



Dissertação de Mestrado

**QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO
GRANDE DO SUL E DO BRASIL CENTRAL**

Cleudson Jose Michelin

PPGCS

**Santa Maria - RS, Brasil
2005**

**QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO
GRANDE DO SUL E DO BRASIL CENTRAL**

por

**CLEUDSON JOSE MICHELON
(Engenheiro Agrônomo)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração Processos físicos e morfogenéticos do Solo, do Centro de Ciências Rurais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO.**

PPGCS

Santa Maria - RS, Brasil

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO GRANDE DO
SUL E DO BRASIL CENTRAL**

Elaborada por
Cleudson Jose Michelin

Como requisito parcial à obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Reimar Carlesso, Ph. D. - UFSM
(Presidente/Orientador)

Dalvan J. Reinert, Ph. D. - UFSM

Dolores Wolschick, Dra – UFPr

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

À minha família que sempre me apoiou e
incentivou em todas minhas decisões **DEDICO** este trabalho

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais, ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e a Coordenação de Aperfeiçoamento ao Pessoal de Nível Superior-CAPES, pela concessão da bolsa e possibilidade de realização deste curso.

À Reimar Carlesso, pela orientação e ensinamentos mas, sobretudo, pela amizade, confiança, estímulo e oportunidade de realização desse trabalho.

Aos professores Dalvan José. Reinert e Lindolfo Storck, integrantes do comitê de orientação, pela importante contribuição na realização desse trabalho.

A minha namorada Andréa Neubauer pela presença, apoio e incentivo importantes na finalização desse trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica, Cleiton Dalla Santa, Gustavo De David, Jefferson Horn Künz, Juliano Gomes de Andrade, Paulo Ivonir Gubiani, pela amizade e disponibilidade dispensada na realização desse trabalho.

Aos amigos e colegas Brantan A. Chagas, Daniele Mello, Genésio M. da Rosa, Giane L. Melo, Marcio Z. de Almeida, Manoel Xavier Neto, Marinice Rodrigues, Mirta T. Petry, Renato B. Spohr, Tatiana T. Fiorin, Vanessa S. Fontana, pela ajuda, amizade e parceria em todos os momentos.

A equipe do Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria pelo apoio na realização das tarefas laboratoriais.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e considerações.

Aos professores e colegas do PPGCS pelos ensinamentos, amizade e momentos de descontração.

Em especial a minha família pelo incentivo e apoio e pela compreensão nos momentos de ausência.

A Deus por existir e pela saúde.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE ANEXOS	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Qualidade do solo	4
2.2. Parâmetros físico-hídricos do solo.....	5
2.2.1. Textura do solo.....	5
2.2.2. Estrutura do solo	6
2.2.5. Densidade do solo.....	9
2.2.6. Conteúdo de água no solo	10
2.3. Alterações na qualidade física em função do manejo do solo	11
2.4. O sistema plantio direto e a compactação do solo	13
2.4.1. Limites físicos ao crescimento de plantas	14
2.5. Área irrigada no Brasil	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Caracterização Geral.....	23
4.2. Caracterização Física dos solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul.....	24
4.2.1. Níveis de compactação dos solos do RS em função da densidade do solo e macroporosidade em cada faixa de argila.....	40
4.3. Caracterização Física dos solos irrigados amostrados no Brasil Central	46
4.3.1. Níveis de compactação dos solos irrigados do Brasil central em função da densidade do solo e macroporosidade.....	70

4.4 Avaliação das correlações entre as variáveis	77
5. CONCLUSÕES GERAIS	80
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	82
7. ANEXOS	87

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DO BRASIL CENTRAL

Autor: Cleudson Jose Michelin

Orientador: Reimar Carlesso

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

As áreas irrigadas caracterizam-se pela intensificação dos cultivos, e por conseqüência, uma intensa utilização do solo. Isso resulta em uma maior pressão de degradação da estrutura do solo, ocasionando muitas vezes a compactação dos solos. O principal efeito refere-se ao tráfego de máquinas e equipamentos, que além de ser mais intenso, usualmente ocorre em solo com maior conteúdo de água, mais suscetível à compactação. A compactação altera as características do solo, diminuindo a aeração, infiltração de água no solo e aumentando a resistência mecânica à penetração, dificultando o crescimento dos vegetais. O objetivo do trabalho foi realizar a caracterização física dos solos irrigados de algumas regiões brasileiras, com vistas a promover uma base de informações para orientar a tomada de decisões relativas ao manejo de áreas irrigadas. O trabalho foi conduzido em áreas irrigadas

sob pivô central, no Rio Grande do Sul (RS) e no Brasil central. Os perfis dos solos foram divididos em três camadas, superficial, intermediária e inferior. As amostras de solo foram coletadas na porção mediana de cada camada e realizou-se as seguintes determinações: textura do solo, densidade do solo (Ds) e de partículas, porosidade e conteúdo de água no solo nos potenciais de -0.001, -0.006, -0.033, -0.01, -0.5 e -1.5 MPa. Os solos foram agrupados em sete faixas de teor de argila assim descritas: 0-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-60; 60-70 e >70% de argila. Para cada faixa de teor de argila estabeleceu-se um valor crítico de densidade do solo (Ds) e de macroporosidade (macro), acima do qual (Ds) e abaixo do qual (macro), as amostras de solo foram caracterizadas com indicação de compactação. Em relação a indicação de compactação, as amostras de solos foram agrupados em quatro níveis: NC: amostra não compactada; C-D: amostra com indicação de compactação em função da Ds; C-M: amostra com indicação de compactação função da macro e C-DM: amostra com indicação de compactação em função da Ds e macro. A maior frequência das amostras de solo coletadas no Estado do RS foram classificadas na faixa de 40-50% de argila, na camada superficial e na faixa de argila superior a 70% nas camadas intermediária e inferior. No Estado de Goiás (GO), a maior frequência das amostras coletadas foram classificadas na faixa de argila superior a 70% nas três camadas do perfil do solo. Em Minas Gerais (MG) observou-se que a maior frequência das amostras de solo coletadas foi classificada na faixa de 20-30% de argila na camada superficial e 30-40% de argila nas camadas intermediária e inferior. No Estado da Bahia (BA) a maior frequência das amostras coletadas foram classificadas na faixa de 0-20% de argila, nas três camadas do perfil do solo. Do total das áreas amostradas no RS, 66,5% apresentaram indicação de compactação do solo na camada superficial, 25% na camada intermediária e 9,5% na camada inferior. Na camada superficial, a faixa de 40-50% de argila apresentou a maior frequência de amostras com indicação de compactação nos níveis C-M e C-DM e a faixa de 50-60% de argila no nível de compactação C-D. No Brasil central,

13,3% das áreas amostradas no Estado de GO, 24,1% das áreas de MG e 29,2% das áreas da BA, apresentaram indicação de compactação na camada de superficial. No Estado da BA, as amostras de solo coletadas na camada superficial classificadas na faixa de 0-20% de argila, apresentaram a maior frequência de indicação de compactação nos níveis C-D, C-M e C-DM. Nos Estados de GO e MG a maior frequência de indicação de compactação, na camada superficial, foi observada no nível C-M e ocorreu nas faixas de 20-30 e 30-40% de argila no Estado de GO e na faixa de 20-30% de argila no Estado de MG.

ABSTRACT

Master`s Degree Dissertation
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria, RS, Brasil.

PHYSICAL QUALITY OF IRRIGATED SOIL OF RIO GRANDE DO SUL STATE AND CENTRAL REGION OF BRASIL

Author: Cleudson Jose Michelin

Adviser: Reimar Carlesso

Santa Maria, February 28th, 2005.

The irrigated áreas are characterized by an intensification of the land use, and as consequence, an intense use of the soil. This usually results in a higher pressure of the soil structure degradation, causing many times soil compaction. The main cause is the intensive traffic of machines and equipments, that usually occurs an soil with higher soil water content. The soil compaction modifyes some soil physical characteristics, decreasing soil aeration, decrease water infiltration and increasing the mechanical resistance of the soil, affecting root growing and development. The objetive of this study was to carry out soil physical characterization of irrigated areas of some Brazilian regions and collect informations necessary to guide soil management decisions. Soil sampling were taken in irrigated areas cultivated under a central pivot irrigation system, in the

Rio Grande de Sul State (RS) and central region of Brazil. The soil profile was divided in three soil layers: superficial, intermediate and inferior. Samples were collected in the median portion of each soil layer and the following determinations: were conducted: soil texture, bulk density (Bd), particles density, porosity and the water content of the soil water potential of -0.001, -0.006, -0.033, -0.01, -0.5 and -1.5 Mpa. Soil types were grouped in seven ranges of clay content: 0-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-60; 60-70 and higher than 70% of clay. For each clay content a critical values of bulk density (Bd) and of the soil macroporosity (macro) were established values (above and below the Bd and macro critical level) to classify as soil compacted. The indication of soil compaction was grouped in four levels: NC - no compacted; CD - indication of soil compaction due to Bd; CM - indication of soil compaction due to macroporosity and CDM - indication of soil compaction due to both: Bd and macroporosity. The majority of soil samples collected in the RS was classified in the range of 40-50% of clay content in the superficial layer and in the range higher than 70% in the intermediate and inferior soil layers. In the Goias State (GO), the majority of soil samples were classified in the range of clay content higher than 70% in the three soil profile layers. In Minas Gerais State (MG) the majority of soil sample collected was classified in the range of 20-30% of clay content in the superficial and 30-40% of clay content in the intermediate and inferior layers. In the Bahia State (BA), the majority of soil sample collected was classified in the range of 0-20% of clay content, in the three layers of the profile. Considering the entire area sampled in the RS 66.5% presented indication of soil compaction in the superficial layer, 25% in the intermediate layer and 9.5% in the inferior layer. The superficial layer of the soil profile presented the highest frequency of soil samples with indication of soil compaction for the levels of CM and CDM for the range of 40-50% of clay content, and the range of 50-60% of clay content in the compaction level of CD. However, in the central region of Brazil; 13.3% of the areas in GO, 24.1% of the areas in MG, and 29.2% of the areas in BA had presented indication of soil compaction in the

superficial layer. In BA the collected soil samples in the superficial layer in the range 0-20% of clay content presented the highest frequency of indication of soil compaction for the levels CD, CM and CDM. In the state of GO and MG the highest indication of soil compaction in the superficial layer was observed for the CM level and occurred in the ranges of 20-30 and 30-40% of clay content.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Valores de densidade do solo estabelecidos como críticos (D_{s_c}) para a indicação de ocorrência de compactação dos solos em cada faixa de teor de argila dos solos. Santa Maria, RS, 2005. 21
- Tabela 2.** Valores de macroporosidade do solo (Macro) estabelecidos como críticos para a indicação de ocorrência de compactação dos solos em cada faixa de teor de argila dos solos. Santa Maria, RS, 2005. 21
- Tabela 3.** Frequência, frequência relativa, frações texturais e classe textural das amostras de solo coletadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS) em cada faixa de teor de argila, nas três camadas do perfil de solo. Santa Maria, RS, 2005. 29
- Tabela 4.** Estimativas do teste do qui-quadrado (X_c), grau de liberdade (GL) e nível mínimo de significância (NMS), observados nos testes de hipóteses da independência entre a indicação de compactação em função da densidade do solo e macroporosidade e as faixas de teor de argila, em cada camada do perfil do solo para os solos do RS. Santa Maria – RS, 2005. 40
- Tabela 5.** Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no Rio Grande do Sul, em cada faixa de teor de argila, na camada superficial. Santa Maria, RS, 2005. 41
- Tabela 6.** Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no RS, para cada faixa de teor de argila, na camada intermediária do perfil do solo. Santa Maria, RS, 2005. 43
- Tabela 7.** Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no RS, em cada faixa de teor de argila, na camada inferior. Santa Maria, RS, 2005. 45

- Tabela 8.** Freqüência e freqüência relativa das amostras de solo coletadas nos Estados de GO, MG e BA, em cada classe de argila, nas três camadas do perfil de solo. Santa Maria, RS, 2005. 53
- Tabela 9.** Frações texturais médias (%) e classe textural das amostras de solo coletadas nos Estados de GO, MG e BA, para cada faixa de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. 54
- Tabela 10.** Estimativas do teste do qui-quadrado (X_c), grau de liberdade (GL) e nível mínimo de significância (NMS), observados nos testes de hipóteses da independência entre a indicação de compactação em função da densidade de solo e macroporosidade e as faixas de teor de argila, em cada camada do perfil do solo para as amostras de solo coletadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria – RS, 2005. 70
- Tabela 11.** Freqüência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), em cada faixa de teor de argila, na camada superficial. Santa Maria, RS, 2005. 71
- Tabela 12.** Freqüência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), em cada faixa de teor de argila, na camada intermediária. Santa Maria, RS, 2005. 75
- Tabela 13.** Correlações entre os atributos físico-hídricos do solo avaliados. Santa Maria, RS, 2005. 78

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Percentual de área amostrada nos Estados do RS, GO, MG e BA. Santa Maria, RS, 2005. 23
- Figura 2.** Frações texturais médias, para as camadas superficial, intermediária e inferior, observadas nas amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão..... 24
- Figura 3.** Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão. 25
- Figura 4.** Densidade do solo, nas camadas de superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão. 26
- Figura 5.** Situação das áreas amostradas do Estado do RS, nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. Santa Maria, RS, 2005. (NC - Não compactado; C-D - compactado em função da densidade do solo; C-M - compactado em função da macroporosidade; C-DM - compactado em função da densidade do solo e macroporosidade). 27
- Figura 6.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial e intermediária. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais

- tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 30
- Figura 7.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 32
- Figura 8.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 33
- Figura 9.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 35
- Figura 10.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 36
- Figura 11.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes

- a faixa de 60-70% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 38
- Figura 12.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo..... 39
- Figura 13.** Frações texturais médias, para as camadas superficial, intermediária e inferior, observadas nas amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão. 46
- Figura 14.** Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.48
- Figura 15.** Densidade do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão..... 49
- Figura 16.** Situação das áreas amostradas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. Santa Maria, RS, 2005. (NC - Não compactado; C-D - compactado em função

- da densidade do solo; C-M - compactado em função da macroporosidade; C-DM - compactado em função da densidade do solo e macroporosidade). 51
- Figura 17.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 56
- Figura 18.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 57
- Figura 19.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 58
- Figura 20.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 60

- Figura 21.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 61
- Figura 22.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 62
- Figura 23.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 63
- Figura 24.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 64
- Figura 25.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As

- barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 65
- Figura 26.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 66
- Figura 27.** Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado de Goiás (GO), pertencentes a faixa de 60-70% de argila, nas camadas superficial e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo. 67
- Figura 28.** Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds). 68
- Figura 29.** Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo. 69

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO I.** Mapa das regiões brasileiras. As áreas hachuradas representam as regiões onde foram realizadas as coletas de amostras de solo para a caracterização física. Santa Maria-RS. 88
- ANEXO II.** Identificação dos produtores e locais onde foram realizadas as coletas das amostras de solo para caracterização física do solo. Santa Maria, RS, 2005. 89
- ANEXO III.** Demonstrativo dos locais onde foram realizadas as trincheiras para as coletas de amostras de solo quando as áreas apresentavam textura uniforme. Santa Maria-RS. 2005. 92

1. INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, o setor agrícola é o maior consumidor de água, alcançando cerca de 69% de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos. Embora o seu grande consumo, a agricultura irrigada é a forma mais eficiente de aumentar a produção de alimentos, pois permite o incremento na produtividade, principalmente em ambientes semi-áridos e áridos. Em regiões onde predominam as classes de clima úmido ou sub-úmido, a irrigação é aplicada de forma a suplementar as necessidades hídricas das culturas, durante períodos de déficits hídricos de curta duração. A incorporação e expansão das áreas irrigadas está associada à necessidade de aumentar os níveis de produtividade, uma vez que a expansão horizontal da agricultura está praticamente esgotada.

