm. Características físicas do solo de cada lavoura de morango foram determinadas e são apresentadas na Tabela 2.



**Figura 6.** Localização das 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

**Tabela 2.** Características físicas da camada de 0,0-0,2 m do solo de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil

Produtor	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Classe Textural	Densidade de Partículas (Mg m <sup>-3</sup> )
1	132,6	223,6	643,8	franco-arenosa	2,56
2	126,4	186,9	686,7	franco-arenosa	2,57
4	98,9	198,3	702,8	franco-arenosa	2,62
5	111,4	188,2	700,4	franco-arenosa	2,58
6	138,1	327,5	534,4	franca	2,58
7	125,9	181,4	692,7	franco-arenosa	2,58
8	149,8	163,1	687,1	franco-arenosa	2,54
9	141,0	174,1	684,9	franco-arenosa	2,62
10	138,6	194,0	667,4	franco-arenosa	2,62
11	126,3	177,8	695,9	franco-arenosa	2,61
12	170,4	201,0	628,6	franco-arenosa	2,55
13	146,2	184,0	669,8	franco-arenosa	2,52
14	248,0	168,0	584,0	franco-argilo-arenosa	2,57
15	144,7	188,8	666,5	franco-arenosa	2,54
16	102,5	176,3	721,2	franco-arenosa	2,58
Média	140,05	195,53	664,41		2,58

Todos os agricultores deste estudo utilizaram o sistema de produção convencional, com praticamente o mesmo nível de tecnologia e manejo. O sistema basicamente consiste na lavração do solo e, posteriormente, na construção de canteiros com o uso de enxada rotativa movida por trator para o revolvimento da camada superficial de 0,0 a 0,2 m do solo. As dimensões dos canteiros variam de 0,8 a 1 m de largura, 0,2 m de altura e diferentes comprimentos, sendo construídos em pequenas lavouras variando de 0,1 a 0,5 ha. As mudas são dispostas em duas ou três fileiras sobre os canteiros, os quais são cobertos anteriormente com lona plástica preta. Os sistemas de fertirrigação são montados em duas linhas de mangueiras gotejadoras em cada canteiro, espaçadas de 0,3 m. Túneis de plástico translúcido foram utilizados como cobertura, os quais eram abertos ou fechados em determinados momentos do cultivo.

### 3.2.2. Coleta e preparo de amostras

Amostras de solo de estrutura preservada foram coletadas na camada de 0,03-0,07 m para representar a camada de 0,0-0,1 m, em cilindros de inox de aproximadamente  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  foram coletadas na parte central de cada lavoura (três repetições) e no centro dos canteiros. Foram determinadas a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, curvas de retenção de água no solo e parâmetro S. Cada lavoura foi dividida em três partes, e cinco amostras simples de agregados foram coletadas na camada de solo 0,0-0,2 m de cada uma das partes para gerar uma amostra composta, destinada à determinação da distribuição dos agregados estáveis em água em classes de tamanho, diâmetro médio ponderado dos agregados. Todas as amostras de estrutura não preservada foram coletadas em quatro diferentes momentos durante o ciclo de produção de morango e, pelo fato do canteiro ter sido intensamente revolvido e a camada 0,00-0,20 m ter se tornado homogênea assumiu-se a amostragem como sendo representativa da camada 0,00-0,20 m. A primeira amostragem ocorreu na última semana de junho de 2007, logo após a construção dos canteiros; a segunda ocorreu na primeira semana de setembro de 2007, após o transplante das mudas e antes da fase produtiva; a terceira foi na segunda semana de dezembro de 2007, durante o pico de produção de morango e da fertirrigação; a quarta foi na última semana de janeiro de 2008, após a colheita do morango e do uso da fertirrigação.

### 3.2.3. Análises físicas e hídricas do solo

As curvas de retenção de água no solo foram obtidas utilizando a mesa de tensão para baixas tensões (1, 6 e 10 kPa) e as câmaras de pressão de Richards para altas tensões (33, 100 e 1500 kPa). Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980), considerando  $m = 1 - 1/n$ , utilizando o software SWRC (Dourado-Neto et al., 1996). Valores iniciais dos parâmetros da equação de van Genuchten  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ , e  $n$  foram utilizados como sugerido por Carsel e Parrish (1988), considerando a textura do solo de cada lavoura (ver Tabela 2). Valores de conteúdo de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) foram considerados como sendo os valores

ajustados de conteúdo de água volumétrico em equilíbrio aos valores de tensão de 10 e 1500 kPa, respectivamente. A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada multiplicando-se a profundidade efetiva do sistema radicular do morango (considerado como 0,20 m) pelo conteúdo de água volumétrico armazenado entre CC e PMP.

Os valores do parâmetro “S” foram calculados pela equação 1, de acordo com o proposto por Dexter (2004a):

$$S = -n(U_s - U_r) \left[ \frac{2n-1}{n-1} \right]^{\left[ \frac{1}{n-2} \right]} \quad (1)$$

onde:

$U_r$  = conteúdo de água gravimétrico residual;

$U_s$  = conteúdo de água gravimétrico em solo saturado;

$n$  = parâmetro empírico da equação de van Genuchten.

A massa de solo seco foi dividida pelo volume interno do cilindro para a obtenção da densidade do solo (BulkDENS). A porosidade total (TotPOR) foi calculada pela fórmula: TotPOR = 1 - BulkDENS / densidade de partículas x 100. A microporosidade (MatPOR) foi considerada como igual ao conteúdo de água volumétrico em equilíbrio com o solo na tensão de 6 kPa. A macroporosidade (MacPOR) foi obtida por: MacPOR = TotPOR - MatPOR.

As proporções de agregados estáveis em água foram obtidas por peneiramento úmido dos agregados (Yoder, 1936; Kemper e Rosenau, 1986). Os agregados foram classificados em seis diferentes classes de tamanho:  $C_1$  = 9,51 a 4,76 mm;  $C_2$  = 4,75 a 2,00 mm;  $C_3$  = 1,99 a 1,00 mm;  $C_4$  = 0,99 a 0,25 mm;  $C_5$  = 0,24 a 0,105 mm e  $C_6$  < 0,105 mm. A quantidade de agregados estáveis em água obtida em cada classe (intervalo) foi calculada conforme:

$$C_i = \left[ \frac{W_i - m_i}{\sum_{i=1}^n (W_i - m_i)} \right] \times 100 \quad (2)$$

onde  $C_i$  é a quantidade de agregados estáveis em água retida no intervalo de tamanho  $i$  (%), e  $W_i$  é a massa (g) de agregados retida no intervalo de tamanho  $i$ .

Partículas como pedras, folhas e areias ( $m_i$ ) não foram consideradas como resultado do processo de agregação e, por isso, foram subtraídas do total em todos os índices de agregação do solo, considerando a modificação proposta por Palmeira et al. (1999). O diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água (DMP) foi calculado como segue:

$$DMP = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times (W_i - m_i))}{\sum_{i=1}^n (W_i - m_i)} \right] \quad (3)$$

onde  $x_i$  é o diâmetro médio de cada intervalo de tamanho  $i$  dos agregados separados por peneiramento.

#### 3.2.4. Análise estatística

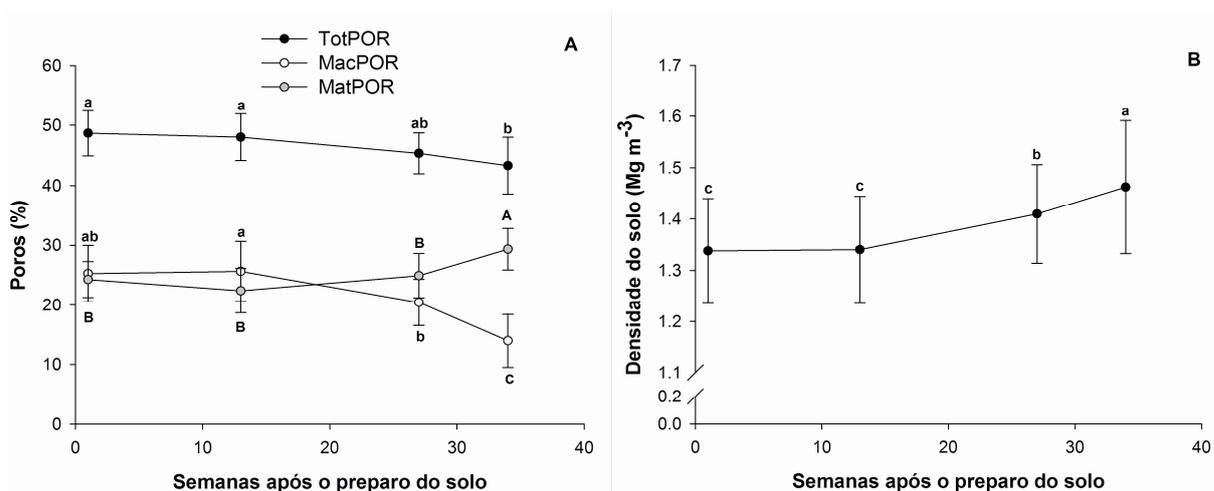
O conjunto de dados foi submetido ao teste de Shapiro-Wilk para verificar se as variáveis seguem uma distribuição normal de probabilidade. Análises de box-plot também foram conduzidas para verificar a presença de valores discrepantes. Para verificar a existência de efeito do tempo sobre os atributos de solo estudados foi utilizado um procedimento que utiliza modelos mistos e permite a análise de medidas repetidas no tempo. O modelo AR (1) - auto-regressivo de primeira ordem foi utilizado para caracterizar a variância e covariância das variáveis com o tempo, considerando as 15 áreas de produção como repetições. O teste de Tukey foi utilizado para identificar diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre as épocas de coleta em cada variável estudada.

### 3.3. Resultados e Discussão

#### 3.3.1. Atributos físicos do solo

As relações entre sólidos e espaço poroso foram significativamente alteradas durante as 34 semanas seguintes ao preparo do solo (Figura 7-A; 7-B). TotPOR decresceu significativamente entre a 1ª e a 4ª coleta, de 48% para 43,3% (teste de

Tukey,  $p < 0,05$ ), numa tendência inversa com a BulkDENS, a qual aumentou significativamente de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  para  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  com o tempo após o preparo do solo. MacPOR decresceu com o tempo, de 25,6% para 14%, enquanto que a MatPOR aumentou de 24,1% para 29,3%. As médias de TotPOR, MacPOR e MatPOR não se alteraram significativamente entre 1<sup>a</sup> e a 13<sup>a</sup> semana, mas modificaram-se significativamente entre 27<sup>a</sup> e a 34<sup>a</sup> semana após o preparo do solo.



Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

**Figura 7.** Variação temporal das médias de porosidade total (TotPOR), macroporosidade (MacPOR), microporosidade (MatPOR) e densidade do solo (BulkDENS) em 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Para a interpretação desses resultados é necessário conhecer como o sistema de produção de morango foi conduzido durante todo o ciclo de produção. Inicialmente, produtores revolveram a camada superficial do solo para construir os canteiros, causando intensa fragmentação e aumento do espaço poroso entre os agregados. A camada de solo recentemente revolvida tende a ser estruturalmente frágil, com menores valores de BulkDENS e maior volume de espaços porosos, reduzindo a capacidade de suporte de carga da camada superficial (Leij et al., 2002; Debiasi et al., 2008). Deste ponto em diante, ocorre o processo de consolidação do solo (Reichert et al., 2009), que se estende até o estabelecimento de um novo equilíbrio estrutural do solo (Leij et al., 2002). As propriedades do solo envolvidas tendem a reverter para o estado original com o tempo, e o estado da estrutura do solo se aproxima das condições anteriores ao revolvimento (Ahuja et al., 1998; Moret e Arrúe, 2007).

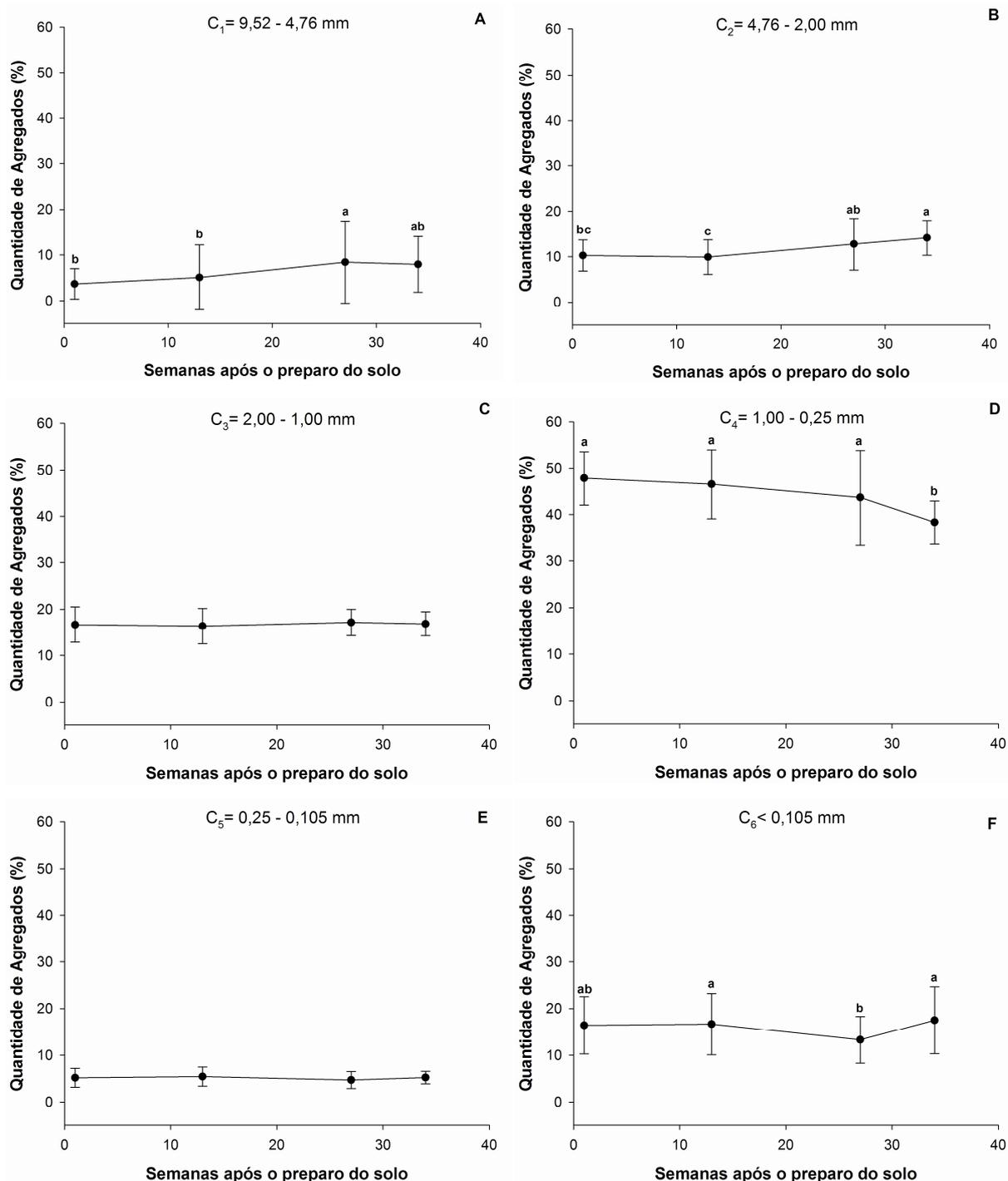
Esse padrão de modificações das relações sólidos-poros do solo poderia ser esperado, mais provavelmente nas primeiras semanas após o preparo do solo (Cassel, 1983). No entanto, as relações poros-sólidos somente apresentaram maiores modificações após a segunda amostragem, mais de 13 semanas após o preparo do solo. Tais modificações podem ser atribuídas principalmente a três efeitos: (1) processos de compressão; (2) atividade biofísica radicular; e (3) ciclos de umedecimento e secagem. O primeiro refere-se a um processo que descreve o aumento da massa de sólidos por unidade de volume (aumento da BulkDENS) sob uma força externa aplicada (Horn e Baumgartl, 2002). Se o solo não recebe quaisquer pressões externas importantes tais como tráfego de máquinas, pessoas e animais ou impacto das gotas de chuva (neste estudo o solo dos canteiros esteve coberto por lona plástica), este efeito pode ser considerado desprezível. O segundo efeito, de acordo com Hillel (2004), está relacionado com as raízes que ocupam os poros do solo e tendem a envolver os agregados. Isto aumenta a agregação através de pressões que comprimem grupos de agregados e os separam de agregados adjacentes. A extração de água pelas raízes causa desidratação diferencial, aumentando a densidade do solo próximo da zona radicular através da adesão das partículas (Young, 1998). No terceiro efeito, quando o solo é seco e re-hidratado, o movimento das partículas do solo e seu arranjo acontecerão até que a entropia seja minimizada. Como resultado, a estrutura do solo se torna mais forte e o espaço poroso total tende a ser reduzido, e a distribuição dos poros do solo por tamanho também será modificada com o tempo (Semmel et al., 1990; Leij et al., 2002).