Nos sistemas agrícolas, a água é essencial ao crescimento e desenvolvimento das plantas, e regula os demais fatores físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento e a produtividade das culturas (Forsythe, 1967; Letey, 1985). A disponibilidade de água às culturas é variável de acordo com as características do solo, condições climáticas e necessidade da planta. Além disso, o aumento ou a redução da disponibilidade hídrica está muito relacionado com o manejo dado ao solo.

As práticas agrícolas realizadas para o estabelecimento da agricultura são, muitas vezes, inadequadas para as condições de clima e solo, resultando em degradação dos recursos naturais (Zimmermann, 2001). Os sistemas de manejo e o nível tecnológico adotados para aumentar a produção de alimentos devem priorizar a melhoria da qualidade dos solos e da água além de aumentar a conservação da água.

As lavouras irrigadas caracterizam-se pela intensificação dos cultivos, e por consequência, uma intensa utilização do solo. Devido a isso, atenção especial deve ser dada ao manejo do solo, das culturas e da água da irrigação, para evitar que ocorram alterações nas

características do solo, que causem a degradação das propriedades físicas, químicas e biológicas, afetando a produtividade das culturas.

Um dos principais problemas enfrentados nas áreas irrigadas é a degradação da estrutura do solo, resultando no aumento da compactação do mesmo. O principal efeito refere-se ao tráfego de maquinários, que além de ser mais intenso, ocorre em solo com maior conteúdo de água, mais suscetível à compactação. A compactação altera as características do solo, diminuindo a aeração, infiltração de água no solo e aumentando a resistência mecânica à penetração, dificultando o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais.

A avaliação da qualidade estrutural dos solos requer estudos e determinações de limites críticos de diversas propriedades do solo, as quais, podem variar de ano para ano, dependendo das condições climáticas, do manejo do solo e do tipo de cultura implantada. A mensuração dos limites críticos das propriedades físicas do solo ao desenvolvimento das plantas é difícil de ser realizada, pois os mesmos interagem entre si e com as condições climáticas, por isso, necessitam ser analisados de maneira conjunta. O conteúdo e o potencial de água no solo interagem com as propriedades físicas do solo que afetam diretamente a produtividade das culturas. Conhecendo-se os limites críticos, pode-se delimitar faixas de umidade do solo onde os fatores físicos diretamente relacionados à produção das plantas são nulos ou sem restrições econômicas à produtividade das culturas.

Os índices de qualidade estrutural devem ser sensíveis a variações no sistema de manejo do solo e serem aptos para indicar a necessidade de alterações no manejo atual do solo, quando esse apresentar restrições à produtividade das culturas, para torná-lo adequado ao desenvolvimento das plantas.

Esse trabalho foi desenvolvido devido a crescente ampliação das áreas irrigadas no Brasil e a importância do conhecimento das características físicas dos solos para que os produtores e técnicos tenham subsídios para aperfeiçoar o manejo do solo, das culturas e da irrigação

em suas áreas. Nesse estudo foram utilizados índices de densidade do solo e de macroporosidade, em função do teor de argila nas diferentes camadas do perfil do solo, para estabelecer parâmetros indicativos na avaliação da qualidade estrutural dos solos agrícolas irrigados, principalmente em relação aos parâmetros físico-hídricos do solo.

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar algumas características físico-hídricas dos solos irrigados de algumas regiões brasileiras, especificamente, a densidade do solo, densidade de partículas, textura, porosidade e retenção de água, com vistas a estabelecer uma base de informações para orientar a tomada de decisões relativas ao manejo de áreas irrigadas. Os objetivos específicos foram: (i) Avaliar a compactação restritiva à produtividade das culturas dos solos irrigados, por meio dos atributos físicos densidade do solo e macroporosidade; (ii) Avaliar a variabilidade textural de alguns solos irrigados por aspersão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Qualidade do solo

A capacidade do solo desempenhar a sua função em um ecossistema para suportar animais, vegetais, resistir à erosão e reduzir impactos negativos associados aos recursos água e ar é definida como qualidade do solo (Karlen et al., 1994). Entretanto, para Islam & Weil (2000), o termo qualidade do solo, não pode ser medido diretamente, em função de ser um parâmetro funcional e complexo, mas pode ser inferido a partir de algumas propriedades do solo, descritas como propriedades indicadoras da qualidade do solo.

O solo, segundo Dumanski e Pieri (2000), deve ser entendido como um corpo vivo. Sendo assim, os indicadores de qualidade do solo devem ter a capacidade e sensibilidade para mensurar e avaliar atributos e processos do solo que interfiram na promoção da sua vida. Além disso, segundo Doran & Parkin (1994), os indicadores de qualidade do solo devem seguir alguns critérios, assim descritos: (i) envolver processos que ocorrem no ecossistema; (ii) integrar propriedades e processos químicos, físicos e biológicos; (iii) ser acessível e aplicável no campo; (iv) ser sensível a variações de clima e de manejo;

A matéria orgânica do solo é um dos melhores indicadores de qualidade do solo, pois se relaciona com inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas (Reichert et al., 2003). De acordo com Karlen et al. (1994), as práticas de manejo que adicionam ou mantêm carbono orgânico no solo, parecem estar entre as mais importantes para restabelecer, manter ou melhorar a qualidade do solo. Ainda, segundo Altieri (2002), apesar da matéria orgânica encontrar-se numa faixa de apenas 1 a 6% em percentagem de massa na maioria dos solos, quando bem manejada, a quantidade e a qualidade da matéria orgânica proporcionam melhora nas propriedades físicas e químicas do solo, além

de aumentar a disponibilidade de nutrientes e a diversidade biológica do mesmo.

2.2. Parâmetros físico-hídricos do solo

2.2.1. Textura do solo

A textura do solo refere-se à distribuição do tamanho das partículas no solo. A escala de tamanho varia enormemente, desde partículas grandes, visíveis a olho nu, até partículas muito pequenas, que apresentam propriedades coloidais. O tamanho das partículas é de grande importância, pois determina o número de partículas por unidade de volume ou de peso e a superfície que estas partículas expõe. Tradicionalmente, as partículas do solo são divididas em três frações de tamanho, chamadas frações texturais: a areia, o silte e a argila.

A textura integra o grupo das principais características dos horizontes (Oliveira et al., 1992) e refere-se à posição relativa das frações granulométricas que formam a massa do solo. A textura, juntamente com outras características do solo, sobretudo a composição mineralógica das argilas e o teor de matéria orgânica, está intimamente relacionada à estrutura, consistência, permeabilidade, capacidade de troca de cátions, retenção de água e fixação de fosfatos. Devido a essas características, a textura recebe grande atenção de técnicos e pesquisadores, especialmente aqueles ligados à classificação do solo, sendo seu emprego comum nos sistemas taxonômicos como um dos principais critérios para distinção de classes de solo.

A proporção de cada componente das frações texturais de um solo, não se altera em um pequeno intervalo de tempo, por isso, a textura é considerada como propriedade básica do solo (Brady, 1983),

A textura do solo influencia o armazenamento e a disponibilidade de água às plantas. Petry (2000) observou que um solo de textura argila

pesada apresentou maior quantidade total de água armazenada no perfil do que um solo de textura franco-arenosa. No entanto, a disponibilidade de água às plantas foi maior no solo de textura franco-arenosa.

2.2.2. Estrutura do solo

A estrutura de um solo refere-se ao arranjo e a adesão das frações granulométricas primárias do solo em agrupamentos secundários denominados agregados. (Baver et al., 1972). A estrutura do solo é de grande importância para a vida vegetal (Kiehl, 1979), uma vez que ela influencia a movimentação de água, transferência de calor, aeração, densidade e porosidade do solo (Brady, 1983).

Solo que não é bem estruturado apresenta problemas no fornecimento de água e oxigênio, de maneira adequada ao crescimento e desenvolvimento das plantas e, os nutrientes, mesmo quando em quantidades suficientes, não são absorvidos. A estrutura do solo é uma propriedade e atua como importante fator na aeração, garantindo um fluxo de oxigênio capaz de contrabalançar o excesso de gás carbônico da atmosfera do solo, eliminado pelas raízes e microrganismos.

Solos arenosos não formam agregados estáveis como ocorre com os argilosos, sendo chamados de solos com estrutura de grãos simples, ou sem estrutura.

A ação da água na estabilidade dos agregados ocorre de duas maneiras principais: o impacto das gotas da chuva ou da irrigação, sobre a superfície exposta, causando dispersão e a hidratação e intumescimento dos agregados, causando um aumento na pressão do ar presente em seu interior, com conseqüente ruptura.

A estrutura pode ser avaliada, segundo Baver et al. (1972), pela distribuição de tamanho, quantidade e estabilidade de agregados. A estrutura dos solos é um dos atributos mais importantes para a adaptação das espécies (Martins et al., 2002), e pode ser avaliada por meio da

densidade do solo, macro e microporosidade do solo, estabilidade dos agregados, resistência à penetração do solo, permeabilidade, entre outros. Esses atributos podem ser utilizados como indicadores de adensamento, compactação, encrostamento e suscetibilidade do solo à erosão, subsidiando o controle da perda de produtividade e da degradação ambiental (Martins et al., 2002).

A importância da estrutura do solo em áreas irrigadas, é devido à influência que a mesma apresenta nos parâmetros físicos do solo (aeração, capacidade térmica, retenção de água e impedimento mecânico), na atividade biológica do solo, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na decomposição da matéria orgânica do solo, sendo por isso, um importante indicativo da qualidade do solo.

2.2.3. Porosidade do solo

Entre as partículas do solo ou mesmo entre agregados existem espaços porosos oriundos do arranjo, distribuição e orientação das partículas do solo, que podem armazenar água e ar, necessários para o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, dos microrganismos e animais do solo. O volume total de poros é denominado de porosidade total do solo. A porosidade total do solo pode ser dividida em microporosidade ou porosidade capilar e macroporosidade ou porosidade de aeração.

O espaço poroso de um solo é determinado principalmente por sua textura e estrutura (Hillel, 1980). A quantidade e a natureza dos poros existentes variam de acordo com o arranjo ou a geometria das partículas sólidas. Solos arenosos apresentam porosidade total reduzida, devido a tendência das partículas permanecerem em contato íntimo. Em solos de textura média onde é comum a ocorrência de agregados porosos e elevado teor de matéria orgânica, os espaços porosos por unidade de volume são elevados (Baver et al., 1972).

O movimento livre do ar e da água no solo ocorre através dos macroporos. Por outro lado, nos microporos, o movimento do ar é dificultado, enquanto que o da água fica restrito principalmente a capilaridade (Hillel, 1980). Dessa forma, apesar dos solos arenosos apresentarem reduzida porosidade total, o movimento do ar e da água é rápido nesses solos, em função de predominar macroporos. Já nos solos de textura fina, apesar de apresentarem grande espaço poroso, o movimento dos gases e da água é relativamente lento, devido a presença predominante de microporos.

A porosidade dos solos é um atributo importante a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural dos solos (Martins et al., 2002). De acordo com Baver et al. (1972), valores críticos de macroporosidade estão abaixo dos valores compreendidos entre 0,10 e 0,16 m^3m^{-3} . Para Da Ros et al. (1997), valores de macroporosidade dentro das condições ideais estão na faixa de 0,09 a 0,12 m^3m^{-3} , podendo a redução da macroporosidade causar decréscimo da permeabilidade do solo.

A quantidade e a maneira como os poros estão distribuídos no solo afetam diretamente a infiltração de água no solo (Eltz et al., 1998). A distribuição do tamanho de poros afeta a capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo (Hillel, 1980). Esta distribuição depende da textura e estrutura do solo, e pode ser obtida através da curva característica de água no solo. A água presente nos macroporos é facilmente drenada pela ação da gravidade e, parte da água retida nos microporos não é disponível às plantas.

Diz-se que um solo está saturado, quando praticamente todo o espaço poroso do mesmo, é ocupado pela água. Por outro lado, um solo é dito seco, quando o espaço poroso do mesmo é ocupado quase totalmente pelo ar.

O espaço aéreo de um solo, também chamado de porosidade livre de água, pode ser obtido pela diferença entre a porosidade total do solo e o volume de água do solo. Solos compactados apresentam macroporosidade reduzida, podendo apresentar problemas de aeração,

dificultando o desenvolvimento dos vegetais e infiltração de água, tornando-os mais suscetíveis à erosão.

2.2.4. Densidade de partículas

A densidade de partículas é definida como a relação entre a massa de sólidos de um solo seco e o volume de partículas do solo (Carter, 1993). A densidade de partículas não difere grandemente entre os solos, pois é dependente da constituição mineralógica dos mesmos. Seus valores variam de 2,6 a 2,75 g cm⁻³ para a maioria dos solos, pois os principais minerais constituintes do solo possuem densidades compreendidas nessa faixa.

A matéria orgânica possui uma massa específica menor do que a massa de um volume igual de sólidos minerais. Por isso, a quantidade desse componente num solo, exerce influência marcante na densidade de partículas desse solo (Brady, 1983).

A densidade de partículas apresenta pequena importância para a irrigação, no entanto, seu conhecimento é justificado pois é um parâmetro importante para o cálculo da porosidade total do solo.

2.2.5. Densidade do solo

A densidade do solo é obtida pela relação entre a massa das partículas secas do solo e o volume total do solo, incluindo tanto os sólidos como os poros do solo (Carter, 1993).

A densidade do solo é variável conforme a textura e estrutura do solo. Solos argilosos apresentam, geralmente, menor densidade do que solos arenosos, pois as partículas sólidas desses solos tendem a ser organizadas em grãos porosos ou grânulos, especialmente se houver presença adequada de matéria orgânica, condição que assegura elevada porosidade, resultando em menor densidade do solo (Brady, 1983).

A ação antrópica tende a elevar a densidade do solo na camada superficial, principalmente em função das alterações que ocorrem na estrutura do solo. Lorimer & Douglas (1995) estudando as alterações dos atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, observaram que, na camada superficial, solos sob pastagem cultivada e floresta nativa apresentaram menor densidade do solo do que solos sob seis cultivos contínuos de trigo.

De acordo com Klein (1998), a densidade do solo é afetada por sistemas de manejo do solo que alteram o espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando nas propriedades físico-hídricas do solo importantes como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência à penetração.

Para a irrigação, a densidade do solo possui fundamental importância, pelo fato de possibilitar a transformação do conteúdo gravimétrico de água no solo em altura de lâmina de irrigação, parâmetro básico para o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação.

A densidade do solo pode ser usada como medida direta do estado de compactação do solo. Solos compactados apresentam maior massa de sólidos por unidade de volume, indicando maior densidade do solo.

2.2.6. Conteúdo de água no solo

O conteúdo de água do solo é a quantidade de água retirada de uma amostra de solo submetida a secagem em estufa a 105°C, até massa constante.

O conteúdo de água do solo é normalmente variável com a textura do solo, assim, em solos arenosos, o conteúdo volumétrico de água na saturação está em torno de 0,40 a 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, em solos de textura média, é de aproximadamente 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e, em solos argilosos, pode atingir até 0,60 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Carlesso & Zimmermann, 2000). O conhecimento do conteúdo de água no solo é de fundamental importância para o bom manejo da água de irrigação.

A relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e o potencial matricial resulta na curva característica de água no solo. A forma da curva característica da água no solo é afetada pela estrutura e textura do solo e, mais especificamente, pela distribuição do tamanho de poros (Hillel, 1980; Wu et al., 1990). Isso significa que o traçado da curva se altera em solos compactados (Reichert, 1990) ou muito degradados.

O conteúdo de água do solo controla a aeração, a temperatura e o impedimento mecânico à penetração, os quais são afetados pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros (Reichert et al., 2003). A interação desses fatores físicos regula o crescimento e a funcionalidade do sistema radicular das plantas, baseados em limites críticos associados ao ar, à água e à resistência do solo, refletindo no crescimento e produtividade dos cultivos.