A análise da ausência de diferenças significativas da TotPOR, MacPOR, MatPOR e BulkDENS entre a 1ª e 13ª semana também deve levar em consideração o manejo local da fertirrigação. Reisser Júnior et al. (2008) avaliou o potencial mátrico utilizando tensiômetros nas mesmas lavouras deste estudo e durante a mesma época. Neste estudo, o conteúdo de água no solo foi mantido a baixas tensões durante as primeiras 13 semanas após o preparo do solo, enquanto que durante a segunda metade do ciclo de cultivo de morango (após a 13ª semana) os solos estudados estiveram mais secos. Considerando todo o ciclo produtivo do morango, os efeitos de condições mais secas na última parte do ciclo associados com a aproximação das partículas causada pelos ciclos de umedecimento e secagem devem ter desempenhado um importante papel nas modificações do

tamanho dos poros. Também deve ser considerado que a distribuição dos poros do solo por tamanho tende ao equilíbrio após o preparo do solo, o que não significa que os atributos do solo permanecerão constantes. O sistema solo é aberto e dinâmico, sujeito a mudanças proporcionadas, por exemplo, pelos organismos do solo (Kladivko, 2001; Carter, 1988).

A distribuição dos agregados estáveis em água obtida pelo método do peneiramento úmido de agregados foi significativamente alterada com o tempo (Figura. 8). As modificações mais importantes ocorreram na quantidade de agregados maiores, com um aumento na quantidade de agregados das classes C1 e C2 durante o ciclo (Figura 8-A; 8-B), após 27 semanas. Diferentemente, C4 diminuiu significativamente após 34 semanas (Figura 8-D). As classes C3 e C5 não se alteraram com o tempo (Figura 8-C; 8-E) e a classe C6 diminuiu após 27 semanas, mas aumentou novamente após 34 semanas (Figura 8-F). O aumento em C1 e C2 pode ser resultado da união de agregados da classe C3. Por outro lado, um decréscimo em C4 pode ter ocorrido quando estes foram unidos para formar agregados da classe C3. Ainda, uma redução de C3 para formar C1 e C2 pode ter sido compensada por um aumento em C3 quando agregados da classe C4 foram unidos. As classes C5 e C6 não foram muito alteradas, provavelmente porque estes agregados permaneceram mais ou menos protegidos, pois os agentes agregantes desses agregados menores são de origem inorgânica, microbiana ou restos de plantas e fungos, pouco acessíveis para a atuação dos microrganismos (Shukla e Lal, 2004).

Os valores de DMP aumentaram significativamente na segunda metade do ciclo produtivo, de 1,24 mm na 13<sup>a</sup> semana até 1,58 mm na 27<sup>a</sup> semana (Figura 9). Por outro lado, não houve diferença significativa entre a 27<sup>a</sup> semana e 34<sup>a</sup> semana (Figura 9). Estes resultados praticamente seguem a mesma dinâmica de agregação observada por Gale et al. (2000), os quais concluíram que os valores dos índices de estabilidade de agregados do solo atingiram o seu nível máximo aos 6 meses após preparo do solo e do início de desenvolvimento das plantas.

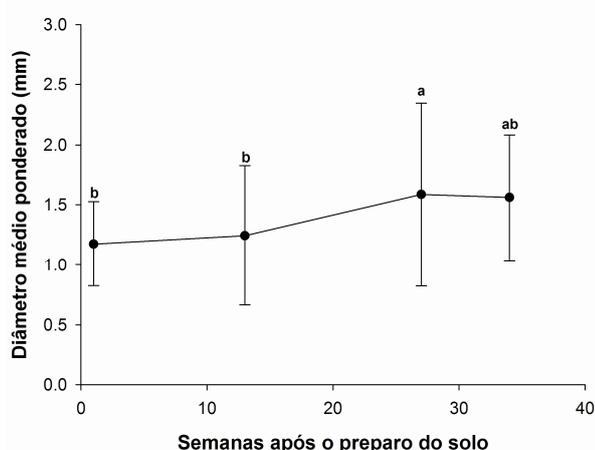


Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

**Figura 8.** Variação temporal de seis classes de tamanho de agregados (C1, C2, C3, C4, C5 e C6) separados por peneiramento úmido em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Os fatores mais importantes que afetam a agregação e estabilização das partículas do solo são a matéria orgânica e os agentes agregantes produzidos pelos microrganismos, pela atividade radicular, pela fauna do solo, pelos agentes

agregantes inorgânicos e pelas condições ambientais (Tisdall e Oades, 1982; Six et al., 2004). A identificação dos maiores agentes agregantes e como eles atuam nos solos são mais complexos devido à dificuldade de determinação do efeito individual de cada fator (Six et al., 2004). Como os agricultores não aplicaram fertilizantes orgânicos durante o ciclo do morango, tampouco antes do preparo do solo, o impacto de agentes orgânicos como a matéria orgânica de resíduos de plantas ou esterco sobre a dinâmica da agregação do solo têm menor importância nessa discussão.



Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

**Figura 9.** Variação temporal do diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água em 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Com a atividade radicular, o solo melhora a formação e estabilização da estrutura pela ação dos exsudados radiculares, raízes mortas e pêlos radiculares, promovendo a atividade microbiana e resultando na produção de matéria húmica cimentante (Hillel, 2004). De León-González et al. (2007) estudaram a influência de raízes de diferentes plantas sobre a estrutura do solo e valores de porosidade de solos arenosos mexicanos. Também mediram as mudanças da aderência do solo nas raízes de amaranto, milho e girassol em duas datas após a colheita. Estes autores concluíram que as raízes das três culturas foram responsáveis por alterações na porosidade e agregação dos solos estudados, principalmente por dois mecanismos: adesão do solo pelas raízes e alta densidade radicular. A quantidade de solo aderido às raízes de amaranto teve uma drástica diminuição depois de seis meses após a colheita, enquanto as raízes de milho e girassol mantiveram o solo

aderido durante o mesmo período de tempo. De uma forma similar, a atividade do sistema radicular de morango pode ter alguma participação no aumento de DMP depois da 13<sup>a</sup> semana após o preparo do solo.

O processo de agregação do solo pela ação cimentante de agentes inorgânicos parece ter pouca influência. Os solos estudados estão situados numa região de clima temperado, onde 14 das 15 áreas avaliadas possuem a camada superficial de (0,0 - 0,2 m) classificadas como de textura franco-arenosa (Tabela 2). Os óxidos têm maior importância em solos bem estruturados, argilosos e bem oxidados, geralmente encontrados em regiões tropicais cobertas por solos oxídicos (Neufeldt et al., 1999).

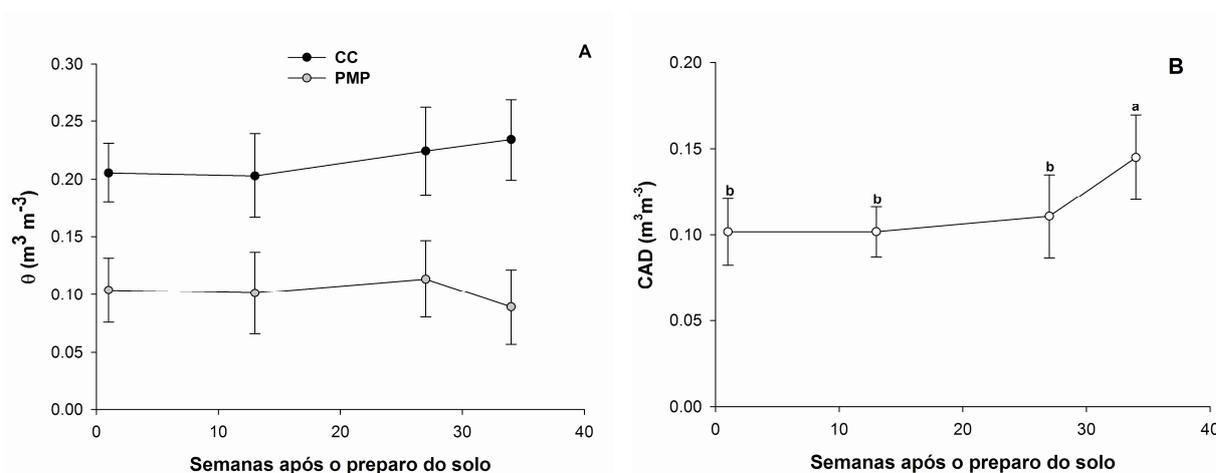
Considerando as condições ambientais, particularmente os sucessivos ciclos de umedecimento e secagem, seu impacto relativo é um tanto compensatório (Six et al., 2004). Solos cultivados que são mantidos continuamente úmidos geralmente apresentam menor agregação quando comparados com solos cultivados e submetidos a periódicos eventos de alternância entre condições secas e úmidas, pois naqueles casos ocorre rompimento de agregados (Materechera et al., 1992, 1994). Ciclos frequentes de umedecimento e secagem podem induzir a estabilização de agregados ao invés de rompê-los (Denef et al., 2001). De acordo com estes autores, a desintegração dos agregados resultante de um evento de umedecimento permite que as partículas dos solos se posicionem em configurações mais compactas, resultando numa maior coesão após o evento seguinte de secagem do solo (Kemper e Rosenau, 1984). Como consequência, os ciclos de umedecimento e secagem que ocorreram durante ciclo de produção do morango em Turuçu, parecem ter um efeito favorável sobre a agregação e estabilização dos solos, além de influenciar a distribuição por tamanho dos agregados estáveis em água.

### 3.3.2. Atributos hídricos do solo

Seguindo a mesma tendência dos valores médios de MatPOR, o conteúdo de água na CC aumentou com o tempo, passando de  $0,203 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na 13<sup>a</sup> semana para  $0,234 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na 34<sup>a</sup> semana (Figura 10-A). Mesmo que o valor médio do conteúdo de água no PMP não tenha sido significativamente menor na 34<sup>a</sup> semana quando comparado com a 1<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> semana após o preparo do solo, a combinação de

maiores valores médios também não significativos de CC e menores de PMP na 34ª semana resultou em aumento significativo da CAD, passando de  $0,101 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para  $0,145 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 10-B).

Os resultados combinados da diminuição da MacPOR e do aumento da MatPOR mostram que os solos estudados mudaram sua estrutura para uma configuração mais compacta. Estudos têm demonstrado que moderados níveis de compactação podem beneficiar a produção das culturas (Arvidsson, 1999; Alameda e Villar, 2009), particularmente em solos com boas condições hídricas e de fertilidade (Lipiec e Stepniewski, 1995), pois o bom contato solo-raiz pode contribuir para a absorção de água, aumentando a absorção de nutrientes (Kooistra et al., 1992). A quantidade de fertilizantes lixiviados por percolação profunda também pode ser reduzida em solos arenosos via compactação moderada (Agrawal, 1991), como pode ser o caso dos solos deste estudo, os quais possuem elevada quantidade de areia (maior que 53,4%, Tabela 1) e, como consequência, menor capacidade de reter e armazenar nutrientes.



Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

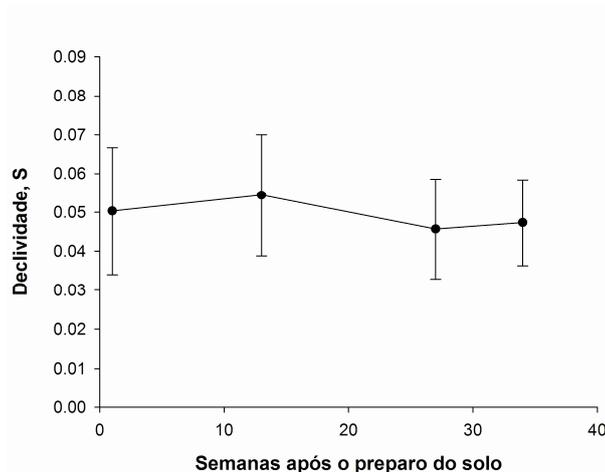
**Figura 10.** Variação temporal do conteúdo de água na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e da capacidade de água disponível (CAD) dos solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

O substancial aumento da CAD na parte final do ciclo de cultivo também pode estar relacionado com um moderado nível de compactação dos canteiros que foi afetado pelo regime hídrico e pelo manejo da fertirrigação por gotejamento. Isso significa que, se os agricultores pensam em modificar o manejo da irrigação, eles poderiam obter um aumento da CAD num estágio anterior, durante o ciclo produtivo.

Assim, a qualidade física do solo se tornaria melhor, pois a quantidade de água e nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas seria ampliada (Topp et al., 1997; Reynolds et al., 2007). De uma forma prática, maiores valores de CAD permitiriam reduzir a frequência dos eventos de irrigação.

Krüger et al. (1999) demonstraram o potencial de otimização da irrigação de morango usando um modelo climático de balanço hídrico como ferramenta de apoio à decisão. Eles concluíram que a demanda por trabalho e tempo é menor com o modelo do que com o monitoramento por meio de tensiometria. Apesar dessas vantagens, os modelos assumem que não ocorrem variações na capacidade de água disponível do solo. Como foram encontradas variações na capacidade do solo em armazenar água durante o ciclo de produção do morango, a simulação do regime hídrico em solos revolvidos pode ser problemática, uma vez que a variabilidade dos atributos hídricos do solo não é considerada pela maioria dos modelos de balanço hídrico do solo (Farkás et al., 2000).

A variação temporal do indicador S de qualidade do solo (Dexter, 2004a), considerado como um sensível indicador da qualidade física do solo (Beutler et al., 2008; Flores et al., 2008; Streck et al., 2008a), é apresentada na Figura 11. Embora um maior valor médio de S tenha sido encontrado na 13ª semana, não foi observada diferença significativa ( $p < 0,05$ ) com o tempo entre seus valores durante o período de estudo. Além disso, não foi possível identificar qualquer tipo de tendência do parâmetro S com o tempo neste estudo. Avaliando a relação do parâmetro S com outros sete indicadores já reconhecidos, Reynolds et al. (2009) investigaram ele em diferentes classes texturais de solos não expansivos à moderadamente expansivos e em meios porosos artificiais. Eles concluíram que o índice S deve ser utilizado com cautela e em associação com outros indicadores para determinar a qualidade física de solos, de forma semelhante ao que Streck et al. (2008a) haviam salientado. Entretanto, estes últimos autores não investigaram a variabilidade temporal do índice S, então mais estudos devem ser conduzidos para revelar o desempenho e a variabilidade temporal deste índice em outras classes texturais.



Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

**Figura 11.** Variações temporais dos valores médios do parâmetro S de solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, Brasil.

O parâmetro S também tem sido proposto ainda como um indicador de qualidade do solo de forma que valores mais altos revelam uma melhor e mais bem definida microestrutura do solo. Para propósitos agrícolas, ele é considerado até mesmo como um indicador da capacidade do solo em suportar a produção agrícola (Dexter, 2004a). Assumindo o critério dos valores restritivos do parâmetro S, propostos por Dexter (crescimento radicular adequado tipicamente requer valores de  $S > 0,030$ ), observa-se que esse limite foi superado em todas as áreas estudadas, excetuando-se numa propriedade na 1ª semana após o preparo do solo ( $S = 0,023$ ) e uma na 27ª semana ( $S = 0,028$ ), indicando que, em geral, não ocorreram restrições à atividade radicular nos canteiros utilizados para a produção de morango em Turuçu, RS.

### 3.4. Conclusões

Os atributos físicos e hídricos do solo das áreas de produção de morango foram sujeitos a variações temporais importantes a partir de 13 semanas após o revolvimento do solo.

Embora os valores de porosidade total e macroporosidade tenham diminuído com o tempo e a densidade do solo tenha aumentado até a última avaliação, os solos estudados mantiveram favorável a sua capacidade de suportar a atividade

radicular. No entanto, não foi possível identificar uma tendência do parâmetro S com o tempo. A agregação do solo aumentou com o tempo.

A capacidade de água disponível (CAD) aumentou ao final do ciclo de cultivo de morango, melhorando a qualidade física dos solos cultivados com morango em Turuçu, RS e possibilitando a redução da frequência dos eventos de irrigação.

## **4. ARTIGO 2 – SALINIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE MORANGO CULTIVADAS SOB FERTIRRIGAÇÃO**

### **4.1. Introdução**

Enquanto o crescimento anual da área total irrigada no mundo esteve próximo de 1% nos últimos anos, com projeção de 0,6% ao ano nos próximos 20 anos (Faurès et al., 2010), a área mundial ocupada com sistemas de micro-irrigação tem crescido na razão de 15% ao ano de 2000 a 2006 (Reinders, 2006). Ao mesmo tempo em que as áreas irrigadas crescem, a quantidade de água considerada de boa qualidade tem sido cada vez mais escassa. A salinidade é um problema comum em áreas irrigadas, afetando entre 20 e 30 milhões de hectares das áreas mundiais irrigadas (FAO, 2000). Alguns autores como a FAO (2000) estimam que a área total afetada pela presença de sais está acima de 20% do total da área utilizada na agricultura. Mesmo em regiões climáticas úmidas e sub-úmidas, os processos de salinização derivados de práticas de irrigação com água de qualidade inadequada têm sido reportados (FAO, 1988).

A limitação da produtividade das culturas causada pela salinidade do solo é geralmente encontrada em regiões áridas e semi-áridas. Ela acontece quando a presença de solutos na solução do solo ocorre em concentrações prejudiciais para a produção das culturas, ou pela combinação de baixas precipitações com altas taxas de evaporação, resultando em lixiviação insuficiente e acúmulo de sais nos horizontes superficiais (Hillel, 2000; FAO, 2002). Solos sequencialmente irrigados com água de alta condutividade elétrica (CE) também podem ter aumento da concentração de sais. A água que infiltra e percola no perfil carrega sais que são adsorvidos pelas cargas elétricas do solo num processo cumulativo, até que a concentração de íons no complexo de troca atinge níveis prejudiciais para as culturas.