2.3. Alterações na qualidade física em função do manejo do solo

A ação antrópica provoca alterações nas características físicas do solo, quando comparado à sua condição natural. O manejo do solo altera principalmente a estrutura do mesmo, influenciando no ambiente de crescimento radicular. Na maioria das vezes, há degradação da qualidade do solo, cujos principais atributos indicadores parecem ser a agregação e a compactação (Reichert et al., 2003). Solos argilosos são bem estruturados, sendo mais resistentes à desagregação do que solos arenosos, porém são mais suscetíveis à compactação quando comparados à solos arenosos.

Segundo Cavenage et al. (1999), o uso do solo resultou em alteração nos atributos físicos, principalmente na densidade e macroporosidade do solo, quando comparado a um solo de cerrado com vegetação natural.

A adoção de sistemas de cultivos conservacionistas em um solo nunca antes cultivado proporciona menores perdas da qualidade do

mesmo, quando comparado à situações onde são empregados sistemas que revolvem o solo. No entanto, o grau de alteração das propriedades físicas desses sistemas conservacionistas é pouco conhecido e muito variável, principalmente devido às grandes variações de solos e de clima onde são utilizados e às grandes variações de culturas, equipamentos e operações realizadas (Reichert et al., 2003).

Segundo Forsythe (1967), a água, o oxigênio, a temperatura e o impedimento mecânico afetam o crescimento de plantas nos diferentes estádios de desenvolvimento, relacionando-se com as propriedades do solo que afetam indiretamente às plantas. A intensa utilização do solo com mecanização pesada e principalmente em condições inadequadas de umidade do solo causam, em muitas regiões, o aumento da compactação do mesmo. A compactação do solo é um processo resultante do histórico de tensões recebidas em uma área, através da mecanização ou pelo pisoteio animal (Reichert et al., 2003), e refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução de seu volume (Gupta & Allmaras, 1987; Gupta et al., 1989), resultante da expulsão de ar dos poros do solo.

A compactação altera várias propriedades do solo, notadamente as relacionadas com a física do solo, como a densidade do solo, a porosidade e parâmetros hídricos, ocasionando com isso alterações na maioria das vezes indesejáveis no espaço poroso do solo (Taylor & Burnett, Grohmann & Queiroz Neto) apud Silva et al., (1986). Essas alterações físicas, provocadas pela compactação do solo, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura do solo, podendo limitar o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais e causar problemas ambientais (Stepniewski et al., 2002).

Os solos cultivados, por possuírem características diferentes principalmente quanto a granulometria e o teor de matéria orgânica, apresentam comportamentos distintos quando submetidos à compactação (Bodman & Constantin, 1966; Taylor & Henderson, 1959). O conteúdo de

água do solo é outro fator determinante no processo de compactação (Grohmann & Queiroz Neto, 1966), pois existem faixas de umidade que tornam o solo mais ou menos suscetível à compactação.

A infiltração de água, resistência à penetração de raízes, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade indicam o estado em que a estrutura do solo se encontra e servem como indicadores do seu estado de compactação (Reichert et al., 2003). A infiltração da água é o mais importante, pois integra vários fatores: distribuição do tamanho de poros e continuidade de poros.

A densidade do solo e a porosidade dos solos, mesmo não sendo as propriedades que recebem maior impacto com a modificação da estrutura do solo, tem sido largamente utilizadas na avaliação da qualidade estrutural dos solos pela facilidade de determinação e por receberem pequena influência o teor de água no momento da coleta da amostra de solo (Reichert et al., 2003).

2.4. O sistema plantio direto e a compactação do solo

Vários autores, entre os quais Reinert (1990); Hakansson e Medvedev (1995); Silva et al., (1997), têm relatado o aumento da densidade do solo em áreas que utilizam o sistema de cultivo plantio direto. Isso pode ser considerado como uma conseqüência natural dessa técnica. No entanto, se a elevação da densidade atingir determinados níveis críticos, prejuízos começam a ocorrer na produtividade das culturas, resultando em menor lucratividade da atividade agrícola.

Em consulta realizada pelas entidades participantes da Plataforma plantio direto, agricultores de todo o Brasil informaram que, a compactação do solo tem sido uma das principais restrições para o estabelecimento e continuidade do plantio direto em suas áreas (Plataforma plantio direto, apud Silva, 2003).

De acordo com Watanabe et al. (2000), no sistema plantio direto, a ausência de revolvimento do solo aliada ao tráfego intenso de máquinas

promove a compactação superficial e modificações na distribuição dos tamanhos de poros do solo. Tormena e Roloff (1996) constataram que, o tráfego de máquinas num solo sob plantio direto ocasionou reduções drásticas no volume de macroporos do solo, com valores próximos de zero na entrelinha trafegada. Segundo Reinert et al. (2001), o maior estado de compactação de solos sob sistema de cultivo plantio direto, indicado pela densidade, ocorre de 8 cm até aproximadamente 15 cm de profundidade.

2.4.1. Limites físicos ao crescimento de plantas

As camadas compactadas do solo caracterizam-se por apresentar alta resistência à penetração quando o solo está seco e baixa oxigenação quando úmido, ocasionados pela elevada densidade do solo e baixa macroporosidade. Isso provoca dificuldades na semeadura e emergência das plantas e maior probabilidade de presença de patógenos, beneficiada pela maior umidade (alta microporosidade e lenta infiltração de água no solo).

O crescimento do sistema radicular das plantas é afetado por diversos fatores ambientais e de solo, que influenciam o desenvolvimento da parte aérea (Secco, 2003). Dentre os quais, destacam-se o impedimento mecânico, a disponibilidade de oxigênio e de nutrientes, a presença de substâncias e elementos tóxicos, compactação do solo e dilaceramento radicular, a temperatura, a umidade e o ataque de pragas e moléstias (Taylor & Arkin, Camargo & Alleoni, apud Secco, 2003).

A presença de camadas compactadas no interior do perfil do solo provoca o aumento do diâmetro das raízes das plantas acima dessa camada (Materchera et al., 1992) e diminuição do diâmetro ou proliferação de raízes laterais mais finas, na camada compactada (Russel & Gross, 1974), que por sua vez pode interferir no crescimento, na taxa de absorção de nutrientes e água pelas raízes (Barber et al., 1988).

A identificação de camadas compactadas é qualitativa, pois ainda persistem dúvidas sobre qual o grau de compactação do solo e quais os limites críticos dos atributos físico-mecânicos que limitam o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

A penetração de raízes de milho cultivado em vasos, em solo de textura média, deixou de ocorrer quando a densidade do solo atingiu $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ (Shierlaw & Alston, 1984). Moraes et al. apud Secco (2003), avaliando a influência de camadas subsuperficiais compactadas, encontraram redução de 60% na massa seca de raízes de soja em um Latossolo Roxo com densidade de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ e de 51% em um solo Terra Roxa estruturada com densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$. Valores de densidade do solo superiores a $1,52 \text{ Mg cm}^{-3}$ causaram inibição do crescimento radicular de plantas de soja, em um solo de textura média (Fernandez et al., 1995). Maria et al. (1999) estudando a influência da densidade do solo no sistema radicular em um Latossolo Roxo encontraram que, ocorre restrição no desenvolvimento radicular com densidade do solo superior a $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, quando o solo encontra-se na capacidade de campo.

Como os valores médios de densidade do solo de solos arenosos são, naturalmente, maiores do que os valores de solos argilosos, deve-se evitar a utilização do valor absoluto da densidade do solo para avaliar o estado de compactação de um solo, utilizando o teor de argila como referência (Reinert et al., 2001). Assim, de maneira generalizada, esses autores propõem os seguintes valores críticos de densidade do solo, caracterizando um solo como compactado: $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com mais de 55% de argila; $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos entre 20 e 55% de argila e, $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila.

Silva (2003) trabalhando o intervalo hídrico ótimo (IHO) em três solos, (Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico 12% de argila, Latossolo Vermelho distrófico 50% de argila e Latossolo Vermelho distroférico típico 60% de argila), considerando os limites críticos de resistência mecânica à penetração (RP) de 2 MPa e macroporosidade de

10%, encontrou que a densidade crítica na qual o IHO era zero, foi de $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ para o Latossolo Vermelho distrófico e $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Considerando a RP de 1 MPa, a densidade crítica foi $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférico típico.

Relacionando estados de compactação do solo com a produtividade das culturas, Silva (2003) encontrou uma redução de 18% na produtividade de trigo em um Latossolo Vermelho distrófico com 50% de argila, que apresentou na profundidade de 12,5cm, densidade de $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ no maior estado de compactação em relação ao menor estado de compactação, no qual a densidade do solo foi de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$. Já em um Latossolo Vermelho distroférico típico com 60% de argila, a redução na produtividade foi de 34% do maior estado de compactação onde a densidade do solo foi de $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ para o menor estado de compactação que apresentou densidade do solo de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$.

Streck (2003) trabalhando com um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico com 8,5 % de argila na camada de 10-20 cm, encontrou uma redução de 40% na produtividade do feijoeiro no tratamento que sofreu compactação adicional por duas passadas de máquina que apresentou densidade do solo de $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$ em relação ao tratamento sem compactação adicional onde a densidade do solo foi de $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$, o autor destaca ainda que o sistema radicular das plantas do tratamento que sofreu compactação concentrou-se na camada superficial, enquanto que as plantas do tratamento sem compactação apresentaram um aprofundamento do sistema radicular no perfil do solo. Dessa forma, o autor concluiu que a restrição ao crescimento radicular restringiu a produtividade da cultura.

Em relação a macroporosidade Reinert et al. (2001) afirmam que, o suprimento de oxigênio para as raízes tem sido considerado crítico quando o espaço aéreo do solo for de aproximadamente 10%, implicando

em falta de oxigênio às raízes quando a aeração do solo for inferior a 10%. No entanto, existem culturas que exigem espaço aéreo superior a 10%, e outras que se desenvolvem com aeração inferior a 10%.

2.5. Área irrigada no Brasil

O potencial de áreas para o desenvolvimento da irrigação no Brasil é estimado em 14,6 milhões de hectares em terras altas e de 14,9 milhões de hectares em várzeas, totalizando 29,5 milhões de hectares (Christofidis, 1999). Ainda, segundo o autor, desse total, apenas 2,090 milhões de hectares encontram-se sob irrigação em terras altas e 1,059 em várzeas, totalizando 3,149 milhões de hectares, representando 10,7% do potencial de solos aptos para agricultura irrigada.

A região Sul é a mais expressiva em termos de área irrigada, com 1,1 milhão de hectares, equivalentes a 35% da área total irrigada no país; em segundo lugar vem a região sudeste com aproximadamente 30% do total, a região Nordeste aparece em terceiro lugar com 24%, e em menor escala aparecem a região Norte e Centro-Oeste (Loiola, 2001).

O método de irrigação por superfície continua sendo o mais utilizado no país, com cerca de 1,7 milhões de hectares (59%) predominante nas regiões Norte e Sul, enquanto a irrigação por aspersão prevalece nas demais regiões (35%) e a localizada representa a menor área, com 182 mil ha (Christofidis, 1999).

Considerando a irrigação realizada pelo método de aspersão via pivô central, o Estado de São Paulo apresenta a maior área irrigada com aproximadamente 250 mil hectares, seguido por Goiás com 118 mil hectares, Minas Gerais 88 mil hectares e Bahia com 82 mil hectares (Christofidis, 2002). O Rio Grande do Sul aparece em quinto lugar com aproximadamente 35 a 40 mil hectares irrigados, segundo as empresas de revenda de equipamentos de irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em áreas irrigadas sob pivô central nas regiões Sul e Centro-Oeste brasileiro. Na região Sul, o trabalho foi conduzido nas Missões e no Planalto do Estado do Rio Grande do Sul (RS). No Centro-Oeste brasileiro o estudo foi conduzido no Sudeste de Goiás (GO), Sul de Minas Gerais (MG) e Oeste da Bahia (BA) (Anexo 1).

Foram selecionados pivôs representativos de uma propriedade, com base nas características morfológicas do solo, os quais foram georeferenciados através da tomada dos dados das coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) (Anexo 2).

Em virtude do volume de material necessário e do custo para a realização das análises, estabeleceu-se que nos pivôs que possuíam áreas uniformes em relação à textura do solo, fosse realizada uma amostragem a cada 40 ha de área. Nos pivôs que apresentaram áreas desuniformes em relação à textura do solo, realizou-se uma amostragem em cada ponto que apresentava diferença de textura. As informações de uniformidade das áreas em relação à textura do solo foram obtidas através de uma consulta aos proprietários das mesmas e visita às áreas dos pivôs.

No Estado do RS foram amostrados 86 pivôs, cavadas 191 trincheiras e coletadas 1337 amostras de solo, representando uma área de 6.627,7 ha. Em GO foram amostrados 12 pivôs, abertas 30 trincheiras e coletadas 210 amostras representando uma área de 965,22 ha. No Estado de MG foram coletadas 203 amostras em 29 trincheiras, distribuídas em 9 pivôs, equivalendo a uma área de 886,77 ha. Na BA foram coletadas 504 amostras em 72 trincheiras, distribuídas em 22 pivôs, equivalendo a uma área de 2.036,27 ha.

As amostragens foram realizadas no último, penúltimo e antepenúltimo lance dos pivôs (anexo 3), pois esses locais representam a maior área irrigada do pivô. Nos pivôs que apresentavam desuniformidade

em relação às características morfológicas do solo, realizou-se uma amostragem em cada local que apresentava diferença de textura do solo, independentemente da seqüência de lances do pivô.

Para a coleta das amostras foram cavadas trincheiras de aproximadamente 80 cm de comprimento, 60 cm de largura e 75 cm de profundidade. Os perfis dos solos foram divididos em três camadas, em função da morfologia do solo, assim descritas: camada superficial, camada intermediária e camada inferior. A camada superficial variou de 0 a 25 cm de profundidade entre os perfis amostrados, a camada intermediária variou de 15 a 50 cm e a camada inferior variou de 35 a 75 cm de profundidade.

As amostras de solo foram coletadas nas profundidades correspondentes à porção mediana de cada camada. Em cada trincheira foram coletadas sete amostras de solo, sendo três na camada superficial, duas na camada intermediária e duas na camada inferior.

Coletaram-se amostras com estrutura preservada, com o auxílio de um extrator, no qual era acoplado um cilindro de metal de 5,56 cm de diâmetro, 3 cm de altura e volume $72,84 \text{ cm}^3$, para a determinação da microporosidade, densidade do solo e curva característica de água no solo. Quando utilizou-se um cilindro com dimensões diferentes daquele especificado anteriormente foram tomadas as medidas do diâmetro e da altura para a determinação exata do volume do mesmo.

Para as análises granulométricas e densidade de partículas foram coletadas aproximadamente 1000 gramas de solo com estrutura deformada, na porção mediana de cada camada do perfil do solo. Determinações analíticas de textura, densidade de partículas, densidade do solo e porosidade foram realizadas conforme métodos descritos pela EMBRAPA (1997).

Para a análise da textura do solo utilizou-se o método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, utilizando o volume do cilindro de $72,84 \text{ cm}^3$.

No laboratório as amostras de solo não deformadas foram saturadas e colocadas na mesa de tensão à -0,001 MPa por 48 horas e a -0,006 MPa por mais 48 horas. A umidade correspondente à tensão de -0,006 MPa correspondeu ao percentual de microporos desse solo.

A porosidade total (Pt) foi calculada a partir da densidade do solo e de partículas, através da seguinte expressão $Pt = (Dp - Ds) / Dp$. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

As amostras de solo ainda com estrutura preservada, seguiram para o aparelho extrator de água idealizado por Richards (Richards, 1949), onde foi obtida a umidade do solo nos potenciais de -0,033 e -0,10 MPa, nas placas porosas de Richards. Após isso, as amostras foram colocadas na estufa à 105°C para secagem até massa constante.