No manejo de lavouras irrigadas, deve ser levada em consideração a quantidade de água requerida pelas plantas por meio da transpiração e as frações adicionais de água de irrigação necessárias para a lixiviação do excesso de sais, com o fim de evitar a sua acumulação em horizontes superficiais. Em regiões áridas

e semi-áridas, a quantidade de água aplicada via irrigação é geralmente calculada considerando a salinidade como um importante fator limitante. Por outro lado, em regiões com regimes hídricos úmidos e sub-úmidos, a irrigação é normalmente desnecessária. Mas a ocorrência de curtos períodos de estiagem justamente durante fases importantes do ciclo da cultura, tais como o florescimento e a frutificação, podem excepcionalmente causar grandes decréscimos na produtividade das culturas. A irrigação promove vantagens nessas regiões, sendo proporcional às necessidades das plantas. O acúmulo de sais é considerado não limitante e, portanto, não considerado.

A irrigação por gotejamento associada com a cobertura do solo com lona plástica preta é uma técnica utilizada em lavouras de morango. Agricultores utilizam a irrigação por gotejamento devido à menor quantidade e à maior eficiência na aplicação de água ao solo, quando comparado com outros sistemas de irrigação. A redução das perdas de água por percolação profunda resulta no aumento da eficiência da utilização da água e do solo. O emprego da cobertura plástica do solo aumenta ainda mais a eficiência desses sistemas de irrigação por gotejamento devido à redução das perdas de água por evaporação.

A irrigação localizada por gotejamento também é dimensionada e instalada para propósitos de fertirrigação. Ela pode aumentar substancialmente a qualidade e produtividade dos frutos com menor aplicação de água e fertilizantes (Hanson e May, 2004; Selim et al., 2009; Souza et al., 2009). Entretanto, se a água de irrigação com alta concentração de sais é aplicada, durante considerável período de tempo, ela também pode aumentar a concentração de sais no solo e aumentar a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs), reduzindo a capacidade de água disponível (CAD). Essa situação pode ser agravada com a utilização de cobertura do solo com lona plástica. Apesar de suas vantagens, essa cobertura modifica o regime de infiltração de água nas camadas superficiais do solo, dificultando a lixiviação natural de sais devido à chuva.

O cultivo de culturas sensíveis com relação ao decréscimo de produtividade em função do aumento da salinidade do solo também é limitante em sistemas fertirrigados por gotejamento. Valores superiores a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  podem reduzir a produtividade potencial da cultura do morango (Ehlig e Bernstein, 1958; Osawa, 1965), considerada uma das culturas mais sensíveis à salinidade do solo. Determinando o efeito da salinidade sobre os parâmetros de crescimento de plantas

de duas cultivares de morango, Turhan e Eris (2007) concluíram que todos os parâmetros de crescimento de plantas avaliados naquele estudo foram afetados pela salinidade. Segundo os mesmos autores, as plantas de morango desenvolvem mecanismos fisiológicos como a redução da condutância estomatal e da taxa de transpiração para poder conviver com o excesso de sais, mas tendem a reduzir sua produtividade.

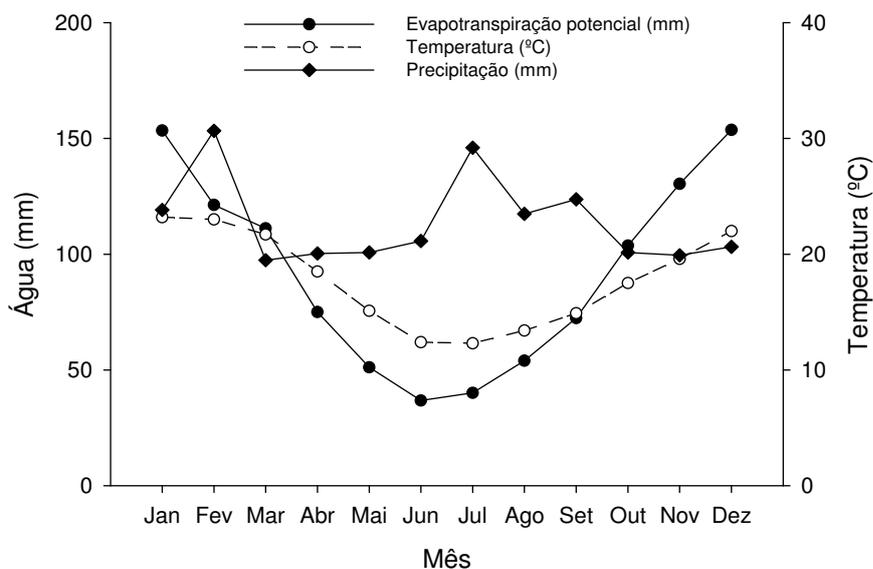
O uso da fertirrigação por gotejamento e a cobertura do solo com lona plástica modificam o regime hídrico do solo e também a composição do extrato de saturação do solo. Considerando que aquelas duas tecnologias foram inseridas recentemente na região de Turuçu, não existem estudos sobre o impacto dessas técnicas sobre a variação temporal da salinidade e da composição do extrato de saturação do solo em canteiros cultivados com morango, bem como o quanto a salinidade do solo nos canteiros afeta a disponibilidade de água às plantas.

O objetivo deste trabalho foi determinar a variação temporal da salinidade no extrato de saturação do solo e o seu efeito sobre a capacidade de água disponível (CAD) em 15 áreas de produção de morango cultivadas com a utilização de fertirrigação por gotejamento e cobertura plástica em Turuçu, RS, Brasil.

## **4.2. Material e Métodos**

### **4.2.1. Áreas de estudo**

A região de estudo se localiza em uma transição entre as províncias geomorfológicas do Escudo Sul-riograndense e a Planície Costeira Interna. Argissolos, Cambissolos e Gleissolos são os três principais tipos de solos encontrados nessa região (Anexo A). A temperatura média regional é de 17,8°C e a precipitação média anual é de 1367 mm (Figura 12). A camada superficial do solo possui textura franco-arenosa em 14 das 15 áreas estudadas (Tabela 2). A média de densidade de partículas destes solos é de 2,56 Mg m<sup>-3</sup>, variando de 2,52 a 2,62 Mg m<sup>-3</sup>.



Fonte: Dados originais da estação meteorológica Embrapa- UFPel de Capão do Leão, RS.

**Figura 12.** Gráfico de distribuição das médias mensais de uma série histórica de 30 anos (normais climatológicas de 1971 a 2000) da temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial.

As lavouras foram preparadas em junho de 2007, onde o solo foi inicialmente lavrado e depois revolvido com enxada rotativa encanteiradora movida por trator. Canteiros de aproximadamente 0,2 m de altura e com diferentes comprimentos foram construídos em pequenas áreas que variaram de 0,1 a 0,5 ha. As mudas de morango foram dispostas em duas a três fileiras nos canteiros previamente cobertos com plástico preto. O sistema de fertirrigação era composto de duas linhas de gotejadores em cada canteiro, espaçadas de 0,3 m entre si. Eventualmente, túneis baixos de plástico translúcido foram utilizados para cobrir os canteiros e plantas durante todo o ciclo.

#### 4.2.2. Coleta e preparo de amostras

Amostras de solo de estrutura preservada foram coletadas na camada de 0,03-0,07 m e consideradas como representativas da camada de 0,00-0,10 m. Foram utilizados cilindros de aço inoxidável de volume de  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  para realizar as amostragens no centro dos canteiros do terço médio de cada lavoura, totalizando

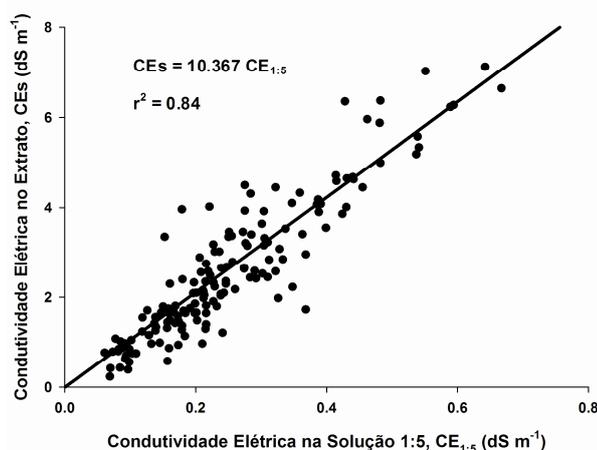
3 repetições destinadas à determinação da curva de retenção de água no solo. As 15 lavouras foram então divididas em três partes de acordo com a posição no relevo: terço superior, médio e inferior. Em cada uma das partes foram coletadas 5 amostras simples na camada de 0,0 a 0,2 m utilizando trados do tipo holandês. As amostras simples foram unidas para formar uma amostra composta para cada terço, destinada à obtenção do extrato de saturação do solo. Realizaram-se amostragens em quatro diferentes tempos durante o ciclo de produção de morango: a primeira amostragem ocorreu na última semana de junho de 2007, logo após a construção dos canteiros; a segunda ocorreu na primeira semana de setembro de 2007, após o plantio das mudas e antes do estágio produtivo da cultura; a terceira ocorreu na segunda semana de dezembro de 2007, durante a fase de colheita do morango e aplicação da fertirrigação; a quarta ocorreu na última semana de janeiro de 2008, após a colheita e a fertirrigação.

#### 4.2.3. Análises laboratoriais

As curvas de retenção de água no solo foram obtidas utilizando a mesa de tensão para baixas tensões (1, 6 e 10 kPa) e as câmaras de pressão de Richards para altas tensões (33, 100 e 1500 kPa). Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Groenevelt et al. (2004) (equação 5), implementado no software MathCAD 2000 (Mathsoft, 1998).

Para a obtenção do extrato de saturação, as amostras foram preparadas de acordo com Rhoades (1982), adicionando-se água destilada ( $EC < 5 \mu S m^{-1}$ ) em 200 g de solo passado em peneira de 2 mm de abertura de malha até atingir o ponto de saturação, alcançado quando a amostra demonstrou um brilho característico em sua superfície. A mistura permaneceu dessa forma e em repouso durante 6h para possibilitar o movimento de íons para a solução do solo. Os extratos de saturação foram obtidos através de bomba de vácuo e papel filtrante com poros de diâmetros inferiores a 0,12  $\mu m$ . Foram determinados seis parâmetros, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs), avaliada com um condutivímetro de bancada com leituras corrigidas para 25°C; pH, medido com pH-metro; sódio (Na) e potássio (K), determinados por fotometria de chama; cálcio (Ca) e magnésio (Mg), medidos por espectrometria de absorção atômica, determinados conforme a metodologia descrita

em Embrapa (1997). Como a determinação de CEs em laboratório é demorada e trabalhosa, determinou-se também a  $CE_{1:5}$  = condutividade elétrica na solução 1:5 (em base de massa, 1 porção de solo para cada 5 porções de água destilada) dos solos utilizados na produção de morango em Turuçu, que é uma determinação mais fácil e rápida. Realizou-se uma regressão linear simples entre as duas variáveis, gerando-se a equação para estimar a CEs dos solos de Turuçu, RS a partir de determinações de  $CE_{1:5}$  pela equação:  $CEs = 10,37.CE_{1:5}$ ,  $r^2 = 0,84$  (Figura 13).



**Figura 13.** Regressão linear entre a condutividade elétrica na solução 1:5 ( $CE_{1:5}$ ) e no extrato de saturação (CEs) de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil.

A razão de adsorção de sódio (RAS) foi calculada por meio da equação:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

onde  $Ca^{2+}$ ;  $Mg^{2+}$  e  $Na^+$  foram obtidos do extrato de saturação do solo ( $mmol_c L^{-1}$ ). A porcentagem de sódio trocável (PST), a partir da relação:  $PST = (Na^+ \text{ trocável} / CTC_{efetiva} \times 100)$ .

#### 4.2.4. Capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo

A capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo (CADs) foi determinada conforme Groenevelt et al. (2004). Inicialmente, Groenevelt et al.

(2001) apresentaram uma forma de calcular a CAD levando em consideração os fatores físicos que limitam a disponibilidade de água às plantas, como a aeração, a resistência do solo à penetração e a condutividade hidráulica. O método clássico de cálculo da CAD leva em consideração apenas parâmetros da própria curva de retenção, sem admitir a influência do potencial osmótico. Mais tarde, Groenevelt et al. (2004) desenvolveram um método de cálculo específico para calcular a CAD considerando-a como dependente não mais apenas dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, mas também a influência do potencial osmótico relacionado com a CEs do solo, explorado neste estudo. Os passos gerais para o cálculo da CADs são descritos a seguir:

Primeiramente, os dados das curvas de retenção de água no solo foram ajustados ao modelo de Groenevelt et al. (2004). Nesse caso, a curva foi fixada na extremidade úmida (saturação, definido como o conteúdo de água retido no solo quando o potencial mátrico é igual a zero) e na extremidade seca (ponto de murcha permanente, definido como o conteúdo de água retido no solo à tensão 1500 kPa), tendo a curva apenas um ponto de inflexão. A fórmula utilizada para o ajuste dos dados de conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ) é a seguinte:

$$\theta(h_m) = \theta_r + k[\exp(-d150^{-n}) - \exp(-d h_m^{-n})] \quad (5)$$

onde  $h_m$  é o potencial mátrico (m) em módulo, portanto considerado sempre positivo;  $\theta_r$  é o conteúdo de água volumétrico no ponto de murcha permanente;  $k$  e  $n$  são positivos e parâmetros de ajuste adimensionais; e  $d$  é um parâmetro dado em (metros)<sup>n</sup>. Para o ajuste dos dados experimentais das curvas de retenção ao modelo, utiliza-se o módulo iterativo Levenberg-Marquardt, implementado no software MathCad 2000 (Mathsoft, 1998) que utiliza uma função para minimizar a soma de quadrados dos resíduos durante o ajuste dos parâmetros  $k$ ,  $n$  e  $d$ .

O potencial osmótico ( $h_o$ ) está diretamente relacionado com a quantidade de sais presentes na solução do solo. Uma forma fácil de obtenção aproximada de  $h_o$  é utilizar a CEs como estimador de  $h_o$  no solo, podendo ser determinado pela fórmula:

$$h_o = 3,6 \text{ CEs} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

em que CEs é a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo ( $\text{dS m}^{-1}$ ). A relação entre a CEs e o potencial mátrico em que ocorre o ponto de murcha permanente (PMP) foi obtida pela seguinte relação:

$$\text{CEs}(h_m) = (150 - h_m) (3,6 \theta_s)^{-1} \{ \theta_r + k [\exp(-d 150^{-n}) - \exp(-d h_m^{-n})] \} \quad (7)$$

onde  $\theta_s$  é o conteúdo de água no solo na condição de saturação ( $h_m = 0$ ). A CADs na forma diferencial (capacidade de água diferencial,  $C(h_m)$ ) é obtida matematicamente diferenciando-se o conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ) em relação ao potencial mátrico ( $h_m$ ). Como resultado, tem-se a equação:

$$C(h_m) = -d\theta / dh_m = n d k h_m^{-(n+1)} \exp(-d h_m^{-n}) \quad (8)$$

onde  $C(h_m)$  é a declividade da curva de retenção de água no solo. Groenevelt et al. (2001) desenvolveram uma fórmula geral para o cálculo da CADs, denominada por esses autores como “Integral Water Capacity” – IWC. Esse índice pode ser determinado integrando-se a forma diferencial  $C(h_m)$  e levando-se em consideração diversos fatores que afetam a disponibilidade de água às plantas através de funções ponderadas ( $\omega_o(h_m)$ ):

$$\text{CADs} = \text{IWC} = \int_0^\infty \left( \prod_{i=1}^n \omega_o(h_m) \right) C(h_m) dh_m \quad (9)$$

Cada função ponderada precisa ser determinada experimentalmente, de maneira que cada fator que afeta a disponibilidade de água possa ser representado corretamente. Como no trabalho de Groenevelt et al. (2004), será tratado aqui apenas a função ponderada que leva em consideração o efeito da salinidade, desconsiderando-se os demais fatores físicos que afetam a CAD (ou IWC), como a aeração, a resistência do solo à penetração e a condutividade hidráulica. Essa função ponderada apresenta um limite superior (situação em que o potencial osmótico não afeta as plantas, ou seja, elas toleram esse efeito e a sua produtividade não é afetada). Nessa condição:

$$\omega_o(h_m) \equiv dh_m / dh_{om} \quad (10)$$

Em que  $h_{om} = h_m + h_o$  é definido como potencial osmo-mátrico. Porém, quando as plantas são sensíveis à salinidade (como é o caso do morango), tem-se que:

$$\omega_o = [(dh_o / dh_m) + 1]^{-1} \quad (11)$$

neste caso, a CADs é afetada por esse fator ao máximo, produzindo o valor de CADs mais baixo possível em função da salinidade. Nestas condições, a CADs pode ser calculada por:

$$CADs(h_{os}) = \int_0^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} h \, d k \, h_m^{-n+1} \exp(-d h_m^{-n}) \right]^{-1} + h_{os} \theta_s \left\{ \theta_r + k \left[ \exp(-d 150^{-n}) - \exp(-d h_m^{-n}) \right] \right\}^{-2} \right]^{-1} \quad (12)$$

onde o valor da CADs resultante é dado em  $m^3 \, m^{-3}$ , sendo agora dependente do potencial osmótico do solo.