A umidade das amostras de solo nos potenciais de -0,5 e -1,5 MPa foi determinada através de psicrometria, utilizando câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 “dewpoint potentiometer” (Decagon, 2002). Para essa avaliação utilizaram-se de cinco a sete sub-amostras de solo com estrutura deformada as quais foram secas ao ar, umedecidas com água através de um borrifador, pesadas e levadas até o WP4 onde fez-se a leitura do potencial que a amostra se encontrava. Após isso as amostras foram levadas para a estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens correspondeu ao conteúdo de água do solo no potencial determinado pelo WP4. Relacionando-se o potencial determinado no WP4 para cada sub-amostra com sua respectiva umidade, traçou-se uma curva, com escala logarítmica, da qual foram retirados os valores de umidade do solo nos potenciais de -0,5 e -1,5 MPa.

Para a avaliação de compactação dos solos utilizou-se como parâmetros a densidade do solo e a macroporosidade. Foram coletadas amostras preliminares em algumas regiões, para a verificação da amplitude de variação da textura do solo, bem como dos valores de densidade do solo e de macroporosidade. Com base nessas informações,

os solos foram agrupados em faixas de textura, em função do teor de argila, assim descritas: 0-20% de argila; 20-30% de argila; 30-40% de argila; 40-50% de argila; 50-60% de argila; 60-70% de argila; > 70% de argila

Para cada faixa de teor de argila, estabeleceu-se um valor crítico de densidade do solo e macroporosidade dos solos, baseados na literatura existente, conforme descritos nas tabelas abaixo.

Tabela 1. Valores de densidade do solo estabelecidos como críticos (D_{s_c}) para a indicação de ocorrência de compactação dos solos em cada faixa de teor de argila dos solos. Santa Maria, RS, 2005.

Faixa de argila (%)	D_{s_c} (gcm^{-3})
0-20	1,60
20-30	1,55
30-40	1,50
40-50	1,45
50-60	1,40
60-70	1,35
> 70	1,30

Tabela 2. Valores de macroporosidade do solo (Macro) estabelecidos como críticos para a indicação de ocorrência de compactação dos solos em cada faixa de teor de argila dos solos. Santa Maria, RS, 2005.

Teor de argila (%)	Macro (%)
< 30	10
30-50	8
>50	6

Após a avaliação da densidade do solo e macroporosidade as amostras de solo foram classificadas, em relação à indicação de ocorrência de compactação, em níveis assim descritos: **(NC)**: Não compactada: quando a amostra de solo apresentava densidade do solo inferior e macroporosidade superior aos níveis críticos estabelecidos para determinada faixa de argila; **(C-D)**: Compactada em função da densidade do solo: quando os valores de densidade do solo das amostras de solo apresentavam-se superiores ao nível crítico estabelecido para determinada faixa de argila; **(C-M)**: Compactada em função da macroporosidade: quando os valores de macroporosidade das amostras

de solo encontravam-se em percentuais inferiores ao nível crítico estabelecido para cada faixa de argila; **(C-DM)**: Compactada em função da densidade do solo e macroporosidade: quando a amostra de solo apresentava densidade do solo superior e macroporosidade inferior aos níveis críticos estabelecidos para determinada faixa de argila.

Os dados foram analisados através da análise de freqüências, teste qui-quadrado e análise de correlações. Os dados foram agrupados por Estado, camada do perfil de solo e classes de argila onde foram calculadas as freqüências percentuais para cada parâmetro. As freqüências foram analisadas através do cálculo da percentagem. Aplicou-se o teste não-paramétrico (qui-quadrado) para analisar a dependência da ocorrência de compactação do solo, em relação às faixas de argila, em cada profundidade do perfil do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Geral

O percentual de área de solo amostrada em cada Estado é apresentado na figura 1. O RS foi o Estado onde foram coletados o maior número de amostras de solo, totalizando uma área amostrada de 6.627,7 ha, correspondendo à 63,03% da área total amostrada. No Estado da BA, foram amostrados 2.036,3 ha, correspondentes à 19,4% da área total amostrada. Em GO, foram amostrados 965,2 ha, que representaram 9,2% da área total amostrada. MG foi o Estado com menor área amostrada, totalizando 886,8 ha, representando 8,4% do total das áreas amostradas por Estado.

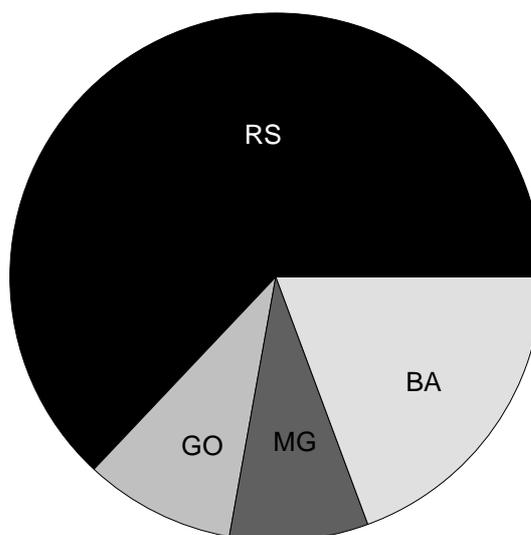


Figura 1. Percentual de área amostrada nos Estados do RS, GO, MG e BA. Santa Maria, RS, 2005.

A área média representativa de cada trincheira foi de 34,7 ha para o RS, 32,2 ha para GO, 30,6 ha para MG e 28,3 ha para o Estado da BA.

4.2. Caracterização Física dos solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul

As áreas amostradas no RS apresentaram na camada superficial teores médios de areia, silte e argila de 29,34%, 20,68% e 49,98%, respectivamente (figura 2). Na camada intermediária as amostras apresentaram textura média de 25,94%, 19,93% e 54,13% para as frações de areia, silte e argila, respectivamente. A camada inferior apresentou textura média de 23,9%, 16,4% e 59,7% para as frações areia, silte e argila, respectivamente. Observou-se um incremento do teor de argila, com o aumento da profundidade do perfil de solo.

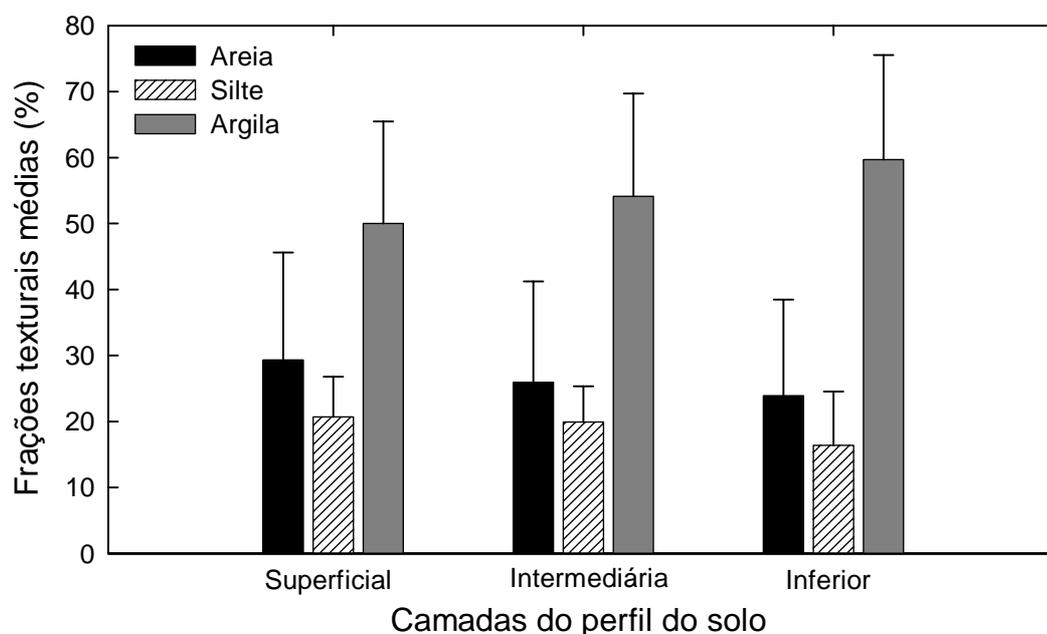


Figura 2. Frações texturais médias, para as camadas superficial, intermediária e inferior, observadas nas amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

A textura do solo é uma das principais características dos horizontes (Oliveira et al., 1992), e juntamente com a estrutura, são os principais parâmetros que afetam a porosidade do solo. Segundo

Carlesso & Zimmermann (2000), em solos de textura média e argilosa onde é comum a ocorrência de agregados porosos e elevado teor de matéria orgânica, os espaços porosos por unidade de volume são elevados. Já em solos de textura arenosa, a porosidade total é reduzida.

Na camada superficial observou-se que os valores de macroporosidade, microporosidade e porosidade total foram inferiores àqueles das demais camadas (Figura 3).

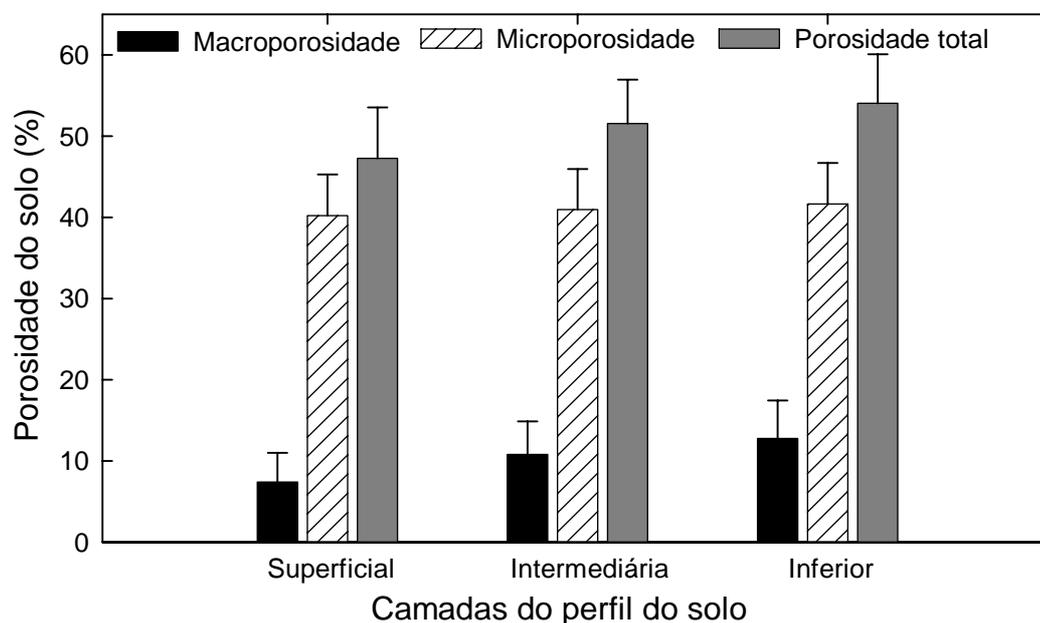


Figura 3. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

A macroporosidade média apresentada pelos solos do RS para a camada superficial foi 7,38%. Esse valor é inferior ao valor de 10%, indicado como aceitável por Reinert et al. (2001). Segundo esses autores, em solos irrigados, quando o espaço aéreo do solo for inferior a 10%, o suprimento de oxigênio para as raízes é reduzido, implicando em redução de geração de energia para as plantas.

O percentual médio de argila dos solos do RS para a camada superficial foi 49,98% (Figura 2). Para essa faixa de argila, o valor crítico de macroporosidade estabelecido nesse trabalho é 8%. Dessa forma, pode-se dizer que, em termos de macroporosidade, as amostras de solo coletadas na camada superficial dos solos irrigados no RS, apresentaram situação crítica.

Um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho de poros (Silva, 2003). A estrutura é modificada, sendo os macroagregados destruídos e o solo se transforma numa estrutura maciça (Tavares filho et al., 1999). Segundo Soane e Ouwerkerk (1994), um solo compactado apresenta aumento de sua densidade e resistência mecânica à penetração, além de redução na porosidade, principalmente a macroporosidade ou porosidade de aeração.

A camada superficial apresentou densidade do solo mais elevada do que as demais camadas do perfil do solo (Figura 4).

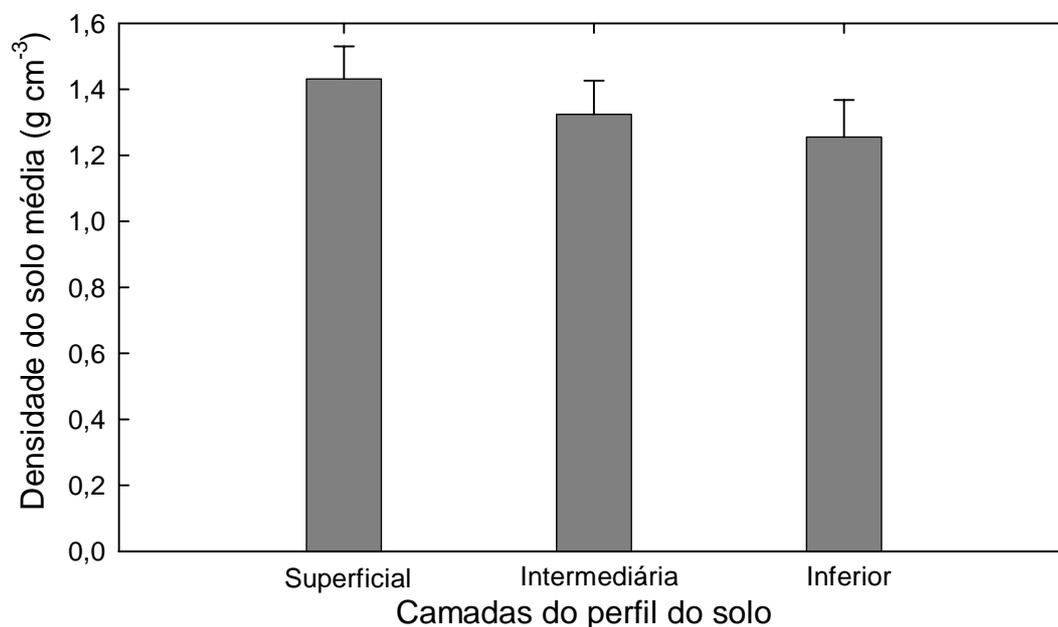


Figura 4. Densidade do solo, nas camadas de superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

A densidade média do solo na camada superficial das amostras coletadas nos solos irrigados do RS foi $1,43 \text{ g cm}^{-3}$. Esse valor foi inferior ao limite de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ estabelecido como crítico, para solos pertencentes a faixa de 40 a 50% de argila (Figura 2).

Vários autores, entre os quais (Reinert, 1990; Hankansson e Medvedev, 1995; Silva et al., 1997), verificaram o aumento da densidade do solo em lavouras sob plantio direto, com o passar dos anos. Esses autores consideram isso como consequência normal do sistema plantio direto. No entanto, se esse aumento na densidade do solo atingir determinados níveis críticos, o solo passa a ser caracterizado como compactado podendo causar prejuízos às culturas.

O maior percentual de área com problemas de compactação foi observado na camada superficial (Figura 5).

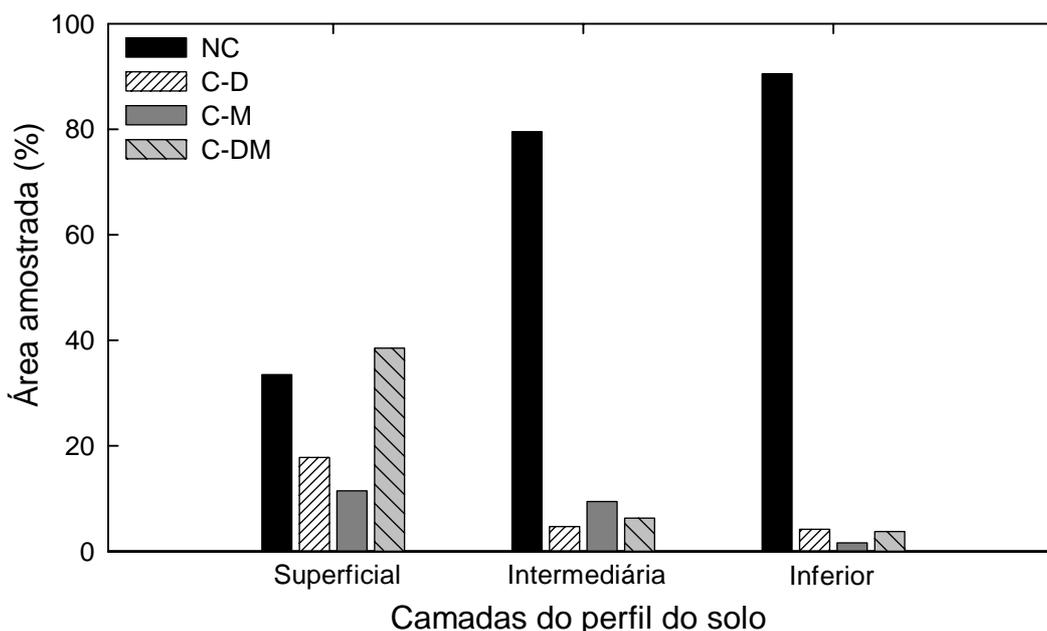


Figura 5. Situação das áreas amostradas do Estado do RS, nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. Santa Maria, RS, 2005. (NC - Não compactado; C-D - compactado em função da densidade do solo; C-M - compactado em função da macroporosidade; C-DM - compactado em função da densidade do solo e macroporosidade).

Do total dos 6.627,7 ha amostrados, 2.220,2 ha (33,5%) não apresentaram problemas de compactação; 1.179,7 ha (17,8%) apresentaram-se compactados em função da densidade do solo; 762,1 ha (11,5%) apresentaram-se compactados em função da macroporosidade e; 2.465,5 ha (37,2%) apresentaram-se compactados em função da densidade do solo e da macroporosidade.

A principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas e equipamentos em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita (Salire et al.,1994; Hankansson e Voorhees, 1997; Reinert et al., 2001). Ainda, segundo Salire et al. (1994) e Hankansson e Voorhees (1997), a compactação superficial é causada basicamente pela pressão de inflação de ar dos pneus e a subsuperficial pela massa total por eixo.

Na tabela 3 são apresentados a freqüência das amostras de solo coletadas no Estado do RS em cada faixa de teor de argila, para as três camadas do perfil do solo.

As amostras de solo coletas no RS se concentraram em áreas irrigadas do planalto médio, região onde predominam solos com teor de argila superior a 40%. Isso contribuiu para que a maioria das amostras coletadas se enquadrassem nas faixas de 40-50, 50-60, 60-70 e >70% de argila.

Observa-se um incremento do teor de argila no solo com o aumento da profundidade do perfil, evidenciado pela maior freqüência de amostras incluídas nas faixas de 50-60, 60-70 e >70% de argila, para as camadas intermediária e inferior.

Na figura 6 são apresentados os resultados de densidade do solo (máxima, mínima e média) e a porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) para os solos amostrados do RS, pertencentes à faixa de 0-20% de argila.

Nessa faixa de argila observaram-se somente amostras de solo coletadas nas camadas superficial e intermediária.

Tabela 3. Freqüência, freqüência relativa, frações texturais e classe textural das amostras de solo coletadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS) em cada faixa de teor de argila, nas três camadas do perfil de solo. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de Argila (%)	Freqüência	Freqüência Relativa	Frações Texturais (%)			Classe Textural
			Areia	Silte	Argila	
Camada superficial						
0-20	5	2,62	72,02	16,00	11,98	Franco arenoso
20-30	11	5,76	56,58	17,64	25,78	Franco argilo arenoso
30-40	37	19,37	42,63	21,61	35,76	Franco argiloso
40-50	52	27,23	31,47	23,00	45,53	Argila
50-60	26	13,61	26,65	18,77	54,58	Argila
60-70	41	21,46	13,89	20,91	65,20	Muito argiloso
>70	19	9,95	9,40	18,04	72,56	Muito argiloso
Camada intermediária						
0-20	5	2,63	62,20	16,46	17,34	Franco arenoso
20-30	9	4,74	53,96	18,02	28,02	Franco argilo arenoso
30-40	21	11,05	41,36	22,36	36,28	Franco argiloso
40-50	44	23,16	32,97	21,89	45,14	Argila
50-60	38	20,00	24,78	21,09	54,13	Argila
60-70	37	19,47	14,20	20,00	65,80	Muito argiloso
>70	36	18,95	7,87	16,57	75,56	Muito argiloso
Camada inferior						
0-20	-	-	-	-	-	
20-30	7	3,68	59,29	16,44	24,27	Franco argilo arenoso
30-40	14	7,37	45,94	19,18	34,88	Franco argilo arenoso
40-50	24	12,63	35,06	19,38	45,56	Argila
50-60	41	21,58	27,48	18,28	54,24	Argila
60-70	39	20,53	20,17	16,19	63,64	Muito argiloso
>70	65	34,21	7,85	16,20	75,95	Muito argiloso

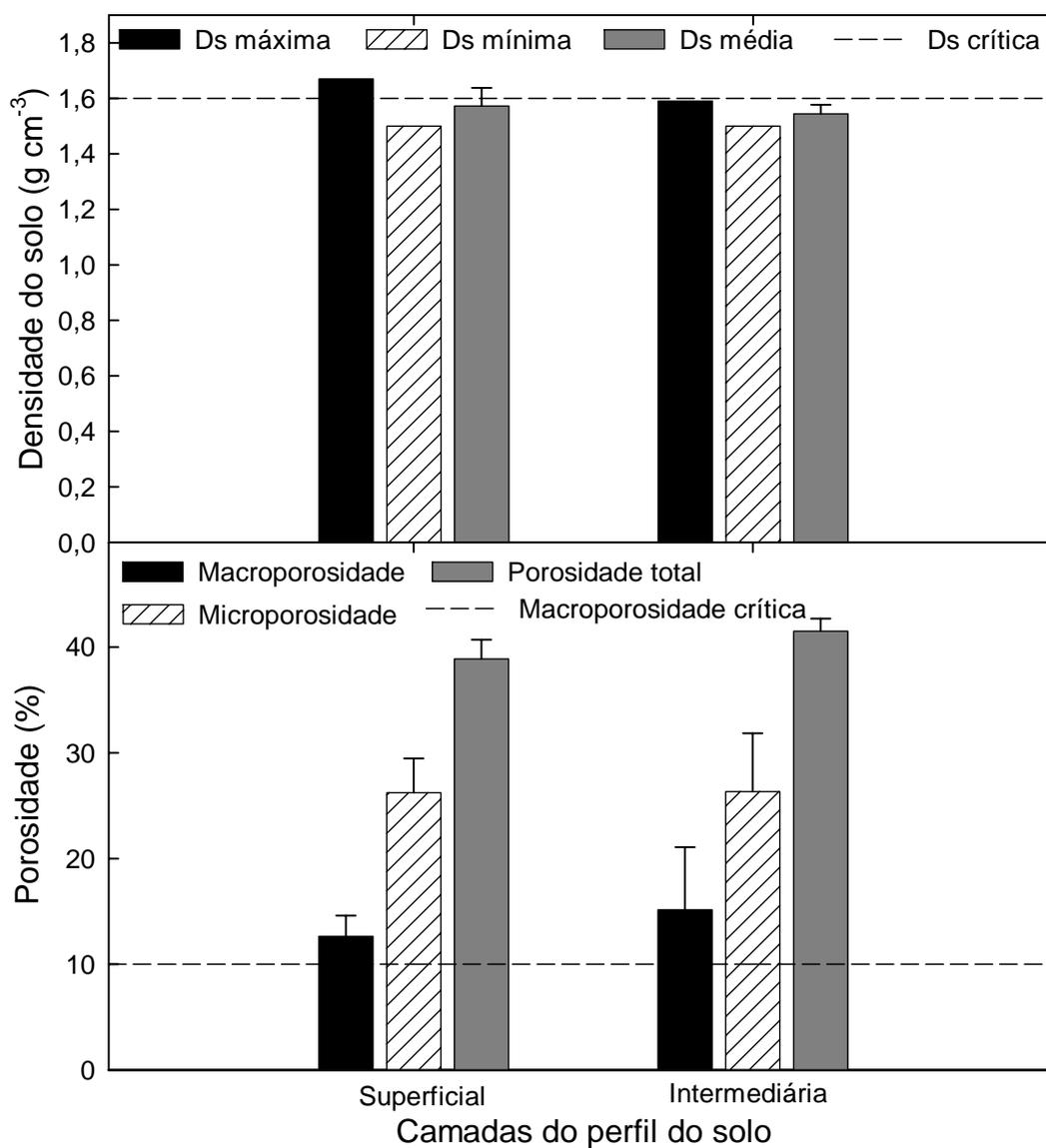


Figura 6. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial e intermediária. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (D_s) e macroporosidade do solo.

Na camada inferior o teor de argila das amostras foi superior a 20% em todas as coletas realizadas.

Observa-se que o valor médio de densidade dos solos pertencentes a essa faixa de argila foi inferior ao valor de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, considerado como limite para essa faixa de argila. No entanto, algumas amostras coletadas na camada superficial, apresentaram densidade do solo superior a esse limite, indicando claramente nesses solos problemas de compactação do solo em função da densidade do solo.

As amostras coletadas apresentaram valores de macroporosidade superior a 10% (limite crítico para essa faixa de argila), nas camadas superficial e intermediária do perfil de solo, indicando não haver limitações em termos de compactação em relação a macroporosidade para os solos pertencentes a essa faixa de argila.

As amostras de solo coletadas e classificadas na faixa de 20-30% de argila apresentaram, na camada superficial, média de densidade do solo igual ao limite estabelecido como crítico (Figura 7). No entanto, algumas amostras apresentaram densidade do solo superior ao limite crítico, atingindo valores de até $1,66 \text{ g cm}^{-3}$, indicando que no RS existem áreas irrigadas com indicação de compactação em função da densidade do solo, nessa faixa de argila.

A macroporosidade da camada superficial das amostras de solo classificadas na faixa de 20-30% de argila, foi inferior àquela considerada como crítica (Figura 7), indicando que esses solos apresentam restrições de aeração e infiltração de água do solo. Atenção especial deve ser dada ao manejo de solo, de culturas, bem como a mecanização utilizada nessas áreas, para recuperar a macroporosidade desses solos e evitar que a densidade do solo se eleve, causando possíveis prejuízos às culturas.

Nas camadas intermediária e inferior, os valores de densidade do solo foram inferiores e os de macroporosidade superiores aos limites críticos estabelecidos nesse trabalho.

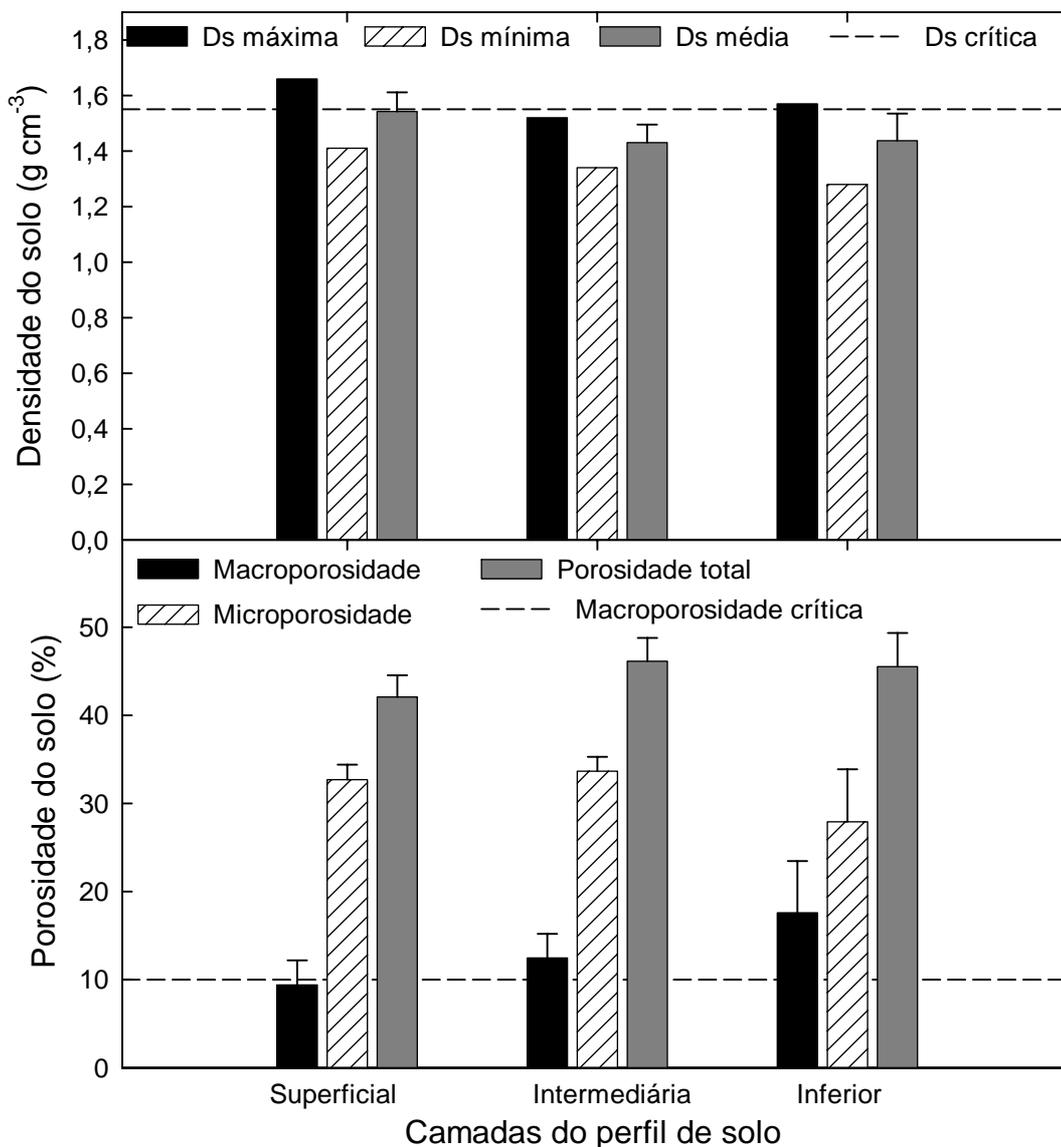


Figura 7. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

Na figura 8 observa-se que a densidade do solo média observada nas amostras de solo classificadas na faixa de 30-40% de argila foi inferior ao valor estabelecido como crítico, nas três camadas do perfil do solo.