#### 4.2.5. Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificar se as variáveis seguem uma distribuição normal de probabilidade. Também foi conduzida a análise de box-plot para verificar a presença de valores discrepantes. Para verificar a existência de efeito do tempo sobre as variáveis do extrato de saturação, foi utilizado um procedimento que permite a análise de medidas repetidas no tempo. O modelo AR (1) - auto-regressivo de primeira ordem foi utilizado para caracterizar a variância e covariância das variáveis com o tempo. O modelo AR (1) pressupõe que a covariação é maior entre medidas mais próximas entre si do que as medidas mais distantes entre si. O teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) foi usado para a comparação de médias das variáveis estudadas.

### 4.3. Resultados e Discussão

#### 4.3.1. Variação temporal do extrato de saturação do solo

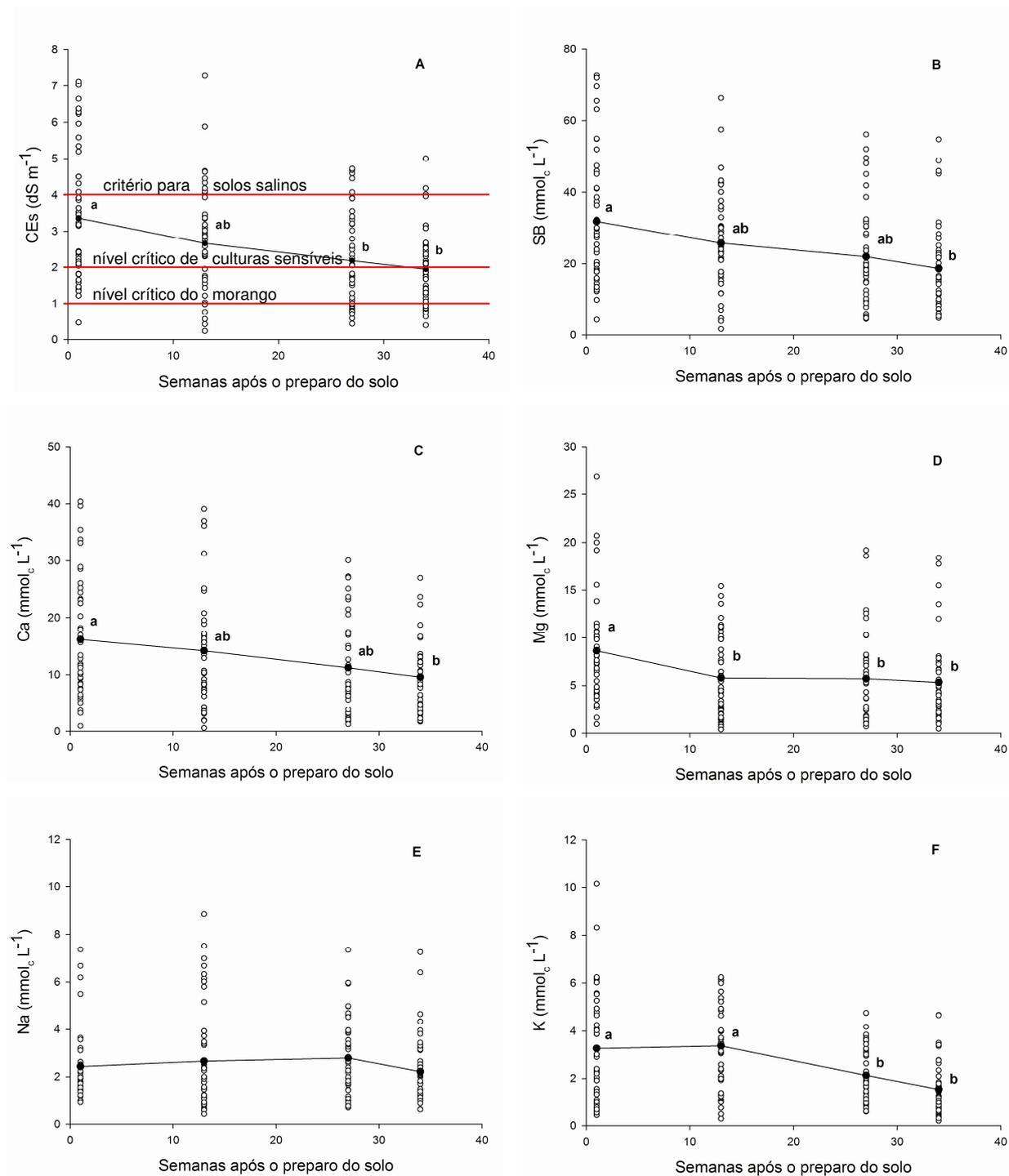
A maior parte das variáveis do extrato de saturação do solo avaliadas foi alterada significativamente com o tempo (Figura 14). Com exceção do  $Na^+$  (Figura 14-E), todas as demais apresentaram decréscimo significativo com o tempo. Em relação aos valores médios da concentração de cada elemento que compõe a

solução do solo,  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 14-C) e  $\text{Mg}^{2+}$  (Figura 14-D) predominaram em comparação aos demais componentes, onde em termos de concentração, a ordem  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  foi encontrada na última avaliação. Como a soma de bases (SB) (Figura 14-B) é o somatório das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , a variação temporal de SB foi influenciada predominantemente pela dinâmica temporal desses elementos. Pelo fato de SB apresentar alta correlação com CEs ( $r=0,94$ , Tabela 3), a variação temporal de CEs (Figura 14-A) também pode ser explicada pela variação dos elementos que constituem SB.

A condutividade elétrica é diretamente afetada pelo tipo de íons presente e a sua respectiva concentração na solução do solo. Conforme a classificação quantitativa proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos e formulada por Richards (1954), solos que apresentam valores de CEs superiores a  $2 \text{ dS m}^{-1}$  já podem apresentar algum tipo de restrição à produtividade agrícola de culturas mais sensíveis à salinidade. Nesse sentido, observou-se que grande parte das amostras apresentou valores superiores a esse limite (56%), principalmente na primeira amostragem (71%). Ainda, de acordo com a mesma classificação, valores de CEs acima de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  caracterizam o caráter salino ( $4 \text{ a } 7 \text{ dS m}^{-1}$ ). Observando este critério, 18% das amostras apresentaram valores superiores a esse limite, onde 11 dos 15 produtores tiveram pelo menos um valor superior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  ao longo do ciclo produtivo.

Tais valores seriam esperados se tivessem como origem solos de regiões áridas ou semi-áridas. Porém, a região estudada é de clima úmido, do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, e a camada superficial não apresenta depósitos ou material de origem que possa se intemperizar e disponibilizar  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  ao ponto de ser considerado o responsável por tais valores. Um dos fatores que interferem nos valores de CEs é a quantidade de sulfato de cálcio ou gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4$ ) presente no solo. Solos com apreciáveis quantidades de  $\text{CaSO}_4$ , não sódicos e com baixa quantidade de  $\text{Mg}^{2+}$  na sua composição, podem ter valores de CEs entre  $1 \text{ e } 3 \text{ dS m}^{-1}$  superiores a solos sem estas condições (Bernstein, 1962; FAO, 2002). Isso ocorre devido a uma maior dissolução do  $\text{CaSO}_4$  durante o preparo dos extratos de saturação. Entretanto, não há relatos na literatura da ocorrência de horizontes ou depósitos de acumulação desse material, tampouco os produtores o aplicam na forma de corretivo. Por isso, os valores de CEs não devem estar sendo influenciados pela presença de gesso agrícola. Segundo

Bernstein (1962), plantas que se desenvolvem em solos sob tais condições podem tolerar até  $2 \text{ dS m}^{-1}$  a mais em relação ao seu valor crítico usual.



CEs - Condutividade elétrica do extrato de saturação; SB - soma de bases.

Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey,  $p < 0,05$ ).

**Figura 14.** Variação temporal de atributos químicos do extrato de saturação de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Por outro lado, condições climáticas como alta temperatura e baixa umidade relativa do ar podem diminuir a tolerância a sais pelo decréscimo do valor crítico de CEs da cultura e aumentar a taxa de decréscimo da produtividade por unidade de aumento da CEs. Assim, o decréscimo de produtividade é maior com o aumento da salinidade em condições mais quentes e secas do que em ambientes úmidos e frios (Karlberg et al., 2006; Hoffman e Shannon, 2007).

As fontes de água utilizadas para a irrigação podem conduzir para o aumento gradual da salinidade do solo. Fontes de água subterrânea possuem, com frequência, níveis elevados de sais dissolvidos, os quais tendem a se acumular nas camadas superficiais, aumentando a CEs do solo. Numa caracterização e avaliação da qualidade da água captada para a irrigação quanto ao tipo e ao risco de causar salinização do solo das mesmas propriedades deste estudo, Estrela (2009) constatou que todas as fontes de água para a irrigação de morango são superficiais, e que nenhuma das fontes de água apresentou risco médio ou elevado de causar salinização do solo.

Além disso, o próprio sistema de irrigação, quando não bem projetado e operado, potencializa o processo de salinização do solo. Os sistemas de irrigação devem estar dimensionados para possibilitar a aplicação de lâmina de lixiviação para a drenagem dos sais que por ventura possam estar se acumulando na camada superficial do solo. O principal fator a ser controlado com o fim de se evitar a salinização do solo é manter o equilíbrio entre a quantidade de sais que é fornecida ao solo via adubação de base e fertirrigação com a quantidade de sais que é retirada através da drenagem e pelas plantas. No caso das lavouras de morango deste estudo, a irrigação é manejada de forma a provocar apenas o umedecimento do solo (sem a aplicação da lâmina de lixiviação), no intuito de evitar perdas de água. Porém, isto é potencialmente perigoso no que diz respeito à acumulação e ascensão de sais (Tan, 1998). Conforme Darwish et al. (2005), agricultores do Líbano trocaram o sistema de irrigação por aspersão pelo sistema de gotejamento, na tentativa de diminuir o consumo de água na produção agrícola. Mas, a salinidade do solo aumentou pelo manejo incorreto da fração de água destinada à lixiviação do excesso de sais, resultando em diminuição da produtividade ao ponto de causar abandono de terras por parte dos agricultores.

Assim, o manejo da cultura pode ser responsável por profundas modificações no equilíbrio dinâmico da água e solutos do solo. A aplicação de

fertilizantes em níveis muito acima do recomendado é uma prática rotineira entre os produtores de morango. Relatos dos próprios técnicos e agricultores dão conta de que muitos multiplicam por dois ou três a dose anual recomendada pelo Manual de Recomendação de Adubação e Calagem do RS/SC (CQFS, 2004), aplicada na forma de adubação de base no momento do preparo do solo. Além disso, durante as fases de crescimento e produção de frutos do ciclo da cultura, há a complementação da aplicação de fertilizantes na forma líquida via fertirrigação. Estas adubações podem saturar o complexo de troca, e a concentração de nutrientes pode atingir níveis superiores quando comparados aos que os solos são capazes de reter, resultando em salinização e em perdas do excesso de fertilizantes aplicados por lixiviação.

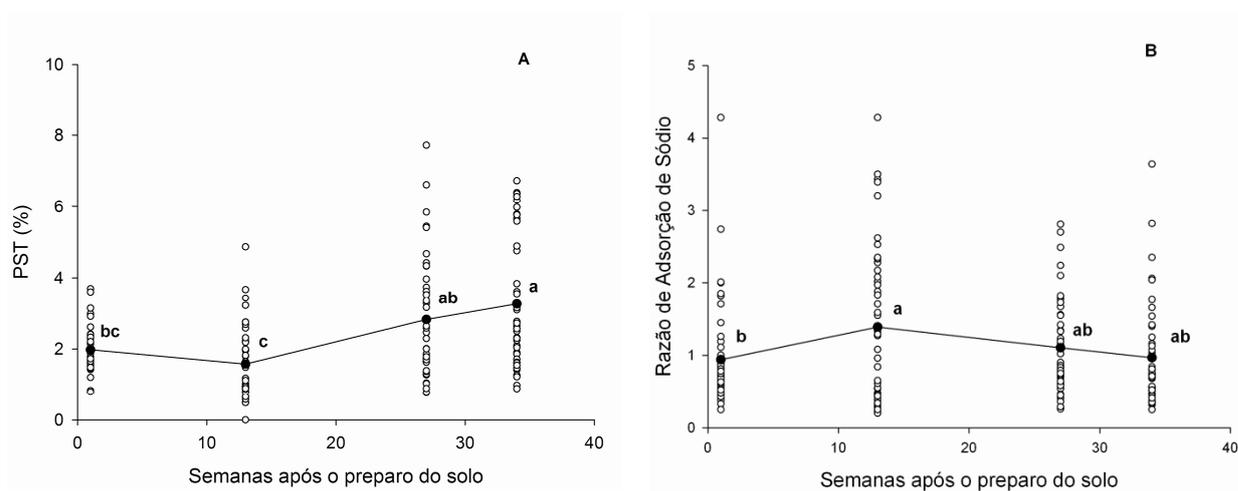
A porcentagem de sódio trocável (PST), considerada como indicador da ocorrência do processo de solonização do solo, aumentou significativamente com o tempo, da 13<sup>a</sup> semana até a 34<sup>a</sup> semana após o preparo do solo (Figura 15-A). Esse aumento de  $\text{Na}^+$  pode estar associado à água utilizada na irrigação do morango, que mesmo classificada como de baixo risco à salinização do solo, pode causar aumento da concentração de  $\text{Na}^+$  devido à aplicação suplementar de fertilizantes líquidos via fertirrigação. Estes fertilizantes podem contribuir com quantidades consideráveis de  $\text{Na}^+$ , resultando na manutenção da concentração do  $\text{Na}^+$  no extrato de saturação da camada superficial, fato que pode ser verificado pela manutenção dos valores médios do elemento durante o período de aplicação da fertirrigação (Figura 14-E).

Os valores médios da PST aumentaram consideravelmente a partir da 13<sup>a</sup> semana após o preparo do solo. Valores de PST acima de 6% são geralmente encontrados em solos onde os sais solúveis acumulados pela salinização (exceto  $\text{Na}^+$ ) já foram lixiviados ou extraídos pelas plantas, resultando numa alta saturação da CTCefetiva por  $\text{Na}^+$  trocável. Nessa condição, 4% das amostras analisadas apresentaram  $\text{PST} > 6\%$ , a partir da 27<sup>a</sup> semana após o preparo do solo, evidenciando a tendência de aumento da concentração de  $\text{Na}^+$  no complexo de troca em comparação com os demais íons da camada estudada (0,0-0,2m).

A razão de adsorção de sódio (RAS) aumentou entre a 1<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> semana após o revolvimento do solo, mas diminuiu até a 34<sup>a</sup> semana, retornando a um nível semelhante ao do início da avaliação (Figura 15-B). A RAS expressa a atividade relativa de íons  $\text{Na}^+$  nas reações de troca do solo (Hillel, 2000), em relação ao  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Segundo o mesmo autor, concentrações de  $\text{Na}^+$  na solução superiores a 5

mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> podem causar diminuição da produtividade de plantas mais suscetíveis à toxidez por Na<sup>+</sup>, como as derivadas do gênero citrus. Para a cultura do morango, não foram encontrados trabalhos que citam limites críticos de Na<sup>+</sup> na solução.

Foi realizada ainda a análise da influência de cada variável do extrato de saturação sobre a CEs (Tabela 3). Pode-se observar que todas as variáveis apresentaram correlação significativa com a CEs (teste de Tukey, p<0,05), sendo que Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> tiveram os mais altos coeficientes de correlação de Pearson (0,93 e 0,75, respectivamente). Estabelecendo correlações e aplicando a análise dos componentes principais entre cátions e ânions presentes no extrato de saturação do solo, Visconti et al. (2009) encontraram que as concentrações de Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> e CaSO<sub>4</sub> foram altamente correlacionadas com o primeiro componente principal, identificado como aquele que explica a variância da CEs e da salinidade do solo.