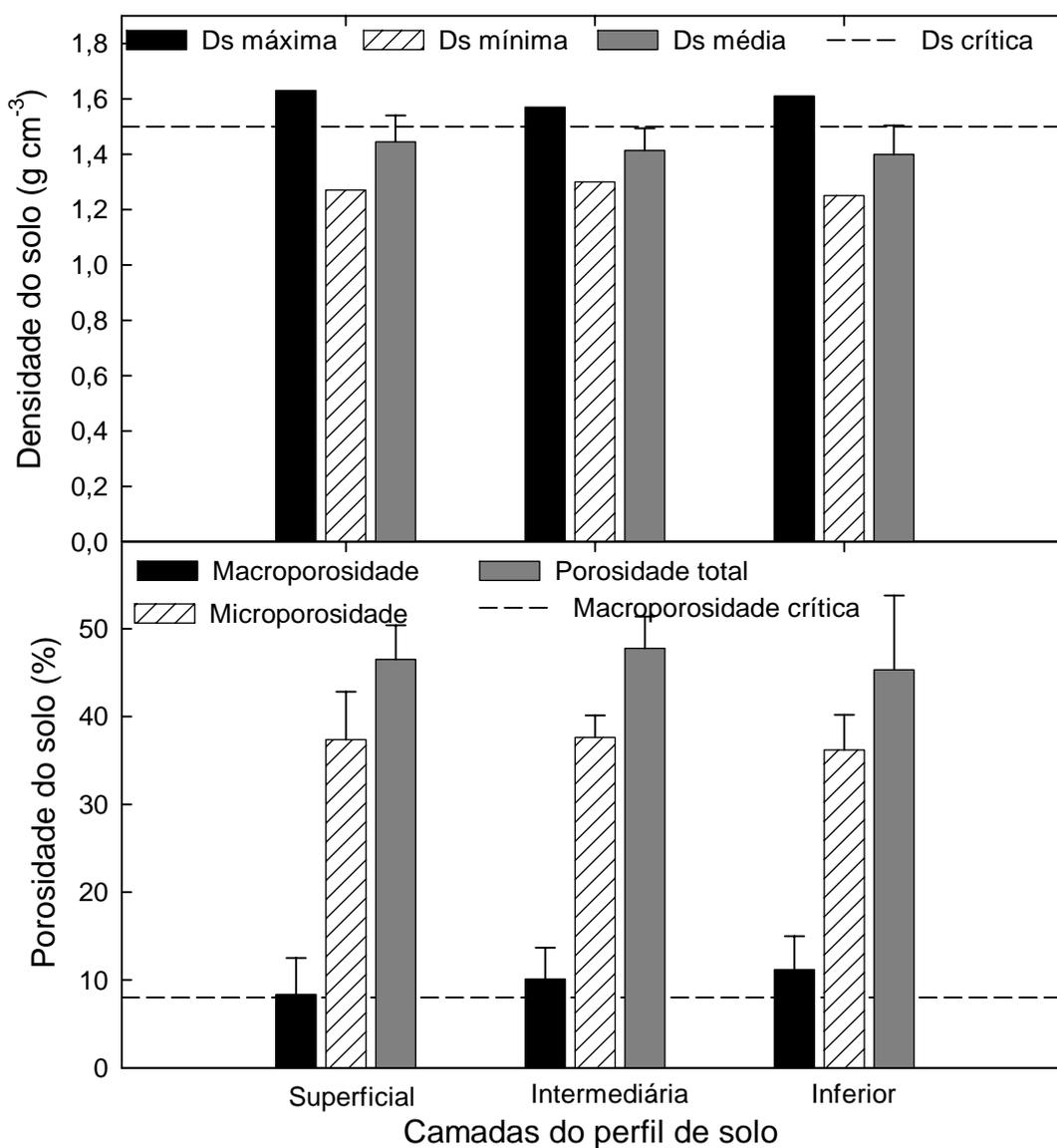


Figura 8. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

Entretanto, os valores máximos de densidade das amostras coletadas foram superiores ao valor crítico, para as três camadas do perfil do solo, indicando que nessa faixa de argila existem áreas com indicação de compactação, em função da densidade do solo, inclusive nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo.

Na camada superficial, a macroporosidade observada foi semelhante ao limite estabelecido como crítico para essa faixa de argila, indicando a necessidade de atenção especial ao manejo realizado nessas áreas para evitar que o volume de macroporos diminua e se torne limitante ao desenvolvimento das plantas. As demais camadas dos perfis dos solos não apresentaram problemas em relação a macroporosidade do solo.

A densidade do solo máxima observada nas amostras de solo coletadas pertencentes a faixa de argila de 40-50% foi superior à crítica nas três camadas do perfil do solo (Figura 9). Isso representa que existem áreas com densidade do solo limitante na camada superficial e em profundidade no perfil do solo.

Na camada superficial do solo observou-se macroporosidade inferior àquela estabelecida como crítica, para essa faixa de argila, indicando que essas áreas apresentam-se com indicativo de compactação em relação a macroporosidade do solo. As demais camadas do perfil de solo não apresentam restrições com relação a macroporosidade.

Na figura 10 observa-se que a média de densidade do solo das amostras de solo classificadas na faixa de 50-60% de argila, na camada superficial, foi superior ao limite estabelecido como crítico para essa faixa. Isso indica que a maioria dessas áreas irrigadas apresentam indicação de compactação em relação à densidade do solo na camada superficial. A densidade máxima observada em algumas amostras coletadas foi superior à crítica estabelecida em todas as camadas do perfil do solo, indicando que as camadas intermediária e inferior dessas áreas irrigadas também apresentam-se com densidade do solo limitante.

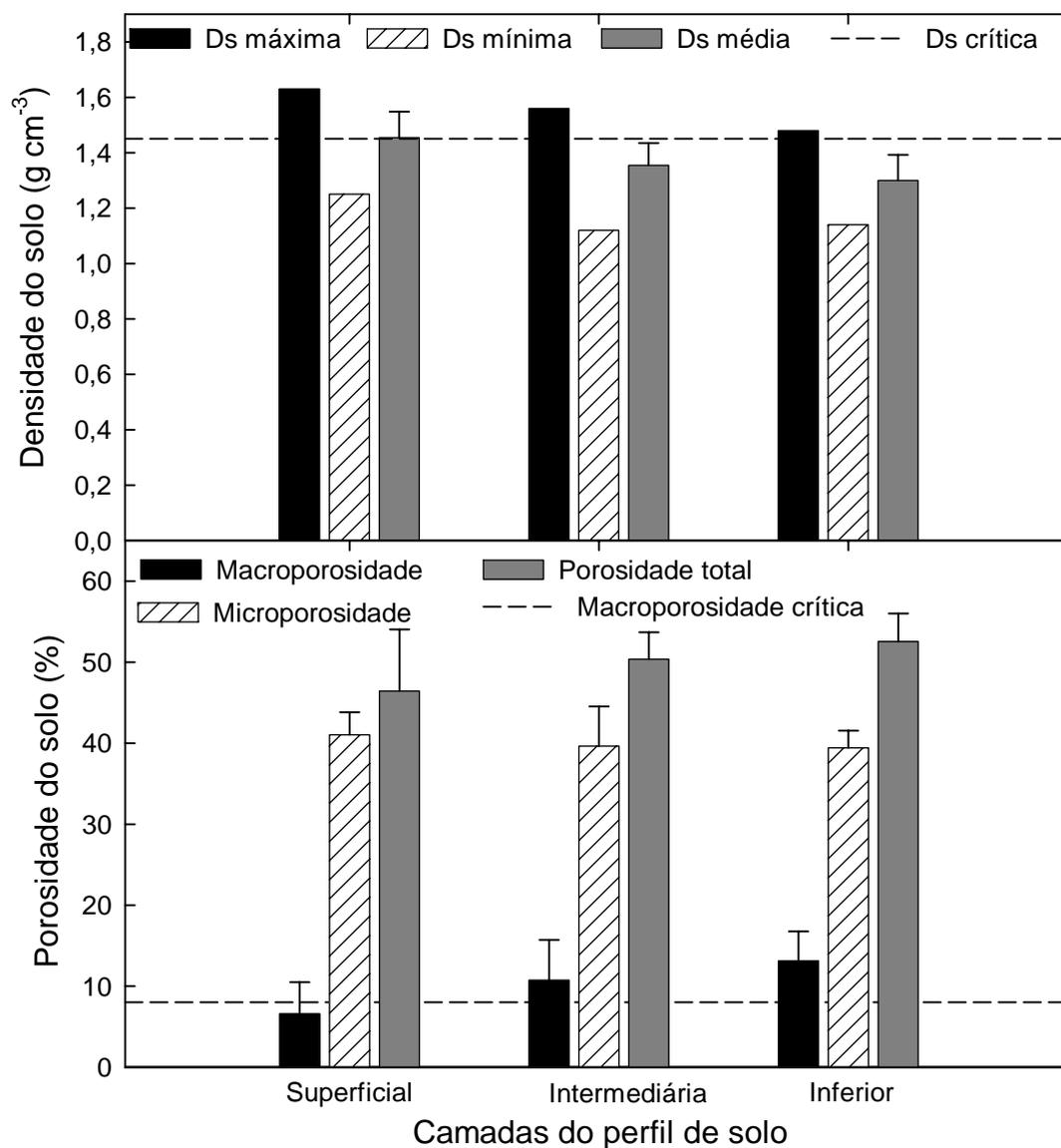


Figura 9. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

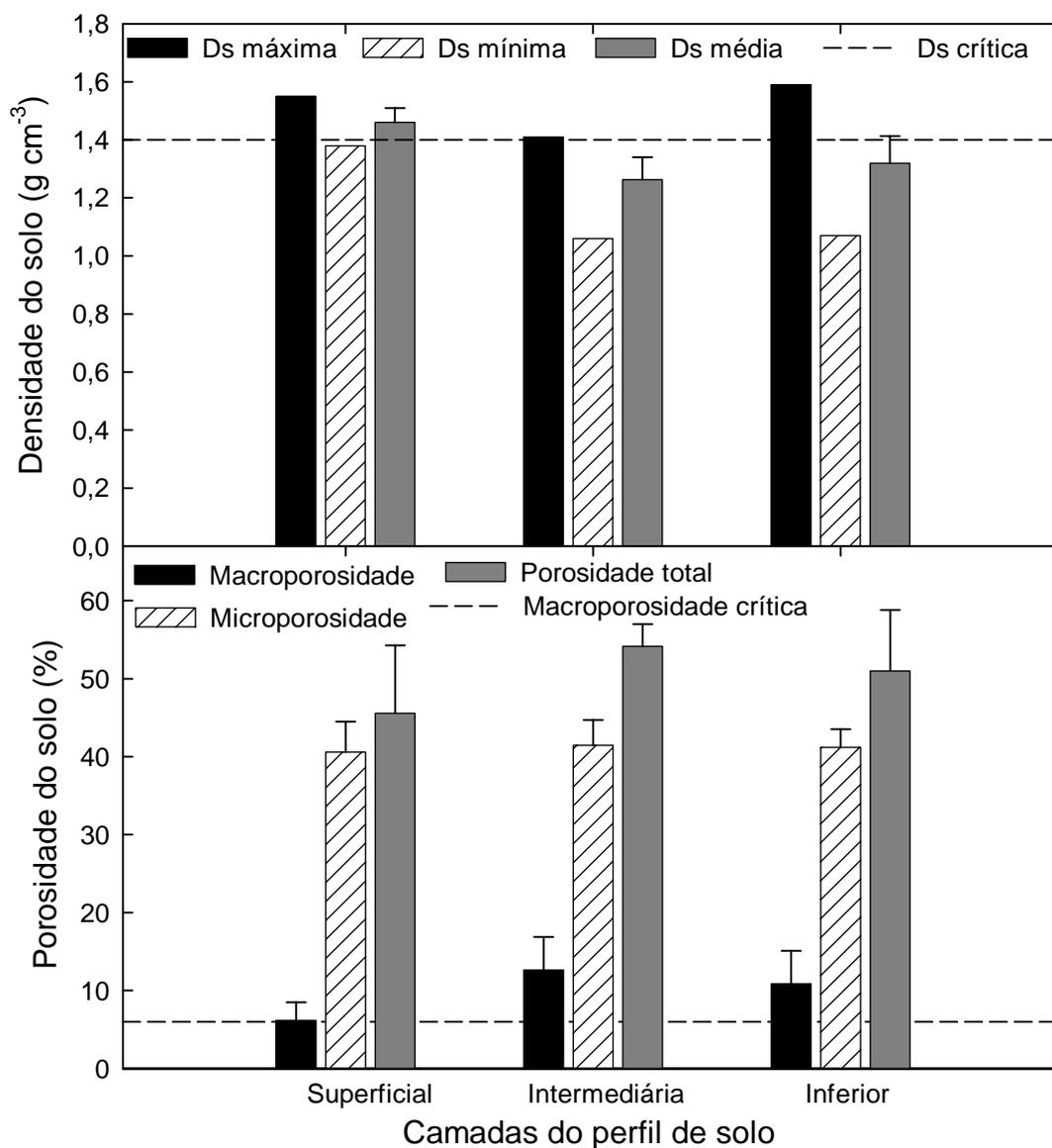


Figura 10. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

A macroporosidade observada na camada superficial foi semelhante ao limite crítico estabelecido, podendo, dependendo do manejo dessas áreas, se tornar limitante. Nas demais camadas dos perfis

dos solos observou-se que a macroporosidade das amostras de solo estava acima do limite crítico, não havendo problemas em relação a macroporosidade do solo nas camadas intermediária e inferior.

Na faixa de 60-70% de argila (Figura 11), a média de densidade do solo das amostras coletadas na camada superficial foi superior àquela estabelecida como crítica. Isso indica que as áreas irrigadas amostradas, pertencentes a essa faixa de argila, encontram-se com indicação de compactação em função da densidade do solo na camada superficial.

A densidade do solo máxima observada nas amostras coletadas pertencentes a essa faixa de argila, foi superior à crítica nas três camadas do perfil do solo, indicando que existem áreas com indicação de compactação em relação à densidade do solo, na superfície e nas demais camadas dos perfis dos solos.

Nas três camadas do perfil do solo a macroporosidade das amostras coletadas foi superior ao limite estabelecido como crítico para a faixa de 60-70% de argila (Figura 11).

Na figura 12 observa-se que a densidade máxima das amostras de solo coletadas, classificadas na faixa de argila superior a 70%, foi superior à crítica nas três camadas dos perfis dos solos, indicando que existem áreas com densidade limitante nas três camadas do perfil do solo.

Na camada superficial, a densidade média dos solos foi superior àquela estabelecida como crítica para essa faixa. Isso representa que as áreas irrigadas pertencentes a essa faixa de argila apresentam-se com indicação de compactação em função da densidade do solo.

A macroporosidade das amostras de solo irrigado coletadas no Estado do RS, pertencentes a faixa de argila superior a 70% (Figura 12), foi superior à crítica nas três camadas do perfil do solo, indicando que não existem restrições em relação a macroporosidade.