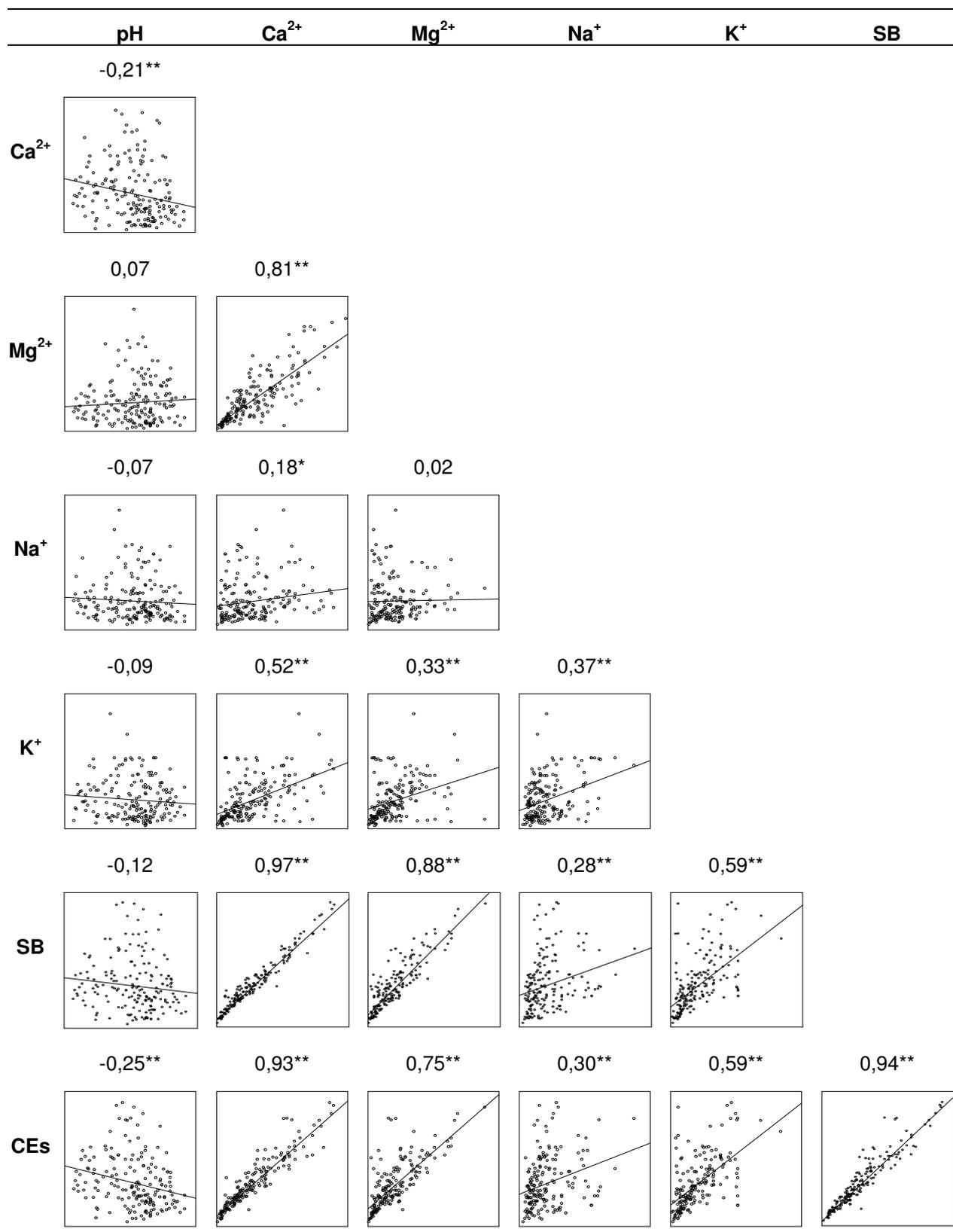


PST - porcentagem de sódio trocável.

Letras diferentes representam diferença significativa entre médias (Teste de Tukey, p<0,05).

**Figura 15.** Variação temporal da porcentagem de sódio trocável (PST) e da razão de adsorção de sódio (RAS) do extrato de saturação de solos de 15 áreas de cultivo de morango em Turuçu, RS, Brasil.

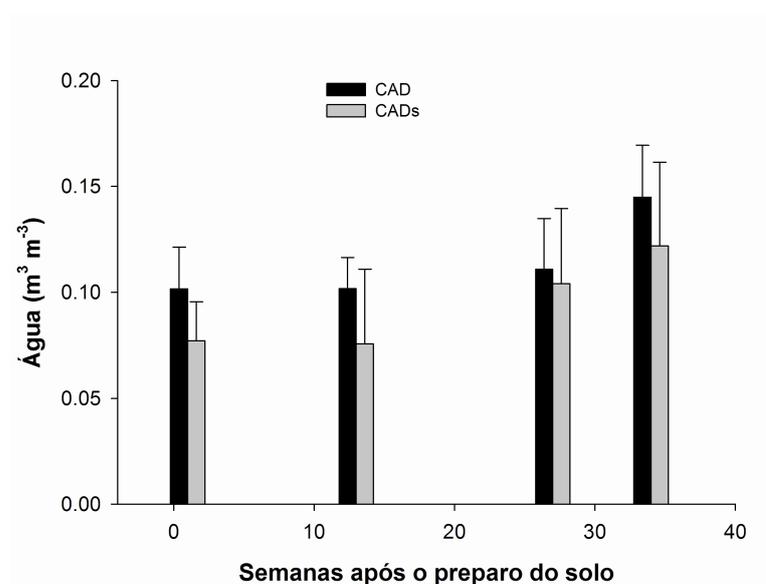
**Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson de CEs, pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e SB do extrato de saturação do solo de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.



CEs – Condutividade elétrica do extrato de saturação; SB – soma de bases.

#### 4.3.2. Capacidade de água disponível considerando a salinidade do solo

A capacidade de água disponível foi significativamente alterada quando a salinidade do solo, mensurada através da CEs, foi introduzida como variável no cálculo da CADs (Figura 16). Apesar de seguir praticamente a mesma tendência com relação ao tempo, os valores médios da CADs apresentaram-se inferiores aos valores médios da CAD calculada da forma tradicional. É preciso salientar, no entanto, que o método proposto por Groenevelt et al. (2004) assume que o efeito da salinidade é máximo. O resultado obtido é o total de água retido e disponibilizado pelo solo às plantas de forma que elas funcionam como um osmômetro perfeito (coeficiente de reflexão=1). Neste caso, a habilidade da espécie em tolerar a presença de sais no meio não é levada em consideração, por isso, mesmo que o solo apresente um baixo valor de CEs, este já causa um importante decréscimo da CAD.



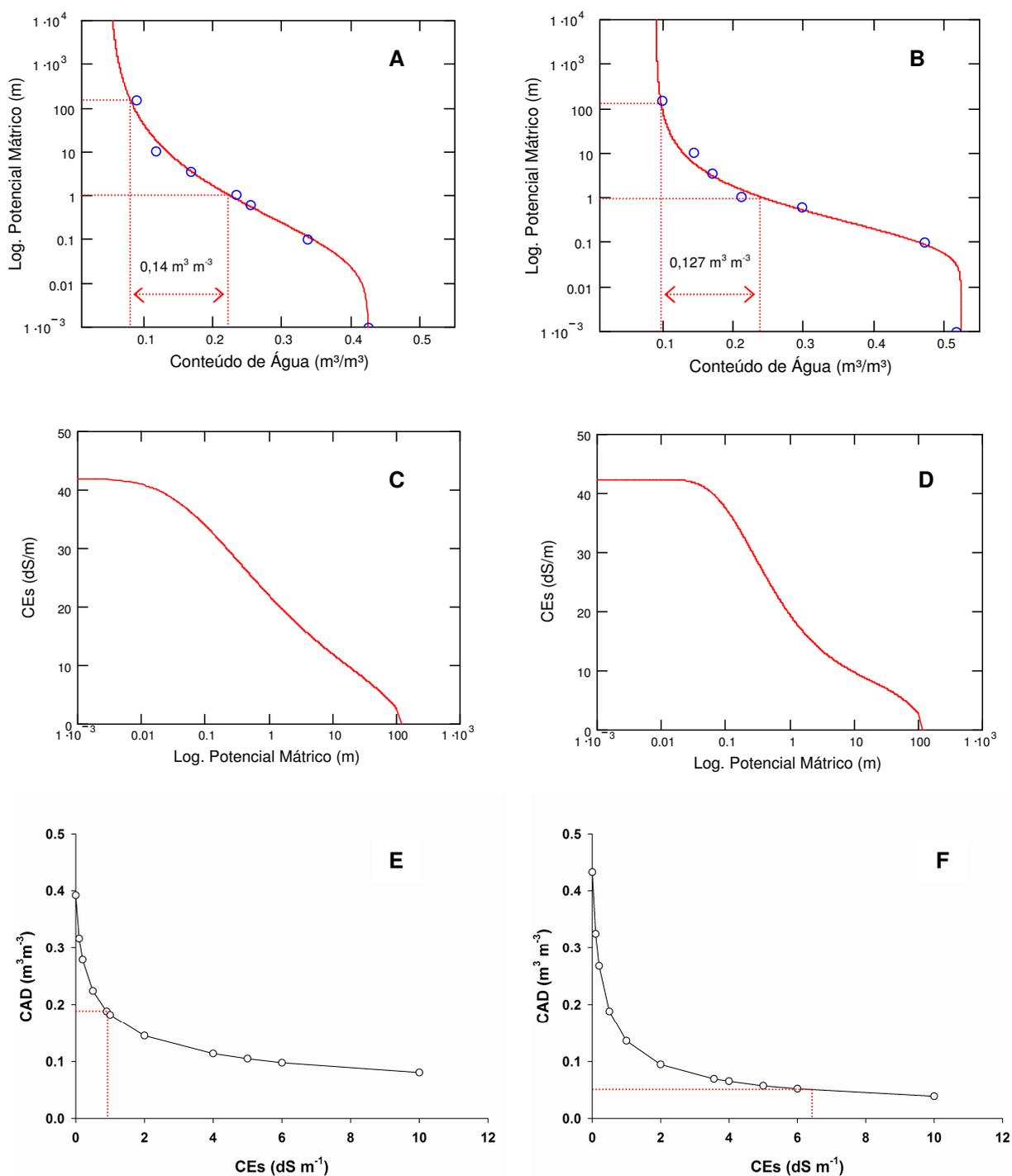
Barras verticais indicam o desvio padrão da média de cada amostragem.

**Figura 16.** Capacidade de água disponível obtida da forma tradicional (CAD, considerando CC e PMP) em relação à capacidade de água disponível calculada considerando a salinidade (CADs) dos solos de 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Na Figura 17 são comparados dois solos cultivados com morango em Turuçu, RS, com formatos da curva de retenção bem distintos e diferentes níveis de salinidade, um com baixo valor de CEs (esquerda), e outro com alto valor de CEs

(direita). Apesar deste trabalho não ter como objetivo verificar a capacidade do modelo de Groenevelt et al. (2004) em se ajustar aos dados das curvas de retenção de água no solo, pôde ser observado que ele foi capaz de se ajustar aos dados observados, a partir de amostras de solo em Tururuçu, independentemente do formato da curva de retenção (Figura 17-A; 17-B). Comparando os dois solos com relação ao potencial mátrico ( $h_m$ ) em que ocorrerá o ponto de murcha permanente (PMP) devido à CEs de cada um, pode ser observado que os comportamentos são distintos (Figura 17-C; 17-D). Considerando o solo da esquerda com CEs =  $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ , seu  $h_m \cong 144 \text{ m}$ . O solo da direita, que possui CEs =  $6,4 \text{ dS m}^{-1}$ , terá um  $h_m = 37 \text{ m}$ . Sob outro ponto de vista, se considerarmos que os dois solos venham a possuir a mesma CEs =  $6 \text{ dS m}^{-1}$ , o potencial mátrico em que se atinge o PMP é  $\cong 53 \text{ m}$  para o solo da esquerda, enquanto que para o solo da direita, o  $h_m$  em que ocorre o PMP é aproximadamente  $43 \text{ m}$ . Pode ser visto ainda que, para um mesmo valor de CEs, tanto um quanto o outro tiveram o valor de  $h_m$  em que ocorre o PMP bem abaixo dos  $153 \text{ m}$ , como usualmente é considerado quando não se leva em consideração a salinidade.

Nas figuras 17-E e 17-F é apresentada a variação da CADs em função da CEs do solo. Independentemente do solo, observa-se que a CADs decresce com o aumento da CEs. Porém, é interessante observar a grande diferença dos valores de CADs entre os dois solos. Quando a CAD é calculada da forma tradicional, considerando como limites superiores e inferiores apenas os conteúdos de água correspondentes à CC e PMP, os dois solos têm, aproximadamente, a mesma CAD (solo A =  $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , solo B =  $0,127 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , Figura 17-A; 17-B). Mas, quando é calculada a CADs, levando-se em consideração o valor da CEs (solo da esquerda =  $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ ; solo da direita =  $6,4 \text{ dS m}^{-1}$ ), os valores da CADs são distintos, pois do solo da esquerda resulta numa CADs =  $0,177 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e do solo da direita resulta numa CADs =  $0,069 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 17-E; 17-F). Estas mesmas figuras também mostram que, para baixos valores de CEs, a CADs resulta em maiores valores do que a CAD calculada da forma tradicional.



**Figura 17.** Comparação do comportamento de dois solos cultivados com morango em Turuçu, RS, com formatos das curvas de retenção distintos e dois níveis de salinidade. À esquerda, solo com baixo valor de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs = 0,9 dS m<sup>-1</sup>), e à direita com alto valor de CEs = 6,4 dS m<sup>-1</sup>. A-B) Curvas de retenção de água no solo ajustadas pelo modelo de Groenevelt et al. (2004); C-D) CEs e o correspondente potencial mátrico em que ocorre o ponto de murcha permanente (PMP); E-F) capacidade de água disponível considerando a salinidade (CADs) de dois solos em função da CEs.

O modelo proposto por Groenevelt et al. (2004) para calcular a CADs pode ser considerado eficiente e importante para a ciência do solo. Do ponto de vista teórico, o modelo geral proposto por Groenevelt et al. (2001), que leva em consideração os vários fatores que afetam a disponibilidade de água às plantas por meio de funções ponderadas (aeração, resistência à penetração, salinidade) de forma conjunta, se assemelha ao Intervalo Hídrico Ótimo - IHO (da Silva, 1994). Ele pode ser uma alternativa ainda mais eficiente do que o próprio IHO, pois tem a vantagem de utilizar funções ponderadas ao invés de utilizar limites fixos para cada fator que limita a disponibilidade de água às plantas. É desejável, portanto, desenvolver mais estudos com o modelo de Groenevelt et al. (2001) tratando as funções ponderadas de forma concomitante.

#### 4.4. Conclusões

O extrato de saturação do solo das áreas utilizadas na produção de morango em Turuçu, RS, Brasil, apresenta valores de CEs acima do esperado para uma região de clima úmido. As contribuições mais importantes para maiores valores de CEs foram as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

A lona plástica como cobertura do solo impede a infiltração da água da chuva nos canteiros, dificultando a lixiviação e drenagem do excesso de sais para camadas subjacentes, favorecendo a salinização. Nessas condições, a salinidade também deve ser considerada como um fator que pode limitar a disponibilidade de água às plantas e, conseqüentemente, a produtividade do morango em Turuçu, RS.

Recomenda-se a realização de experimentos específicos para verificar se os níveis de CEs encontrados nos solos dos canteiros cultivados com morango em Turuçu estão limitando a produtividade da cultura na região. O valor crítico de CEs =  $1 \text{ dS m}^{-1}$  é inferior à média e à maioria dos valores encontrados nesse estudo.

O modelo proposto por Groenevelt et al. (2004) é eficiente para o cálculo da CAD quando se leva consideração o efeito da salinidade. Altos níveis de salinidade diminuem a CAD das áreas de morango em Turuçu, RS.

## **5. ARTIGO 3 – SELEÇÃO DE INDICADORES DA QUALIDADE DE SOLOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE MORANGO EM TURUÇU, RS ATRAVÉS DA ANÁLISE FATORIAL**

### **5.1. Introdução**

O solo é considerado um recurso natural, um sistema vivo e dinâmico, que emerge como resultado da interação dos seus componentes físicos, químicos e biológicos (Karlen et al., 1997). Possuindo habilidades e capacidades, o solo interage com o ambiente, atuando de forma multifuncional. Para um determinado solo, a capacidade de desempenhar suas várias funções no meio ambiente é definida como sendo a sua qualidade (Doran e Parkin, 1994).

As principais funções consideradas como essenciais para avaliar a qualidade do solo são, segundo Larson e Pierce (1994), a habilidade de armazenar, receber e liberar água para plantas, cursos d'água e subsolo, a habilidade de armazenar, receber e permutar nutrientes e outros elementos, promover e sustentar o crescimento de raízes, manter-se como habitat para seres vivos, além de resistir à degradação enquanto permite o seu manejo. Os solos possuem uma qualidade intrínseca relacionada com os seus atributos físicos, químicos e biológicos, mas é o homem, com as suas intervenções, o agente soberano e determinante da qualidade do solo (Doran, 2002). Nesse sentido, a qualidade do solo e as tendências das mudanças das variáveis com o tempo são indicadores primordiais para se buscar o manejo sustentável (Doran, 1997).

A habilidade do solo em desempenhar suas funções pode ser avaliada determinando-se os atributos físicos, químicos e biológicos. Fundamentalmente, a escolha das variáveis que serão avaliadas no estudo da qualidade de um determinado solo vai depender do interesse e do ponto de vista do observador. Do ponto de vista agrícola e ambiental, ela tem sido avaliada a partir de indicadores, que são atributos que refletem às funções que o solo é capaz de desempenhar. Pelo fato de o solo ter diversos processos acontecendo simultaneamente, em diferentes escalas de variação no tempo e no espaço é inevitável haver a interação entre os mesmos. Utilizam-se ainda alguns Índices de Qualidade do Solo (IQS), que são normalmente constituídos pelo estabelecimento de um conjunto de dados mínimo

contendo diversas variáveis de solo. Essas variáveis são determinadas por metodologias padronizadas e analisadas conjuntamente utilizando-se ferramentas de análise multivariada (Andrews et al., 2004; Lima, 2008). Muitos são os atributos de solo utilizados para determinar a qualidade do solo, não existindo um número padrão, nem uma lista específica de quais as variáveis que realmente devem compor a análise (Wang et al., 2003). A escolha deve se basear na finalidade e nos objetivos do estudo. Recomenda-se ter cuidado ao selecioná-las, já que devem representar tanto as modificações provocadas pelo homem quanto as mudanças que o solo sofre naturalmente ao longo de tempo.

Existe atualmente uma maior disponibilidade de dados de atributos de todos os tipos de solo. As análises laboratoriais de rotina de amostras disponibilizam muitos resultados, sobretudo de atributos físicos e químicos. Surge então a tarefa e a dificuldade de interpretar e sintetizar a informação resultante. Os atributos de solo são comumente analisados um a um, de modo comparativo a limites críticos encontrados na literatura. Dessa forma, não é levada em consideração a interação nem a informação redundante ou comum entre os atributos. Algumas ferramentas são capazes de realizar a síntese de grandes quantidades de informação gerada por diferentes variáveis. As ferramentas mais utilizadas são a análise de regressão linear e múltipla, a análise dos componentes principais e a análise fatorial (AF).

A ferramenta AF tem a capacidade de reduzir o número total das variáveis correlacionadas entre si através do seu agrupamento em alguns fatores. Estes podem ser considerados como novas variáveis não correlacionadas entre si, mas, capazes de representar a maior parte da variância existente entre as variáveis. Através de métodos como o dos componentes principais ou o da máxima verossimilhança são encontradas as combinações lineares entre as variáveis (componentes). Obtém-se um primeiro componente, capaz de exprimir tanto da variação das variáveis originais quanto possível. Consecutivamente, é encontrado um segundo componente que exprime tanto da variação remanescente quanto possível, sem se correlacionar com o primeiro componente. Em geral, poucos componentes, geralmente de 2 a 5, conseguem exprimir a maior parte da variação de um determinado grupo de variáveis (SPSS, 2007). Mesmo que os fatores obtidos venham a ser construídos de forma matemática ou estatística, eles podem ser relacionados com determinadas funções que o solo exerce, daí sua grande relevância para a ciência do solo (Shukla et al., 2006).

A AF vem ganhando espaço em estudos de uso e conservação dos recursos naturais, onde é necessário considerar a influência de um grupo de variáveis para caracterizar e compreender as alterações ambientais ocorridas no espaço e no tempo. Estudos que avaliam a qualidade da água e do solo são exemplos de aplicações práticas de utilização dessa ferramenta. Toledo e Nicolella (2002) utilizaram-na para selecionar algumas variáveis em meio a um grupo maior e, conforme a importância individual delas, determinaram um índice de qualidade de água para expressar de uma forma objetiva e integrada, as alterações da qualidade da água em microbacias sob diferentes usos. Brejda et al. (2000) identificaram indicadores e fatores regionais da qualidade do solo de diversas regiões dos Estados Unidos usando a AF. Shukla et al. (2004) e Shukla et al. (2006) selecionaram indicadores da qualidade do solo capazes de sintetizar a informação fornecida por um grupo de variáveis em alguns poucos fatores, facilitando a avaliação das consequências dos sistemas de manejo sobre a qualidade de solos utilizados na produção agrícola. Imaz et al. (2010) também utilizaram essa mesma ferramenta com o objetivo de identificar os indicadores mais sensíveis para avaliações de longo prazo em sistemas agrícolas com adição de resíduos, concluindo que a resistência mecânica à penetração, a matéria orgânica particulada e o carbono orgânico total foram os mais sensíveis na camada superficial de 0,00-0,05 m.

O objetivo desse trabalho foi identificar os principais atributos de solo capazes de exprimir e representar as alterações da qualidade do solo ocorridas durante um ciclo produtivo de morango em Turuçu, RS utilizando a análise fatorial.

## **5.2. Material e Métodos**

### **5.2.1. Áreas de estudo**

Foram escolhidas para esse estudo 15 áreas de produção de morango, conduzidas por produtores da associação de produtores de morango de Turuçu, RS, Brasil (31°22' a 31°27' S e 52°13' a 52°18' W, altitude 100-450 m). As propriedades estão situadas na transição entre o Escudo Sul-riograndense e a Planície Costeira Interna. Argissolos, Cambissolos e Gleissolos são os três grandes grupos de solos

encontrados nas lavouras desse estudo. Para discriminar as variações naturais de solo, cada propriedade teve um perfil de solo de lavoura de produção de morango descrito e classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS (Embrapa, 2006) (ver anexo A). Com exceção de uma lavoura, todas as áreas situam-se em terrenos inclinados, numa região com relevo suave ondulado e ondulado. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é o Cfa, com temperatura média anual de 17,8 °C.

### 5.2.2. Manejo do solo das áreas estudadas

As lavouras foram preparadas em junho de 2007, onde o solo foi inicialmente lavrado e depois revolvido com enxada rotativa encanteiradora movida por trator. Canteiros de aproximadamente 0,2 m de altura e com diferentes comprimentos foram construídos em áreas que variaram de 0,1 a 0,5 ha. As mudas de morango foram dispostas em duas a três fileiras nos canteiros previamente cobertos com lona plástica. O sistema de fertirrigação era composto de duas linhas de gotejadores em cada canteiro, com espaçamento de 0,1 ou 0,2 m entre gotejadores nas linhas, espaçadas de 0,3 m entre si. Túneis baixos de plástico translúcido foram utilizados para cobrir os canteiros durante o inverno, evitando efeitos adversos das baixas temperaturas.

Após o preparo dos canteiros, os produtores realizaram uma adubação de base com NPK em doses que variaram de produtor para produtor, mas que ficaram entre 2 a 3 vezes além do que é recomendado para a cultura do morango pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS) de RS e SC. Ainda, durante o ciclo de produção de morango foram aplicados micronutrientes e nitrogênio em solução nutritiva através da fertirrigação em doses que também variaram entre os produtores.

### 5.2.3. Coleta de amostras de solo

As amostras de solo de estrutura preservada foram coletadas na camada de 0,03-0,07 m, consideradas como representativas da camada de 0,0-0,1 m. Utilizando

cilindros de aço inoxidável com aproximadamente  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  de volume foram coletadas 3 amostras no centro dos canteiros do terço médio de cada lavoura. As amostras de estrutura não preservada foram coletadas de forma aleatória nas lavouras de morango. Em cada coleta, três amostras compostas (cada amostra composta correspondeu à união de 5 amostras simples) foram coletadas na camada de 0,0 a 0,2 m, utilizando trados do tipo holandês. Realizaram-se amostragens em quatro diferentes tempos durante o ciclo de produção de morango: a primeira amostragem ocorreu na última semana de junho de 2007, logo após a construção dos canteiros; a segunda ocorreu na primeira semana de setembro de 2007, após o plantio das mudas e antes do estágio produtivo da cultura; a terceira ocorreu na segunda semana de dezembro de 2007, durante a fase de colheita do morango e aplicação da fertirrigação; a quarta ocorreu na última semana de janeiro de 2008, após a colheita e a fertirrigação.

#### 5.2.4. Análise estatística dos atributos do solo

Para a análise estatística multivariada foram escolhidos 12 atributos (Tabela 4). A escolha se baseou na tabela 1 proposta por Karlen et al. (1997), além de levar em consideração a representatividade do atributo em relação à função específica do solo do ponto de vista agrícola e ambiental. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificar se as variáveis seguem uma distribuição normal de probabilidade. Também foi realizada a análise de box-plot para verificar a presença de valores discrepantes. A análise fatorial foi realizada por meio do software SPSS, onde a variação dos 12 atributos selecionados foi sintetizada em fatores, empregando-se o método dos componentes principais para extrair e selecionar componentes, posteriormente transformados em fatores, designando a análise fatorial (Brejda et al., 2000).

Na análise fatorial emprega-se a notação matricial, utilizando um conjunto de  $p$  variáveis aleatórias  $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$ , com vetor de médias  $\bar{\mu} = E(\bar{X})$  e matriz de variâncias e covariâncias  $\Sigma = \text{Var}(\bar{X})$ . Postula-se que as inter-relações entre as  $p$  variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_p$  são explicadas pelo **modelo fatorial**, que expressa estas  $p$

variáveis como combinações lineares de  $k$  ( $k < p$ ) variáveis aleatórias  $F_1, F_2, \dots, F_k$ , tidas como fatores comuns e  $p$  variáveis aleatórias específicas  $e_1, e_2, \dots, e_p$ :

$$\begin{aligned}x_1 &= \mu_1 + a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1k}F_k + e_1 \\x_2 &= \mu_2 + a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2k}F_k + e_2 \\&\dots \\x_p &= \mu_p + a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pk}F_k + e_p\end{aligned}$$

Em notação matricial o modelo fica:

$$\bar{X} = \bar{\mu} + A\bar{F} + \bar{e} \quad (13)$$

onde:

$$\bar{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k]^T, \quad \bar{F} = [F_1, F_2, \dots, F_k]^T, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ & & \dots & \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pk} \end{bmatrix},$$

define-se:

*Fatores comuns*: Elementos do vetor  $\bar{F} = F_1, F_2, \dots, F_k$

*Fatores específicos*: elementos do vetor  $\bar{e} = e_1, e_2, \dots, e_k$

*Cargas fatoriais*: Elementos da matriz  $A$ .

A essência da análise da fatorial é encontrar os fatores comuns e as cargas fatoriais (pesos) que sintetizam a informação total apresentada pelas variáveis envolvidas no estudo. Ela é obtida com uma correlação sobre uma porção da variação total chamada de porção comum. Por isso, a análise fatorial separa a variação total em duas matrizes: a da porção comum e a da porção específica, utilizando apenas a porção comum para encontrar os fatores comuns.

**Tabela 4.** Indicadores da qualidade do solo relacionados com as funções requeridas de um solo quanto à produção agrícola e proteção ambiental.

<b>Atributo avaliado</b>	<b>Classificação</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Funções representadas</b>
Carbono Orgânico – CO	Químico	Walkley Black-Tedesco (1995)	Ciclagem de nutrientes, retenção de água e poluentes, estrutura do solo
Diâmetro médio ponderado de agregados – DMP	Físico	Kemper e Rosenau (1986)	Estrutura do solo, resistência à erosão, emergência de plantas
pH	Químico	Tedesco (1995)	Disponibilidade de nutrientes, adsorção e mobilidade de pesticidas
Respiração basal – RB	Biológico	Embrapa (1997)	Atividade biológica e ciclagem de nutrientes
Nitrogênio total – N	Químico	Tedesco (1995)	Disponibilidade às plantas, potencial de lixiviação
Densidade do solo - BD	Físico	Anel Volumétrico-Embrapa (1997)	Suscetibilidade do solo à penetração das raízes, espaço poroso para ar e água
Microporosidade – MatPOR	Hídrico	Mesa de Tensão-Embrapa (1997)	Armazenamento de água às plantas
Macroporosidade – MacPOR	Físico	Mesa de Tensão-Embrapa (1997)	Aeração do solo
Capacidade de água disponível – CAD	Hídrico	Reichardt e Timm (2004)	Disponibilidade de água às plantas
Salinidade do solo - CEs	Químico	Rhoades (1982)	Potencial osmótico, toxidez, desenvolvimento de plantas, estrutura do solo
CTCefetiva	Químico	Tedesco (1995)	Capacidade de nutrição e desenvolvimento de plantas
Saturação por bases - V	Químico	Tedesco (1995)	Disponibilidade de nutrientes ao desenvolvimento de plantas

Utilizando a matriz dos coeficientes de correlação, os componentes principais (fatores) com autovalores > 1 foram selecionados e submetidos à rotação de eixos pelo método varimax. O propósito da rotação de eixos não é melhorar o ajuste ou aumentar a porcentagem da variância explicada pelos fatores, mas sim obter uma estrutura mais simples e facilmente interpretável (Legendre e Legendre, 1998). Estimou-se a proporção da variância de cada atributo explicado por cada componente selecionado (pesos), e por todos os componentes (comunalidades). Altos valores de comunalidades de um determinado atributo do solo indicam que uma alta proporção de sua variância é explicada pelos componentes. Com isso, aqueles atributos com baixos valores de comunalidades possuem menor capacidade

de síntese e representação da variância total, recebendo menor importância durante a interpretação dos fatores (Brejda et al., 2000; Shukla et al., 2006).

### 5.3. Resultados e Discussão

Na tabela 5 é apresentado o resultado da análise estatística descritiva dos 12 atributos de solos utilizados na produção de morango em Turuçu, RS. Os maiores valores de coeficiente de variação (CV, %) foram encontrados para RB (57,6%) e CEs (50,43%), respectivamente. A RB é reconhecida como sendo de alta variabilidade, pois a atividade dos microrganismos é afetada por diversos fatores como o clima, o tipo de solo, o regime hídrico e a aeração, a oferta de material orgânico para a decomposição, entre outros. A CEs é altamente dependente do manejo da adubação praticada pelos agricultores, bem como do regime hídrico e das condições de drenagem do solo, fatores estes que influenciam na quantidade de sais que se acumulam na camada superficial do solo.

A assimetria indica como os dados se distribuem em relação à média. Quanto maior for o valor da assimetria em módulo, maior é a possibilidade da variável não se ajustar a uma distribuição normal de probabilidade. Maiores valores (em módulo) de assimetria foram encontrados para as variáveis RB (1,46) e DMP (1,35) deste estudo. Utilizando o teste de normalidade Shapiro-Wilk, verificou-se que as duas variáveis se ajustaram à distribuição normal dos dados.

A matriz dos coeficientes de correlação resultante da análise de todos os 12 atributos de solo deste estudo é apresentada na Tabela 6. Os maiores coeficientes de correlação foram encontrados para CO versus N ( $r=0,94$ ), V% versus pH ( $r=0,90$ ) e DMP versus CO ( $r=0,81$ ), todos positivamente correlacionados. Correlações negativas importantes foram encontradas para CAD versus MacPOR ( $r=-0,71$ ), MacPOR versus MatPOR ( $r=-0,67$ ) e MacPOR versus BulkDENS ( $r=-0,67$ ). As variáveis que apresentaram maiores coeficientes de correlação (em módulo) com um maior número de variáveis têm maior importância na composição dos fatores da AF.

**Tabela 5.** Estatística descritiva de 12 atributos do solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Atributo	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Assimetria	Curtose
CAD ( $m^3 m^{-3}$ )	0,117	0,03	23,65	0,43	-0,19
MacPOR ( $m^3 m^{-3}$ )	20,56	6,04	29,39	-0,23	-0,45
MatPOR ( $m^3 m^{-3}$ )	25,48	4,23	16,61	0,37	0,11
BulkDENS ( $Mg dm^{-3}$ )	1,40	0,12	8,38	0,17	-0,99
DMP (mm)	1,36	0,58	42,66	1,35	1,39
CO ( $g kg^{-1}$ )	10,03	3,79	37,75	0,58	-0,96
N ( $g kg^{-1}$ )	0,71	0,28	39,53	0,84	-0,10
CTCe ( $cmol_c dm^{-3}$ )	4,91	2,15	43,76	1,00	0,41
V (%)	64,28	16,40	25,51	-0,56	-1,02
pH	5,46	0,71	13,04	0,06	-0,93
RB ( $\mu g CO_2 h^{-1} g^{-1}$ )	0,14	0,08	57,61	1,46	2,53
CEs ( $dS m^{-1}$ )	2,60	1,31	50,43	0,73	0,53

CAD - capacidade de água disponível; MacPOR - macroporosidade; MatPOR - microporosidade; BulkDENS - densidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado de agregados; CO - carbono orgânico total; N - nitrogênio total; CTCe - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; pH - acidez ativa; RB - respiração basal; CEs - condutividade elétrica do extrato de saturação.

**Tabela 6.** Matriz dos coeficientes de correlações entre 12 atributos do solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

	CAD	MacPOR	MatPOR	BulkDENS	DMP	CO	N	CTCe	V	pH	RB	CEs
<b>CAD</b>	1											
<b>MacPOR</b>	-0,71	1										
<b>MatPOR</b>	0,57	-0,67	1									
<b>BulkDENS</b>	0,36	-0,67	-0,02	1								
<b>DMP</b>	0,18	-0,08	0,52	-0,46	1							
<b>CO</b>	0,09	0,03	0,50	-0,61	0,81	1						
<b>N</b>	-0,10	0,16	0,44	-0,70	0,72	0,94	1					
<b>CTCe</b>	0,16	-0,03	0,57	-0,49	0,51	0,72	0,72	1				
<b>V</b>	0,25	-0,24	0,40	-0,01	0,08	0,17	0,18	0,71	1			
<b>pH</b>	0,18	-0,29	0,43	0,03	0,07	0,10	0,18	0,58	0,90	1		
<b>RB</b>	-0,34	0,40	-0,02	-0,49	0,23	0,34	0,39	0,25	-0,07	-0,10	1	
<b>CEs</b>	-0,20	0,40	-0,16	-0,31	-0,05	0,01	0,03	0,14	-0,10	-0,29	0,35	1

CAD - capacidade de água disponível; MacPOR - macroporosidade; MatPOR - microporosidade; BulkDENS - densidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado de agregados; CO - carbono orgânico total; N - nitrogênio total; CTCe - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; pH - acidez ativa; RB - respiração basal; CEs - condutividade elétrica do extrato de saturação.

A Tabela 7 apresenta os valores das comunalidades. As comunalidades representam a quantidade da variância explicada por cada variável quando somente os componentes principais (selecionados) são levados em consideração. Um alto valor de comunalidade de um determinado atributo demonstra que uma grande porção da variância foi explicada pelo mesmo. Isso indica que se pode dar maior preferência para altas comunalidades, minimizando a importância relativa de atributos que apresentam baixas comunalidades. Os atributos RB e CEe apresentaram menores valores de comunalidades, por isso podem ser considerados com menor potencial para explicar ou representar a variância apresentada pelos solos das áreas de produção de morango em Turuçu, RS. Outra forma de visualizar sua baixa capacidade de representar a variância são os baixos coeficientes de correlação entre RB e CEe com os demais atributos (Tabela 6).