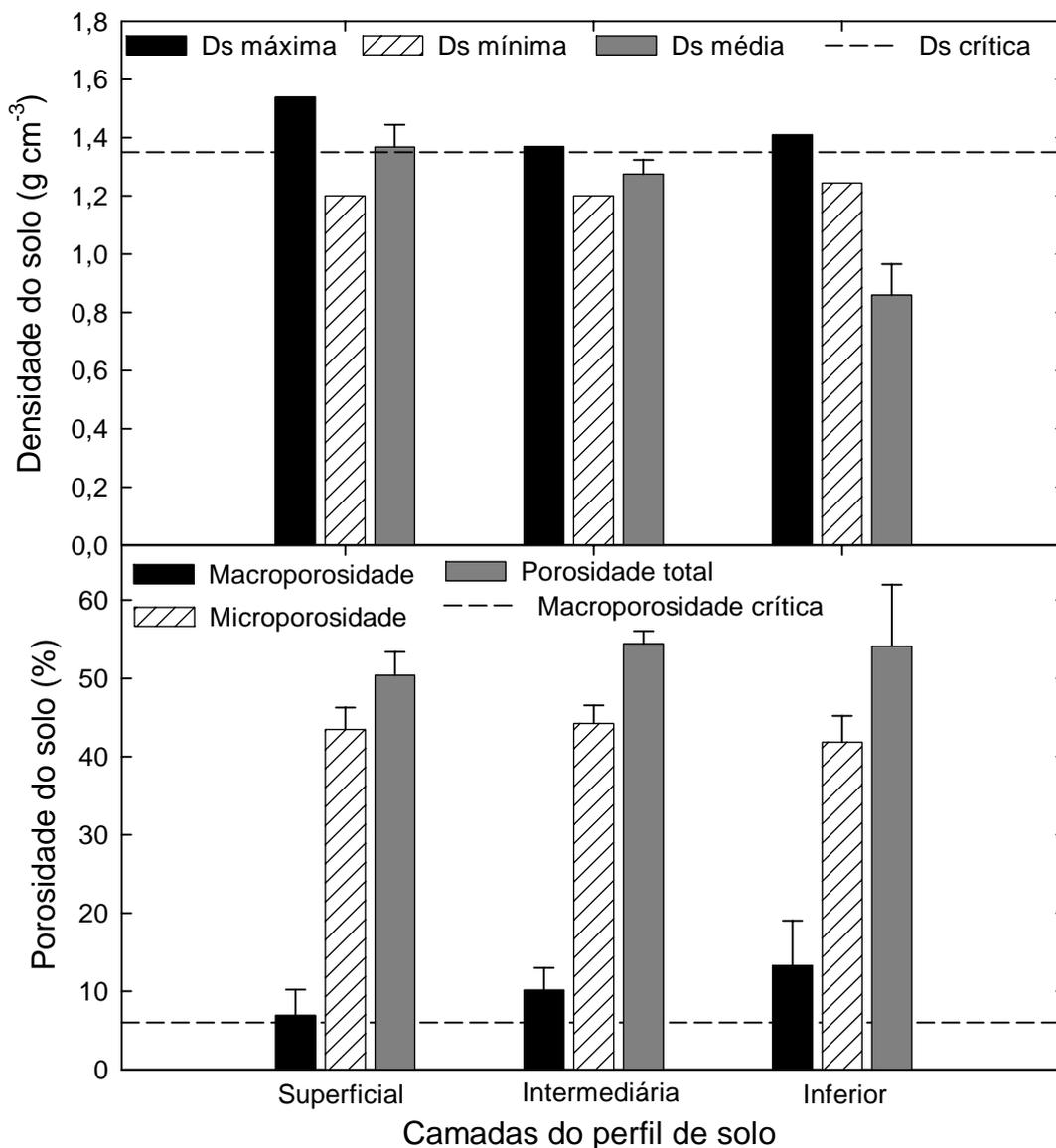


Figura 11. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de 60-70% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

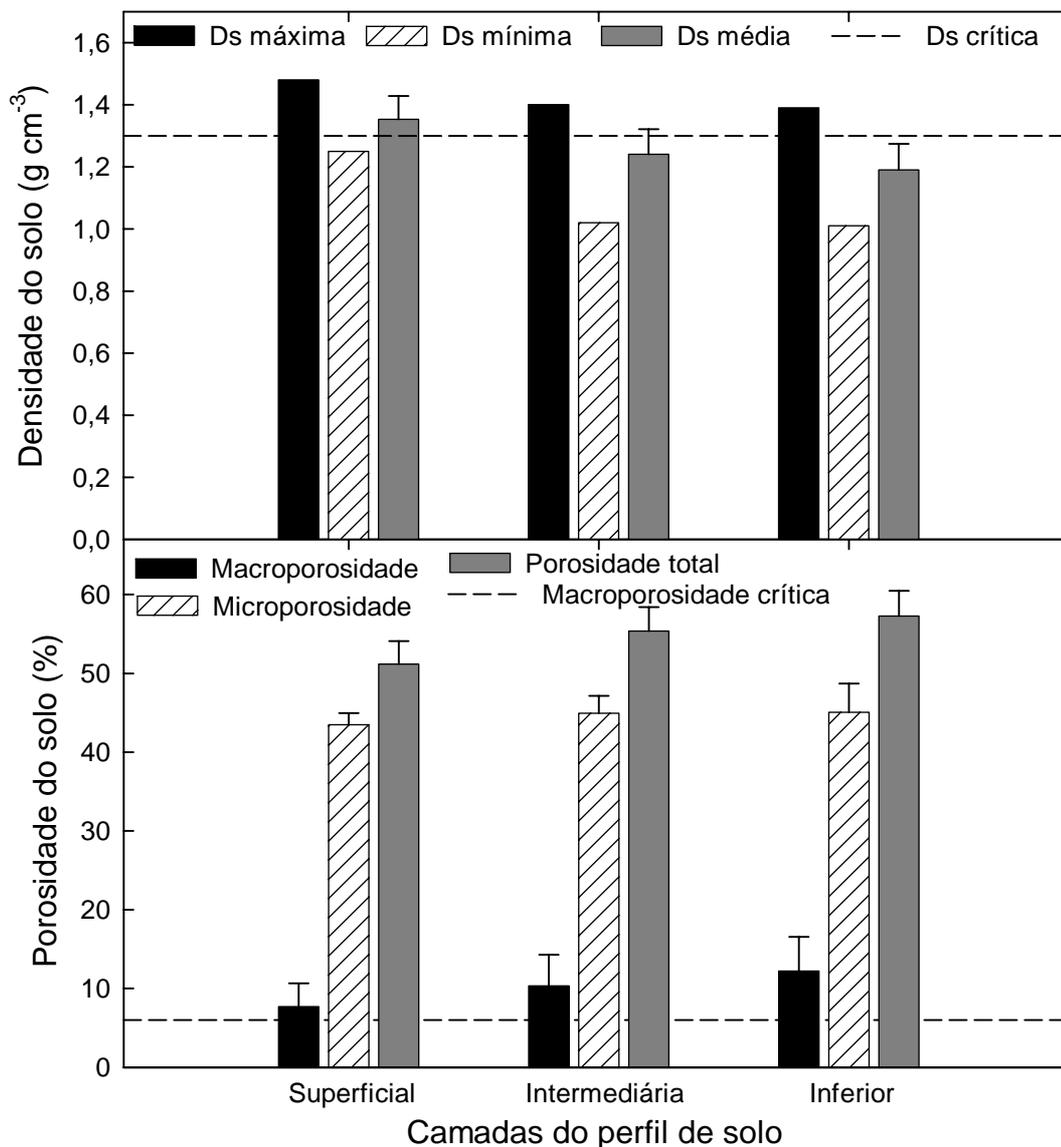


Figura 12. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS, pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

4.2.1. Níveis de compactação dos solos do RS em função da densidade do solo e macroporosidade em cada faixa de argila

Na tabela 4 são apresentados os resultados do teste do qui-quadrado para os níveis de compactação do solo em função da densidade do solo e da macroporosidade, para às faixas de teor de argila em cada camada do perfil do solo.

Tabela 4. Estimativas do teste do qui-quadrado (X_c), grau de liberdade (GL) e nível mínimo de significância (NMS), observados nos testes de hipóteses da independência entre a indicação de compactação em função da densidade de solo e macroporosidade e as faixas de teor de argila, em cada camada do perfil do solo para os solos do RS. Santa Maria – RS, 2005.

Camada do perfil de solo	X_c	GL	NMS
Superficial	63,168	18	0,000*
Intermediária	27,930	18	0,063*
Inferior	28,159	15	0,021*

*: significativo em nível de probabilidade de 0,1; ns: não significativo em nível de probabilidade de 0,1

A indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e da macroporosidade foi dependente das faixas de teor de argila para as três camadas do perfil dos solos irrigados amostrados no Estado do RS.

A freqüência da indicação da compactação dos solos amostrados no RS, em função da densidade de solo e da macroporosidade, para cada faixa de teor de argila, na camada superficial do perfil dos solos amostrados, é apresentada na tabela 5.

Na faixa de 50-60% de argila foi observado a maior freqüência de amostras com indicação de compactação em função da densidade do solo (C-D) (38,2% do total das amostras coletadas), representando uma área de 451,1 ha.

Observou-se na faixa de 40-50% de argila a maior freqüência de amostras com indicação de compactação em função da macroporosidade (C-M), (40,9% do total das amostras coletadas), representando uma área de 312,3 ha.

Tabela 5. Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no Rio Grande do Sul, em cada faixa de teor de argila, na camada superficial. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de Argila(%)	Níveis de Compactação				Total
	NC	C-D	C-M	C-DM	
0-20	4 (1)	1	0	0	5
	0,021 (2)	0,005	-	-	0,026
	0,800 (3)	0,200	-	-	
	0,063 (4)	0,029	-	-	
	3,225 (5)	0,014	0,576	0,859	
20-30	3	0	2	6	11
	0,016	-	0,010	0,031	0,058
	0,273	-	0,182	0,545	
	0,047	-	0,091	0,085	
	0,128	1,958	0,424	0,893	
30-40	19	3	8	7	37
	0,099	0,016	0,042	0,037	0,194
	0,514	0,081	0,216	0,189	
	0,297	0,088	0,364	0,099	
	3,516	1,953	3,279	3,317	
40-50	14	1	9	28	52
	0,073	0,005	0,047	0,147	0,272
	0,269	0,019	0,173	0,538	
	0,219	0,029	0,409	0,394	
	0,673	7,365	1,513	3,889	
50-60	3	13	1	9	26
	0,016	0,068	0,005	0,047	0,136
	0,115	0,500	0,038	0,346	
	0,047	0,382	0,045	0,127	
	3,745	15,143	1,329	0,046	
60-70	15	9	2	15	41
	0,079	0,047	0,010	0,079	0,215
	0,366	0,220	0,049	0,366	
	0,234	0,265	0,091	0,211	
	0,116	0,397	1,570	0,004	
>70	6	7	0	6	19
	0,031	0,037	-	0,031	0,099
	0,316	0,368	-	0,316	
	0,094	0,206	-	0,085	
	0,021	3,870	2,188	0,160	
Total	64	34	22	71	191
	0,335	0,178	0,115	0,372	1

Onde: (1) = frequência de amostras em cada nível de compactação; (2) = % do total amostrado; (3) = % da linha; (4) = % da coluna; (5) = qui-quadrado.

O maior número de amostras com indicação de compactação em função da densidade do solo e macroporosidade (C-DM) também foi observado na faixa de 40-50% de argila. Essa faixa de teor de argila apresentou 39,4% do total das amostras desse nível, representando uma área de 971,6 ha.

As amostras de solos de áreas irrigadas coletadas no Estado do RS apresentaram, na camada superficial 2.463,7ha (71 amostras) com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e macroporosidade (37,2% do total amostrado). Enquanto que a área sem indicação de compactação do solo foi de 2.220,8 ha (64 amostras) (33,5% do total de amostras de áreas irrigadas). Isso indica que a maioria dos solos irrigados amostrados no Estado do RS apresenta-se em situação crítica de densidade do solo e macroporosidade na camada superficial do perfil do solo.

Analisando-se os três níveis de compactação conjuntamente, observa-se que 66,5 % das amostras (4.407,4 ha) coletadas na camada superficial no Estado do RS, apresentaram-se com indicação de compactação. Apenas 33,5% das áreas amostradas (2.220,3 ha) não apresentaram indicativo de compactação do solo (a partir dos valores de densidade do solo e macroporosidade na camada superficial).

O sistema de cultivo plantio direto mal conduzido pode ser um dos fatores responsáveis pela compactação superficial dos solos. De acordo com Watanabe et al (2000), no sistema plantio direto a ausência de revolvimento do solo aliada ao tráfego intenso de máquinas e equipamentos promove a compactação superficial e modificações na distribuição dos tamanhos de poros do solo.

Na camada intermediária do perfil do solo (Tabela 6) a maior frequência de indicação de compactação do solo em função da macroporosidade do solo foi observada para as amostras da faixa de 40-50% de argila (61,1% do total de amostras coletadas pertencentes a esse nível de compactação), representando uma área de 381,7 ha. As faixas de 50-60% de argila e superior a 70% foram as que apresentaram maior número de amostras com indicação de compactação em função da densidade do solo (33,30% do total das amostras pertencentes a esse nível), representando uma área de 104,1ha com indicação de compactação do solo, para cada faixa de teor de argila.

Tabela 6. Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no RS, para cada faixa de teor de argila, na camada intermediária do perfil do solo. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de argila(%)	Níveis de Compactação				Total
	NC	C-D	C-M	C-DM	
0-20	5 (1)	0	0	0	5
	0,026 (2)	-	-	-	0,026
	1,000 (3)	-	-	-	
	0,033 (4)	-	-	-	
	0,265 (5)	0,237	0,474	0,316	
20-30	8	0	1	0	9
	0,042	-	0,005	-	0,047
	0,089	-	0,111	-	
	0,053	-	0,056	-	
30-40	0,100	0,426	0,025	0,568	
	15	1	2	3	21
	0,079	0,005	0,011	0,016	0,111
	0,714	0,048	0,095	0,143	
	0,099	0,111	0,111	0,250	
40-50	0,171	0,000	0,000	2,112	
	30	0	11	3	44
	0,158	-	0,058	0,016	0,232
	0,682	-	0,250	0,068	
	0,199	-	0,611	0,250	
50-60	0,706	2,084	11,196	0,018	
	31	3	1	3	38
	0,163	0,016	0,005	0,016	0,200
	0,816	0,079	0,026	0,079	
	0,205	0,333	0,056	0,250	
60-70	0,021	0,800	1,878	0,150	
	33	2	2	0	37
	0,174	0,011	0,011	-	0,195
	0,892	0,054	0,054	-	
	0,219	0,222	0,111	-	
>70	0,439	0,035	0,646	2,337	
	29	3	1	3	36
	0,153	0,016	0,005	0,016	0,189
	0,806	0,083	0,028	0,083	
	0,192	0,333	0,056	0,250	
Total	0,005	0,983	1,704	0,232	
	151	9	18	12	190
	0,795	0,047	0,095	0,063	1

Onde: (1) = frequência de amostras em cada nível de compactação; (2) = % do total amostrado; (3) = % da linha; (4) = % da coluna; (5) = qui-quadrado.

A maior frequência de amostras com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e macroporosidade foi observada nas faixas de 30-40, 40-50, 50-60 e superior a 70% de argila (25% do total das amostras pertencentes a esse nível), representando uma área de

104,1 ha com indicação de compactação em cada faixa de argila de teor de argila citadas acima.

Na camada intermediária do perfil do solo, observou-se que 79,5% das amostras de solo coletadas não apresentaram indicativo de compactação do solo.

Na camada inferior (tabela 7), observa-se que a faixa de argila superior a 70%, apresentou a maior frequência de amostras com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo, (37,5% do total das amostras coletadas pertencentes a esse nível de compactação), representando uma área de 104,1 ha.

Nas amostras de solo classificadas na faixa de 60-70 e superior a 70% de argila, foi observado o maior número de amostras com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e macroporosidade, (28,6% do total de amostras pertencentes a esse nível, representando uma área de 69,4 ha em cada faixa de argila.

A maior frequência de amostras de solo com indicação de compactação do solo em função da macroporosidade foi observada na faixa de 30-40% de argila, (66,7% do total de amostras desse nível), representando uma área de 69,4 ha.

Na camada inferior 90,52% das amostras coletadas não apresentaram indicação de compactação do solo, representando uma área de 5.998,1 ha.

Tabela 7. Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados no RS, em cada faixa de teor de argila, na camada inferior. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de argila(%)	Níveis de Compactação				Total
	NC	C-D	C-M	C-DM	
0-20	-	-	-	-	-
20-30	6 (1)	1	0	0	7
	0,032 (2)	0,005	-	-	0,037
	0,857 (3)	0,143	-	-	
	0,035 (4)	0,125	-	-	
	0,018(5)	1,688	0,111	0,258	
30-40	9	2	2	1	14
	0,047	0,011	0,011	0,005	0,074
	0,643	0,143	0,143	0,071	
	0,052	0,250	0,667	0,143	
	1,065	3,375	14,316	0,455	
40-50	22	0	1	1	24
	0,116	-	0,005	0,005	0,126
	0,917	-	0,042	0,042	
	0,128	-	0,333	0,143	
	0,003	1,011	1,018	0,015	
50-60	40	0	0	1	41
	0,211	-	-	0,005	0,216
	0,976	-	-	0,024	
	0,233	-	-	0,143	
	0,224	1,726	0,647	0,173	
60-70	35	2	0	2	39
	0,184	0,011	-	0,011	0,205
	0,897	0,051	-	0,051	
	0,203	0,250	-	0,286	
	0,003	0,078	0,616	0,221	
>70	60	3	0	2	65
	0,316	0,016	-	0,011	0,342
	0,923	0,046	-	0,031	
	0,349	0,375	-	0,286	
	0,023	0,025	1,026	0,065	
Total	172	8	3	7	190
	0,905	0,042	0,016	0,037	1

Onde: (1) = frequência de amostras em cada nível de compactação; (2) = % do total amostrado; (3) = % da linha; (4) = % da coluna; (5) = qui-quadrado; - = nenhuma amostra classificada nessa faixa de teor de argila.