Na Tabela 8 pode ser observada a discriminação dos autovalores e da variância total do conjunto de dados para cada um dos 12 componentes. Na análise fatorial dos atributos do solo, utiliza-se o critério dos autovalores, onde apenas aqueles componentes com autovalores maiores que 1 são retidos para análise posterior, já que autovalores menores que 1 indicam que um componente tem menor capacidade de explicar a variância do que um atributo individual (Sharma, 1996; Shukla et al., 2006).

**Tabela 7.** Comunalidades dos 12 atributos de solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Variável	CAD	MacPOR	MatPOR	BulkDENS	DMP	CO	N	CTCe	V	pH	RB	CEe
Comunalidades	0,68	0,90	0,82	0,83	0,80	0,93	0,90	0,91	0,96	0,91	0,47	0,28

CAD - capacidade de água disponível; MacPOR - macroporosidade; MatPOR - microporosidade; BulkDENS - densidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado de agregados; CO - carbono orgânico total; N - nitrogênio total; CTCe - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; pH - acidez ativa; RB - respiração basal; CEe - condutividade elétrica do extrato de saturação.

**Tabela 8.** Autovalores, parcela da variância e variância acumulada resultante da análise fatorial usando a matriz de correlação de dados padronizados de 12 atributos de solo determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Componente	Autovalores e Variância			Autovalores finais e Variância após a rotação de eixos		
	Autovalores	Parcela da Variância (%)	Variância Acumulada (%)	Autovalores	Parcela da Variância (%)	Variância Acumulada (%)
1	<b>4,42</b>	<b>36,81</b>	<b>36,81</b>	<b>3,90</b>	<b>32,54</b>	<b>32,54</b>
2	<b>3,37</b>	<b>28,09</b>	<b>64,90</b>	<b>3,03</b>	<b>25,21</b>	<b>57,75</b>
3	<b>1,59</b>	<b>13,27</b>	<b>78,16</b>	<b>2,45</b>	<b>20,42</b>	<b>78,16</b>
4	0,96	8,00	86,16			
5	0,62	5,12	91,29			
6	0,35	2,92	94,20			
7	0,27	2,26	96,47			
8	0,25	2,04	98,51			
9	0,09	0,74	99,24			
10	0,04	0,34	99,59			
11	0,03	0,22	99,81			
12	0,02	0,19	100,00			

Os valores em negrito representam os componentes selecionados, tidos como principais.

Após a seleção dos componentes com autovalores maiores que 1, realizada a rotação dos eixos. Este artifício é vantajoso, pois mantém a porcentagem cumulativa da variância explicada pelos componentes selecionados, mas a variação é mais bem distribuída entre os componentes. Como pode ser visto, foram selecionados 3 componentes, os quais conseguem representar mais de 78% da variabilidade dos atributos de solo considerados neste estudo (Tabela 8). Após a rotação dos eixos, os 3 componentes transformaram-se em 3 fatores. Grandes mudanças nos autovalores provocadas pela rotação de eixos demonstram que a matriz dos componentes rotacionada é mais bem interpretada do que sem o uso desse artifício. Em conjunto, os 3 fatores selecionados explicam mais de 78% da variância total demonstrada por todas as variáveis, sendo o Fator 1 responsável por 32,5%, o Fator 2 por 25,2% e o Fator 3 por 20,4% da variância total.

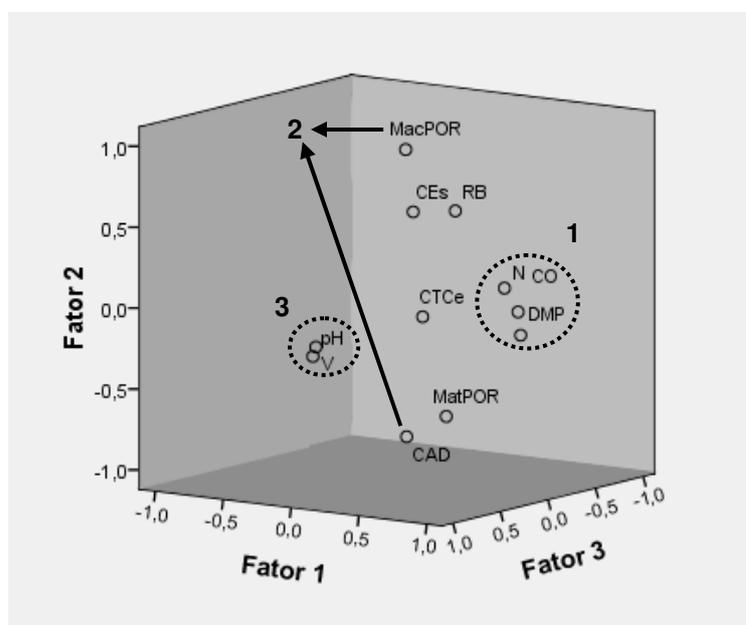
Com a rotação de eixos é possível encontrar uma matriz de pesos ou cargas fatoriais mais facilmente interpretável. A interpretação dos resultados da análise fatorial é realizada mediante a comparação dos pesos ou cargas fatoriais apresentados por cada variável em cada fator (Tabela 9). Quanto mais próximo de 1 ou -1 for o peso (mais extremo), maior é a associação entre a variável analisada e o fator. Do contrário, pesos próximos de zero indicam haver pequena contribuição da variável para a explicação do fator. É desejável atingir uma matriz em que cada variável tenha um peso alto ou extremo (próximo de 1 ou -1) em apenas um fator e pesos baixos ou moderados (próximo de 0) nos demais fatores. Analisando a distribuição dos pesos dos atributos analisados para cada fator, pode ser notado que CO (0,96), N (0,91) e DMP (0,88) são altamente correlacionados com o fator 1, pois apresentaram altos pesos concentrados nesse fator e pesos baixos nos demais fatores. O fator 2 se correlacionou bem com a MacPOR (-0,94) e CAD (0,81), enquanto V (0,97) e pH (0,93) se correlacionaram bem com o fator 3, pois tiveram altos pesos concentrados neste fator e baixos pesos nos fatores 1 e 2.

**Tabela 9.** Pesos ou cargas fatoriais obtidos após a rotação de eixos dos 12 atributos determinados em 15 áreas de produção de morango em Turuçu, RS, Brasil.

Variável	Fator		
	1	2	3
<b>CO</b>	<b>0,96</b>	-0,04	0,10
<b>N</b>	<b>0,91</b>	-0,20	0,17
<b>DMP</b>	<b>0,88</b>	0,13	-0,04
<b>MacPOR</b>	-0,01	<b>-0,94</b>	-0,13
<b>CAD</b>	0,14	<b>0,81</b>	0,09
BulkDENS	-0,64	0,65	-0,07
MatPOR	0,59	0,61	0,32
RB	0,40	-0,56	-0,02
CEe	0,06	-0,52	-0,08
<b>V</b>	0,07	0,14	<b>0,97</b>
<b>pH</b>	0,03	0,20	<b>0,93</b>
CTCe	0,66	-0,07	0,68

CAD - capacidade de água disponível; MacPOR - macroporosidade; MatPOR - microporosidade; BulkDENS - densidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado de agregados; CO - carbono orgânico total; N - nitrogênio total; CTCe - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; pH - acidez ativa; RB - respiração basal; CEe - condutividade elétrica do extrato de saturação.

De posse dos resultados obtidos na Tabela 8, pode ser observada a existência de 3 componentes (fatores), com propriedades de 3 variáveis novas, originais e não correlacionadas entre si, capazes de sintetizar a informação gerada pelos 12 atributos avaliados. Na Figura 18 tem-se a representação gráfica tridimensional dos 12 atributos organizados em 3 fatores. O círculo pontilhado 1 identifica a proximidade espacial entre as três variáveis que compõe o fator 1, que da mesma forma é identificável para o fator 3, confirmando a correlação positiva entre as variáveis de cada fator (ver também a Tabela 6). Os atributos que compõe o fator 2 localizaram-se em sentidos opostos, mas situam-se numa mesma direção (eixo).



CAD - capacidade de água disponível; MacPOR - macroporosidade; MatPOR - microporosidade; BulkDENS - densidade do solo; DMP - diâmetro médio ponderado de agregados; CO - carbono orgânico total; N - nitrogênio total; CTCe - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; pH - acidez ativa; RB - respiração basal; CEs - condutividade elétrica do extrato de saturação.

**Figura 18.** Representação espacial dos atributos que compõe os três fatores selecionados pela análise fatorial.

Pode-se inferir que o fator 1 é função da *agregação do solo*. Isso ocorre porque ele é explicado, em essência, pela dinâmica do CO dos solos cultivados com morango em Turuçu, já que o diâmetro médio ponderado de agregados e o nitrogênio total, que são os demais atributos que compõe o fator 1, são altamente dependentes da ciclagem do carbono pelos microrganismos no solo. Pode ser observada ainda a existência de correlações importantes do CO com MatPOR,

BulkDENS, DMP, CTCe e N (Tabela 6). A atividade microbiana afeta vários processos que ocorrem no solo e como o carbono orgânico é um elemento essencial para a população microbiana, ele apresenta correlação significativa com muitas variáveis. Como exemplos têm-se os estudos de Brejda et al. (2000), que utilizaram ferramentas de análise multivariada para definir indicadores da qualidade do solo em escala regional e concluíram que os teores de CO e N foram os indicadores mais sensíveis para descrever a variação ocorrida entre solos e entre diferentes sistemas de manejo nos Estados Unidos. Outros autores como Campbell et al. (1997), Jansen et al. (1997) e Shukla et al. (2006) também concluíram que as alterações de sistemas de manejo ao longo do tempo afetam o carbono orgânico e suas frações, tornando-o um indicador importante para avaliar a qualidade do solo.

Essa constatação sobre a relevância e a capacidade de se relacionar o CO com diversos outros atributos não é novidade na Ciência do Solo, pois é quase que unânime o reconhecimento da influência desse atributo sobre diversos que ocorrem no solo. Para Dick e Gregorich (2004), a matéria orgânica do solo é um atributo chave para a qualidade do solo, pois afeta direta e indiretamente vários atributos físicos, químicos e biológicos que afetam a atividade agrícola e a resistência à degradação. Em estudo conduzido por Shukla et al. (2006) envolvendo 20 atributos de diferentes solos com diferentes usos, concluiu-se que a matéria orgânica do solo foi o atributo mais dominante e sensível para representar a qualidade do solo em diferentes usos e práticas de manejo. Silva et al. (2010) verificaram que a análise dos componentes principais forneceu componentes interpretáveis, sendo o primeiro componente correlacionado com a acidez e o segundo com a matéria orgânica do solo.

Do fator 2 pode-se inferir que ele está vinculado à *capacidade do solo em armazenar água e ar no interior de seus poros*. A CAD representa o volume de poros capaz de reter e disponibilizar água para as plantas e seres vivos que habitam o solo. A MacPOR é o volume de poros capaz de promover a aeração e difusão de gases, essencial para a respiração dos seres vivos. Pode-se observar que a relação entre esses dois atributos é antagônica, ou seja, para haver aumento de um deve haver diminuição do outro. Essa constatação pode ser comprovada pelo coeficiente de correlação apresentado entre CAD e MacPOR, alto em módulo e de sinal negativo ( $r=-0,71$ , ver Tabela 6), e pelos seus pesos ou cargas fatoriais (Tabela 9). Na prática isso também é válido, já que esses resultados se aproximam em parte

aos obtidos por Shukla et al. (2006), que avaliaram a qualidade do solo utilizando a AF e também encontraram o segundo fator vinculado à aeração do solo.

O fator 3 está relacionado com a *fertilidade química do solo*. A saturação por bases (V) representa a porcentagem das cargas elétricas do solo a pH=7,0 (CTCpotencial) que é ocupada por bases trocáveis (Ca, Mg, Na e K) (Meurer, 2000). Solos com altos valores de V possuem maior quantidade de bases permutáveis, oferecendo melhores condições químicas para o desenvolvimento de plantas. O pH representa a concentração de íons H<sup>+</sup> na solução do solo. A maior parte das plantas não tolera meio ácido, com pH < 5,5. Sendo assim, a faixa ideal para a maioria das plantas está entre 5,5 e 6,5 (CQFS, 2004).

É importante frisar que apesar de CO, N, DMP, CAD, MacPOR, pH e V terem sido selecionadas para compor os 3 fatores, não quer dizer que os demais atributos tenham menor importância. Os atributos citados acima se correlacionam melhor com os demais avaliados neste estudo, por isso têm maior capacidade de sintetizar a variância total apresentada pelos 12 atributos. Em avaliações posteriores nessa mesma região, pode-se dar preferência e maior relevância para esses atributos. Entretanto, há casos em que certos atributos são essenciais. Por exemplo, ao avaliar a qualidade de solos utilizados para fins agrícolas e que são afetados por sais, a CE deve ser levada em consideração, pois é um indicador importante para detectar a limitação causada pela salinidade à produtividade agrícola nessas áreas, sobretudo para culturas sensíveis. Cabe ao pesquisador ou técnico de campo avaliar a necessidade de se determinar mais atributos do solo para identificar se o solo em questão é capaz ou não de cumprir as funções desejáveis.

#### **5.4. Conclusões**

A análise fatorial possibilitou a síntese de 12 atributos em apenas três fatores interpretáveis e relacionáveis com funções e processos desempenhados pelos solos utilizados na produção de morango em Turuçu. O fator 1 pode ser relacionado com a agregação do solo, sendo composto por CO, N e DMP. O fator 2 está vinculado à capacidade do solo em armazenar água e ar no interior de seus poros, sendo composto por MacPOR e CAD. O fator 3 está relacionado com a fertilidade química do solo, sendo composto por V e pH.

Os sete atributos (CO, N, DMP, MacPOR, CAD, V, e pH) que compõem os três fatores selecionados podem ser considerados como indicadores ou atributos-chave na determinação da qualidade do solo em áreas de produção de morango na região de Turuçu, RS, Brasil.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos da região de Turuçu, RS, Brasil, apesar de apresentarem limitações para a produção agrícola intensiva, como no caso do sistema de produção de morango, apresentam condições adequadas de suportar a produção agrícola, desde que manejados com os devidos cuidados, seguindo as recomendações técnicas de adubação, calagem e conservação.

Os solos dos canteiros de produção de morango são sujeitos a variações temporais dos atributos físicos, hídricos e químicos do solo. O revolvimento do solo executado na construção de canteiros afeta as relações sólidos-poros, tornando o solo poroso e estruturalmente instável. Com o tempo, os ciclos de umedecimento e secagem provocam modificações importantes na estrutura do solo e tamanho dos poros. A agregação do solo e a capacidade de água disponível aumentam com o tempo, melhorando a qualidade física dos solos cultivados com morango em Turuçu, possibilitando a redução da frequência dos eventos de irrigação.

A concentração dos elementos presentes no extrato de saturação decresceu com o tempo ao longo do ciclo de produção de morango. A condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs) apresentou valores acima do recomendado para o cultivo de morango, indicando a ocorrência de salinização do solo dos canteiros. Por levar em consideração o efeito da salinidade sobre a capacidade de água disponível, o modelo proposto por Groenevelt et al. (2004) permite determinar a quantidade de água que é efetivamente disponível às plantas nas situações em que a salinidade é relevante. Através desse modelo, constatou-se que elevados níveis de salinidade diminuiriam a CAD das áreas de morango em Turuçu, RS.

A utilização da análise fatorial possibilitou a síntese de 12 atributos em apenas três fatores interpretáveis e relacionáveis com funções e processos desempenhados pelos solos utilizados na produção de morango em Turuçu. A

agregação do solo, a capacidade do solo em armazenar água e ar no interior de seus poros e a fertilidade química do solo foram os três fatores identificados. Sete atributos (CO, N, DMP, MacPOR, CAD, V, e pH) que compõe os três fatores selecionados podem ser considerados como indicadores ou atributos-chave na determinação da qualidade do solo em áreas de produção de morango na região de Turuçu, RS, Brasil.

Baseando-se nas alterações de alguns atributos dos solos avaliados neste estudo e na importância relativa de cada um, pode-se afirmar que os solos utilizados na produção de morango em Turuçu, RS, Brasil, tiveram suas condições físicas, hídricas e químicas melhoradas ao final do ciclo produtivo.

## 7. REFERÊNCIAS

- Agrawal, R.P., 1991. Water and nutrient management in sandy soils by compaction. *Soil Tillage Res.* 19, 121-130.
- Ahuja, L.R., Fiedler, F., Dunn, G.H., Benjamin, J.G., Garrison, A., 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1228-1233.
- Ahuja, L.R., Ma, L., Timlin, D.J., 2006. Trans-disciplinary soil physics research critical to synthesis and modelling of agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 311-326.
- Alameda, D., Villar, R., 2009. Moderate soil compaction: Implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil Tillage Res.* 103, 325-331.
- Alletto, L., Coquet, Y., 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma* 152, 85-94.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1945-1962.
- Andrigueto, J.R., Nasser, L.C.B., Teixeira, J.M.A., Simon, G., Veras, M.C.V., Medeiros, S.A.F., Souto, R.F., Martins, M.V. de M., 2008. Produção integrada de frutas e sistema agropecuário de produção integrada no Brasil. 24p. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acessado em 20/07/2008.
- Arvidsson, J., 1999. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant Soil* 208, 9-19.

- Bamberg, A.L., Timm, L.C., Pauletto, E.A., Pinto, L.F.S., Nebel, A.L.C., Panziera, W. 2009. Qualidade físico-hídrica do solo e a produção de morango. In: Morangueiro Irrigado: Aspectos técnicos e ambientais do cultivo. Timm, L.C., Tavares, V.E.Q., Reisser Jr., C., Estrela, C.C. (Eds.), Editora da UFPel, Pelotas, p. 115-139.
- Bernstein, L. 1962. Salt-affected soils and plants. In: Proceedings of the 18th UNESCO symposium on problems of the arid zones, Paris. p. 139-174.
- Beutler, A.N., Freddi, O.S., Leone, C.L., Centurion, J.F., 2008. Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. R. Biol. Ci. Terra 8, 27-36.
- Brady, N., Weil, R.R., 2002. The nature and properties of soils. 13.ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 960p.
- Brejda, J.I., Moorman, T.B., Karlen, D.L., Dao, T.H., 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators. I. Central and southern high plains. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 2115-2124.
- Campbell, C.A., Janzen, H.H., Juma, N.G., 1997. Case studies of soil quality in the canadian prairies: long-term field experiments. In: Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science 25. Gregorich, E.G., Carter, M.R. (eds). Elsevier, Amsterdam, p. 351-397.
- Carsel, R.F., Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 24, 755-769.
- Carter, M.R., 1988. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. Soil Tillage Res. 12, 37-51.
- Cassel, D.K., 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 47, 196-201.
- CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, RS/SC, 2004. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, 400 p.

Conceição, P.C., Amado, T.J.C., Mielniczuk, J., Spagnollo, E., 2005. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *R. Bras. Ci. Solo*, 29, 777-788.

Costa, E.A., Goedert, W.J., Sousa, D.M.G., 2006. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 41, 1185-1191.

Cunha, N.G.; Silveira, R.J.C., 2000. Município de Turuçu: Estudo de Reconhecimento de Terras – Mapa de Solos do Município de Turuçu-RS. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado.

da Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775-1781.

Darwish, T., Atallah, T., El Moujabber, M., Khatib, N., 2005. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agric. Water Manag.* 78, 152-164.

de León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C.A., Castillo-Juárez, H., 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma* 142, 308-317.

Debiasi, H., Levien, R., Trein, C.R., Conte, O., Mazurana, M., 2008. Capacidade de suporte e compressibilidade de um argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *R. Bras. Ci. Solo* 32, 2629-2637.

Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S.D., Elliott, E.T., Merckx, R., Paustian, K., 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 33, 1599-1611.

Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma*, 120, 215-225.

- Dexter, A.R., 2004c. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S- theory. *Geoderma*, 120, 227-239.
- Dick, W.A. e Gregorich, E.G., 2004. Developing and maintaining soil organic matter levels. In: Schjønning, P., Elmholt, S. e Christensen, B.T. (eds). *Managing soil quality: challenges in modern agriculture*. Wallingford, UK, p. 103-120.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., et al. (eds.). *Defining soil quality for a sustainable Environment*. SSSA Special Publication 35. ASA, Madison, WI, p.3-21.
- Doran, J.W., 1997. Soil quality and sustainability. Commission V "Inventory, genesis, morphology and classification of soils". In: XXVI Brazilian Congress of Soil Science, Rio de Janeiro, July 20-26.
- Doran, J., 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agr. Ecosyst. Environ.* 88, 119-127.
- Dourado-Neto, D.; Nielsen, D.R.; Hopmans, J.W.; Parlange, M.B., 1996. Curva de retenção: SWRC, v.2.0.
- Ehlig, C.F.; Bernstein, L. 1958. Salt tolerance of strawberries. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 72, 198-206.
- EMATER – Associação Riograndense e Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural, 2005. Disponível em <<http://www.emater.tche.br>>. Acessado em 20/07/2005.
- EMATER - Empresa de Assistência Técnica Rural, 2001. *Leitura da paisagem de Turuçu*. Turuçu: EMATER, 25p.
- Emdad, M.R., Raine, S.R., Smith, R.J., Fardad, H., 2004. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 23, 55-60.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. *Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed., Rio de Janeiro, 212p.

Estrela, C. C. Variabilidade espacial e temporal da qualidade da água de irrigação no sistema de produção de morango em propriedades familiares no município de Turuçu-RS. Dissertação (Mestrado). 97p. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2009.

FAO, 1988. Salt-affected soils and their management, by I.P. Abrol, J.S.P. Yadav e F.I. Massoud. FAO Soils Bulletin No. 39. Rome, Italy.

FAO, 2000. Crops and drops: making the best use of water for agriculture. FAO Advance Edition. Rome, Italy.

FAO, 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, by Tanji, K. K., Kielen, N. C.. Irrigation and Drainage Paper N° 61, Rome, Italy.

Farkás, Cs., Gyuricza, Cs., László, P. and Birkás, M., 2000. Study of the influence of soil tillage on soil water regime. In: Horn, R., van den Akker, J.J.H., Arvidsson J. (Eds.). Subsoil compaction. Adv. Geocol. 32, 251-257.

Faurès, J. M., Hoogeveena, J., Bruinsma, J., 2010. The FAO irrigated area forecast for 2030. FAO, Rome, Italy. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.htm>. Acesso em: 27/02/2010.

Flores, C.A., Denardin, J.E., Kochhann, R.A., Ferreira, T.N., Cassol, E.A., Mondardo, A., Schwarz, R.A., 2005. Suscetibilidade dos solos do Rio Grande do Sul à erosão. In: Denardin, J.E., et al. (eds.). Manejo de enxurrada em sistema de plantio direto. Porto Alegre: Fórum estadual de solo e água, 88 p.

Flores, C.A., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Pauletto, E.A., 2008. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. Ci. Rural 38, 2164-2172.

Fortes, A.B., 1959. Geografia física do Rio Grande do Sul. Livraria do Globo, Porto Alegre.

- Gale, W.J., Cambardella, C.A., Bailey, T.B., 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 201-207.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Aust. J. Soil Res.* 32, 285-309.
- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., Murray, R.S., 2004. On water availability in salinity soils. *Aust. J. Soil Res.* 42, 833–840.
- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., Semetsa, S., 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Aust. J. Soil Res.*, 39, 577–598.
- Hanson, B., May, D., 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric. Water Manag.* 68, 1-17.
- Hillel, D., 2000. Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment and economics. The World Bank, Washington. 92 p.
- Hillel, D., 2004. Introduction to environmental soil physics. Elsevier Academic Press, New York. 494 p.
- Hoffman, G.J., Shannon, M.C., 2007. Salinity. In: Developments in agricultural engineering 13: microirrigation for crop production. Lamm, F.R., Ayars, J.E., Nakayama, F.S. (eds). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. p. 131-160.
- Horn, R., Baumgartl, T., 2002. Dynamic properties of soils. In: Warrick, A.W. (ed.) *Soil physics companion*. CRC Press, Boca Raton, FL., p. 17-48.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. 2005. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em 20/07/2006.
- IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas. 2008. Disponível em: < [http://www.ibraf.org.br/estatisticas/est\\_frutas.asp](http://www.ibraf.org.br/estatisticas/est_frutas.asp)>. Acessado em 03 de agosto de 2008.
- Imaz, M.J., Virto, I., Bescansa, P., Enrique, A., Fernandez-Ugalde, O., Karlen, D.L., 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid mediterranean cropland. *Soil Tillage Res.* 107, 17-25.

Janzen, H.H., Campbell, C.A., Ellert, B.H., Bremer, E., 1997. Soil organic matter dynamics and their relationship to soil quality. In: Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in soil science 25. Gregorich, E.G., Carter, M.R. (eds). Elsevier, Amsterdam, p. 277-291.

Johnston, A. E., 2004. Soil acidity - resilience and thresholds. In: CAB International: Managing soil quality: challenges in modern agriculture. eds. Schjonning, P.; Elmholt, S.; Christensen, B.T. Danish Institute of Agricultural Sciences, 344 p.

Karlberg, L., Ben-Gal, A., Jansson, P.E., Shani, U., 2006. Modelling transpiration and growth in salinity-stressed tomato under different climatic conditions. *Ecological Modelling*, 190, 15-40.

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.

Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1001-1006.

Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy monograph no. 9. Society of Agronomy / Soil Science Society of America*, pp. 425-442.

Kladivko, E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil Tillage Res.* 61, 61-76.

Kooistra, M.J., Schoonderbeek, D., Boone, F. R., Veen, B.W., Van Noordwijk, M., 1992. Root-soil contact of maize as measured by thin-section technique. 2. Effects of soil compaction. *Plant Soil* 139, 119-129.

Krüger, E., Schmidt, G., Brückner, U., 1999. Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Sci Hortic-Amsterdam* 81, 409-424.

Larson, W.E., Pierce, F.J., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. (Org.) *Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America Journal.* p. 37-51.

- Lavelle, P., Spain, A.V., 2002. Soil ecology. Kluwer Academic, Amsterdam.
- Legendre, P., Legendre, L. 1998. Numerical ecology: second english edition. (Developments in environmental modelling: 20). Elsevier, Amsterdam, 853p.
- Leij, F.J., Ghezzehei, T.A., Or, D., 2002. Analytical models for soil pore-size distribution after tillage. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 1104-1114.
- Lima, A.C.R. Soil quality assessment in rice production systems. PhD Thesis. 116p. Wageningen University, The Netherlands. Wageningen, 2007.
- Lipiec, J., Stępniewski, W., 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. Soil Tillage Res. 35, 37-52.
- McBratney, A.B., Whelan B.M., 1999. The null hypothesis of precision agriculture. In: Stafford, J.V. (eds). Precision Agriculture '99'. Academic Press Sheffield, Sheffield, 947-957.
- Mapa, R.B., Green, R.E., Santo, L., 1986. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 1133-1138.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa Nº 20 de 15 de outubro de 2001. Diretrizes Gerais para a Produção Integrada de Frutas. 2001, 15p. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acessado em 22/07/2008.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Anexo à Instrução Normativa Nº 14 de 01 de abril de 2008. Normas Técnicas Específicas para a Produção Integrada de Morango – NTEPIMo. 2008, 13p. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acessado em 22/07/2008.
- Materechera, S.A., Dexter, A.R., Alston, A.M., 1992. Formation of aggregates by plant roots in homogenized soils. Plant Soil 142, 69-79.
- Materechera, S.A., Kirby, J.M., Alston, A.M., Dexter, A.R., 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. Plant Soil 160, 57-66.

Mathsoft, 1998. 'Mathcad 8 Professional Academic.' (Mathsoft Inc.: Cambridge MA)  
Endereço on-line: <<http://www.mathsoft.com>>.

Mendes, F.G., Melloni, E.G.P., Melloni, R., 2006. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. *Cerne*, 12, 211-220.

Meurer, E.J., 2000. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre: Genesis, 174p.

Moret, D., Arrúe, J.L., 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Tillage Res.* 96, 103-113.

Mubarak, I., Mailhol, J.C., Angulo-Jaramillo, R., Bouarfa, S., Ruelle, P., 2009a. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. *Agric. Water Manage.* 96, 1547-1559.

Mubarak, I., Mailhol, J.C., Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P., Boivin, P., Khaledian, M., 2009b. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma* 150, 158-165.

Neufeldt, H., Ayarza, M.A., Resck, D.V.S., Zech, W., 1999. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 93, 85-99.

Omuto, C.T., 2008. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agr. Ecosyst. Environ.* 128, 199-211.

Onofiok, O.E., 1988. Spatial and temporal variability of some soil physical properties following tillage of a Nigerian Paleustult. *Soil Tillage Res.* 12, 285-298.

Osawa, T. 1965. Studies on the salt tolerance of vegetable crops with special reference to mineral nutrition. *Bull Univ. Osaka Prefecture, Series B, Osaka, Japan* 16, 13-57.

Palmeira, P.R.T., Pauletto, E.A., Teixeira, C.F.A., Gomes, A.S., Silva, J.B., 1999. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *R. Bras. Ci. Solo* 23, 189-195.

Reichardt, K., Timm, L.C., 2004. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Editora Manole. 478 p.

Reichert, J.M., Kaiser, D.R., Reinert, D.J., Riquelme, U.F.B., 2009. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.* 44, 310-319.

Reinders, F.B., 2006. Micro-irrigation: world overview on technology and utilization. In: *Keynotes of the 7th international micro-irrigation congress*. Kuala Lumpur, Malaysia. 10 p.

Reisser Junior, C., Timm, L.C., Tavares, V.E.Q., Estrela, C.C., Aquino, L.S., Furtado, L.G., Philipsen, L.C., 2008. Manejo da irrigação do morangueiro no município de Turuçu-RS. In: *Proceedings of the XVIII Brazilian Congress of Irrigation and Drainage*, 27 July - 1 August 2008, São Mateus, Brazil. ABID 1, 1-6.

Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., Lu, X. , 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110, 131-146.

Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263.

Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., Zhang, T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Tillage Res.* 96, 316-330.

Rhoades, J. D., 1982. *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy.

Richards, L. A. (Ed.) (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. USDA Handbook No. 60, Washington, DC.

Rousseva, S. S., Ahuja, L.R., Heathman, G.C., 1988. Use of a surface gamma-neutron gauge for in-situ measurement of changes in bulk density of the tilled zone. *Soil Tillage Res.* 12, 235-251.

Selim, E.M., Mosa, A.A., El-Ghamry, A.M., 2009. Evaluation of humic substances fertigation through surface and subsurface drip irrigation systems on potato grown under Egyptian sandy soil conditions. *Agric. Water Manag.* 96, 1218-1222.

- Semmel, H., Horn, R., Hell, U., Dexter, A.R, Schulze, E.D., 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technol.* 3, 113-129.
- Shainberg, I., Letey, G.J., 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* 52, 1-57.
- Sharma, S., 1996. *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley and Sons, New York.
- Shi, Z., Wang, K., Bailey, J.S., Jordan, C., Higgins, A.H., 2002. Temporal changes in the spatial distributions of some soil properties on a temperate grassland site. *Soil Use Manage.* 18, 353-362
- Shukla, M.K., Lal, R., Ebinger, M., 2004. Soil quality indicators for reclaimed mine soils in south eastern Ohio. *Soil Sci.* 169,133-142.
- Shukla, M.K., Lal, R., Ebinger, M., 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Res.* 87, 194-204.
- Silva, S.A., Lima, J.S.S., Xavier, A.C., Teixeira, M.M., 2010. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-amarelo húmico cultivado com café. *R. Bras. Ci. Solo*, 34, 15-22.
- Silveira, R. J. C. Correlação geopedológica em solos da área do Batólito Pelotas. Tese (Doutorado). 146p. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7-31.
- Souza, C.F., Folegatti, M.V., Or, D., 2009. Distribution and storage characterization of soil solution for drip irrigation. *Irrig. Sci.* 27, 277-288.
- SPSS, 2007. *Statistical Software SPSS v.15.0, User's Guide*. SPSS, Chicago, Illinois, USA.
- Streck, C.A., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Horn, R., 2008a. Relações do Parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo* 32, 2603-2612.

- Streck, E.V., Kämpf, N., Dalmolin, R.S.D., Klamt, E., Nascimento, P.C., Schneider, P., Giasson, E., Pinto, L.F.S., 2008b. Solos do Rio Grande do Sul. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS,. 222p.
- Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res.* 99, 4-48.
- TAGLIANI, C. R. A. Plano Ambiental de Turuçu. Rio Grande: Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2007. 113p.
- Tan, K.H., 1998. Principles of soil chemistry. Marcel Dekker, New York, 521 p.
- Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S.J. Análises de solos, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Departamento de Solos-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico número 5).
- Tippkötter, R., 1994. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-2,000 MU). *Zeitschrift fuer Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157, 99-104.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 62, 141-163.
- Toledo, L.G. e Nicolella, G., 2002. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agricola* 59, 181-186.
- Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., Carter, M.R., 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. In: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp.21–58.
- Turhan, E., Eris, A., 2007. Growth and stomatal behaviour of two strawberry cultivars under long-term salinity stress. *Turk. J. Agric. For.* 31, 55-61.
- UNEP, 1992. World atlas of desertification. United Nations Environment Program, Edward Arnold, London.
- van Es, H.M., Ogden, C.B., Hill, R.L., Schindelbeck, R.R., Tsegaye, T., 1999. Integrated assessment of space, time, and management-related variability of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1599-1608.

van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-897.

Visconti, F., de Paz, J.M., Rubio, J.L., 2009. Principal component analysis of chemical properties of soil saturation extracts from an irrigated Mediterranean area: Implications for calcite equilibrium in soil solutions. *Geoderma* 151, 407-416.

Wang, Z., Chang, A. C., Wu, L., Crowley, D., 2003. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. *Geoderma* 114, 261-278.

Yoder, R.A., 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28, 337-351.

Young, I.M., 1998. Biophysical interactions at the root-soil interface: a review. *J. Agric. Sci.* 130, 1-7.

Zheng, Z., Zhang, F., Ma, F., Chai, X., Zhu, Z., Shi, J., Zhang, S., 2009. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field. *Geoderma* 149, 243-248.

## **ANEXOS**

**Anexo A.** Distribuição das classes de solos encontradas nas 15 lavouras de produção de morango em Turuçu, RS.

<b>Propriedade</b>	<b>Classificação do solo</b>
1	Argissolo Acinzentado
2	Argissolo Acinzentado
4	Argissolo Acinzentado
5	Argissolo Vermelho
6	Gleissolo
7	Argissolo Vermelho-Amarelo
8	Argissolo Vermelho-Amarelo
9	Argissolo Vermelho-Amarelo
10	Argissolo Vermelho-Amarelo
11	-
12	Argissolo Acinzentado
13	Cambissolo
14	Argissolo Vermelho
15	Argissolo Acinzentado
16	-