4.3. Caracterização Física dos solos irrigados amostrados no Brasil Central

Na figura 13 são apresentadas as frações texturais médias, nas três camadas do perfil de solo, das áreas amostradas no Brasil Central.

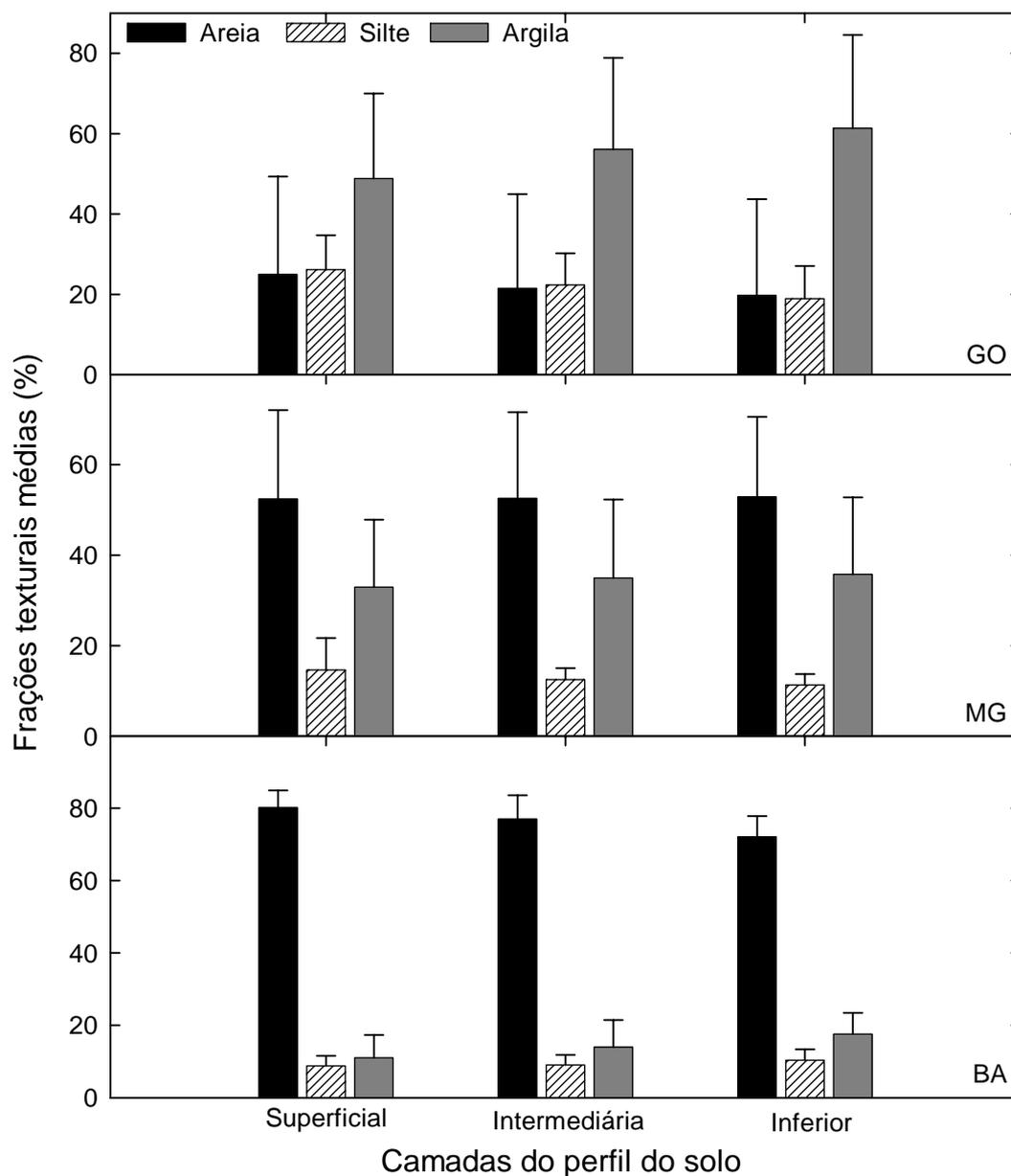


Figura 13. Frações texturais médias, para as camadas superficial, intermediária e inferior, observadas nas amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

As áreas amostradas nos Estados da BA e MG apresentaram solos irrigados com maior percentual de areia, com pequeno incremento no teor de argila com o aumento da profundidade do perfil do solo. Os teores médios de areia, silte e argila, respectivamente, do perfil do solo foram 76,6, 9,3 e 14,1% para o Estado da BA e 52,6%, 12,8 e 34,6% para o Estado de MG.

As áreas amostradas no Estado de GO apresentaram solos irrigados com maior teor de argila, também com incremento no teor de argila com o aumento da profundidade do perfil do solo. Os teores médios de areia, silte e argila no perfil do solo foram 22,0, 22,5 e 55,5%, respectivamente.

A porosidade dos solos do Brasil Central nas três camadas do perfil do solo é apresentada na figura 14. Os solos amostrados da BA e de MG apresentaram porosidade total do solo inferior aos solos de GO. Isso ocorreu porque as áreas amostradas daqueles Estados apresentaram textura mais arenosa (Figura 13) em relação aos solos de GO. Segundo Brady (1983), solos de textura mais grosseira apresentam porosidade total inferior aqueles solos de textura fina.

A macroporosidade dos solos amostrados no Brasil Central, nas três camadas do perfil do solo, foi superior a 10%, limite considerado crítico por vários autores, demonstrando que esses solos não apresentaram indicação de compactação do solo em função da macroporosidade do solo.

A densidade do solo (Figura 15) das amostradas coletadas no Estado de GO, nas camadas superficial, intermediária e inferior foi 1,12, 1,08 e 0,98 g cm⁻³, respectivamente. Esses valores foram inferiores ao valor 1,4 g cm⁻³, indicado como valor crítico para os solos com teor de argila de 50 à 60% (Figura 13).

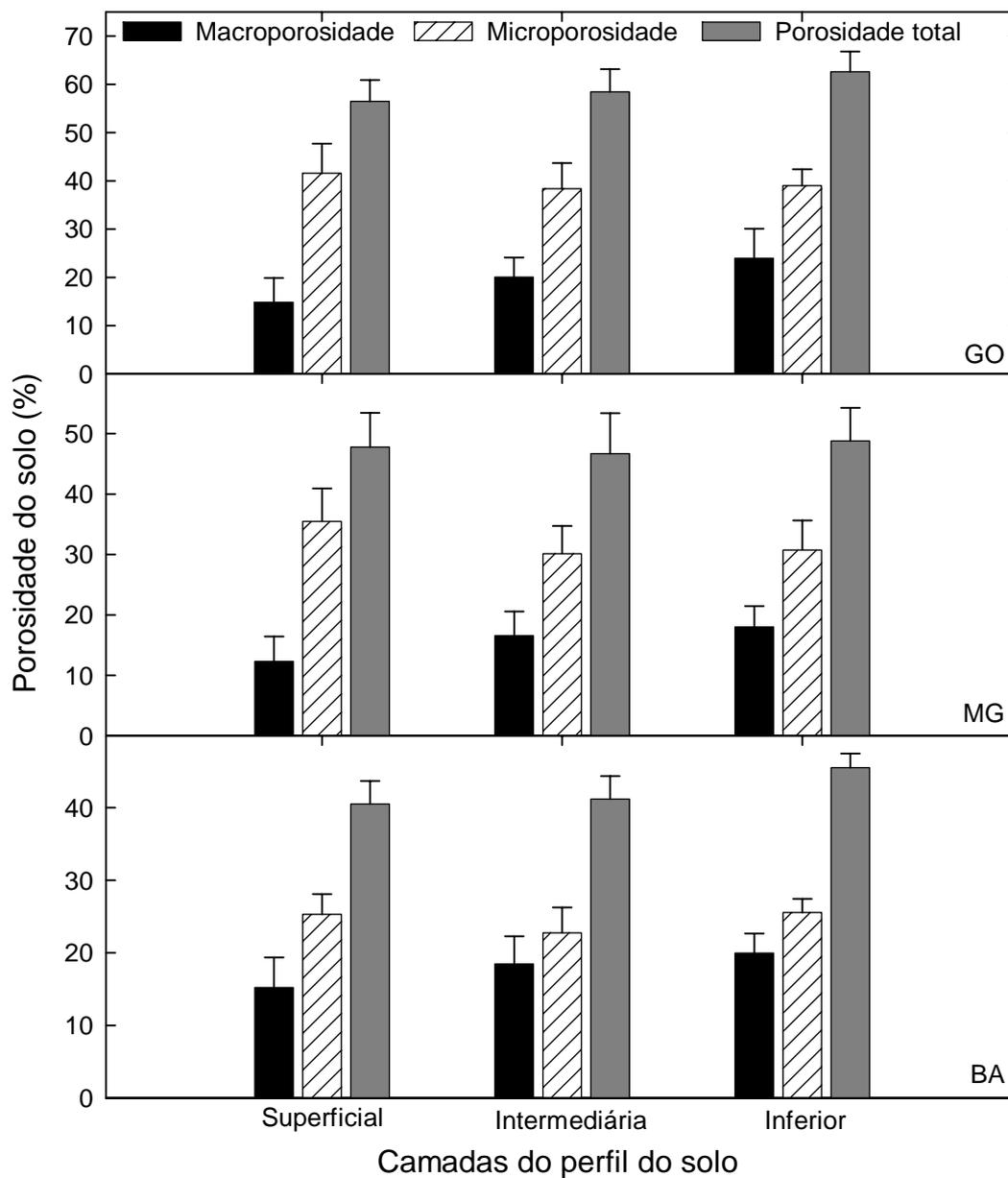


Figura 14. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

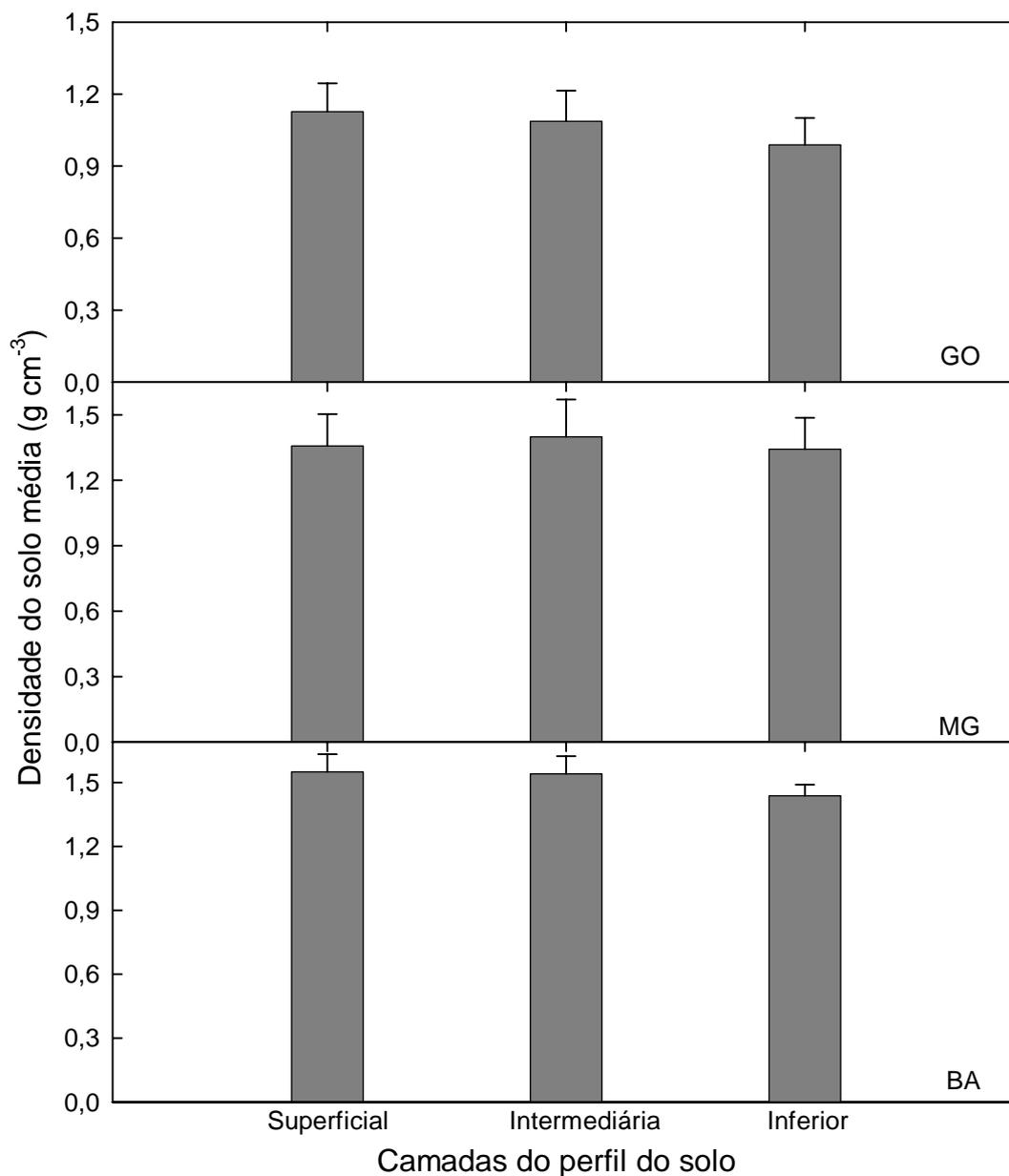


Figura 15. Densidade do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão.

No Estado de MG, a densidade do solo média das amostras coletadas foi 1,34, 1,39 e 1,34 g cm⁻³ para as camadas superficial, intermediária e inferior do perfil dos solos irrigados amostrados,

respectivamente (Figura 15). Esses valores são inferiores ao limite de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, indicado como valor crítico para solos com 30 à 40 % de argila (Fig 13).

A densidade média das amostras coletadas no Estado da BA foi 1,54, 1,54 e $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ para as camadas superficial, intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente. Esses valores são inferiores ao limite de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, estabelecido como crítico para solos com 20 à 30 % de argila (Fig 13).

A situação dos solos do Brasil central em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo, que caracterizam a indicação de compactação do solo, nas três camadas do perfil do solo, é apresentada na figura 16. No Estado de GO observou-se que 15,85% (152,9 ha) das áreas amostradas apresentavam-se com indicação de compactação em função da macroporosidade do solo, na camada superficial, e 2,27% (21,91 ha) na camada inferior. A camada intermediária não apresentou nenhuma amostra de solo com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e macroporosidade (Figura 16).

No Estado de MG 21,67% (192,16 ha) das áreas amostradas, na camada superficial, apresentaram indicação de compactação do solo em função da macroporosidade. Na camada intermediária do perfil do solo, 6,19% (54,9 ha) apresentaram indicação de compactação em relação à densidade do solo. A camada inferior não apresentou nenhuma amostra de solo com indicativo de compactação do solo (Figura 16).

No Estado da BA foram observados para a camada superficial do perfil do solo, 17,74% (360,42 ha) das áreas amostradas com indicativo de compactação em função da densidade do solo, 4,34% (88,37 ha) com indicação de compactação em função da macroporosidade e 6,71% (136,63 ha) com indicação de compactação em função da densidade do solo e macroporosidade do solo (Figura 16).

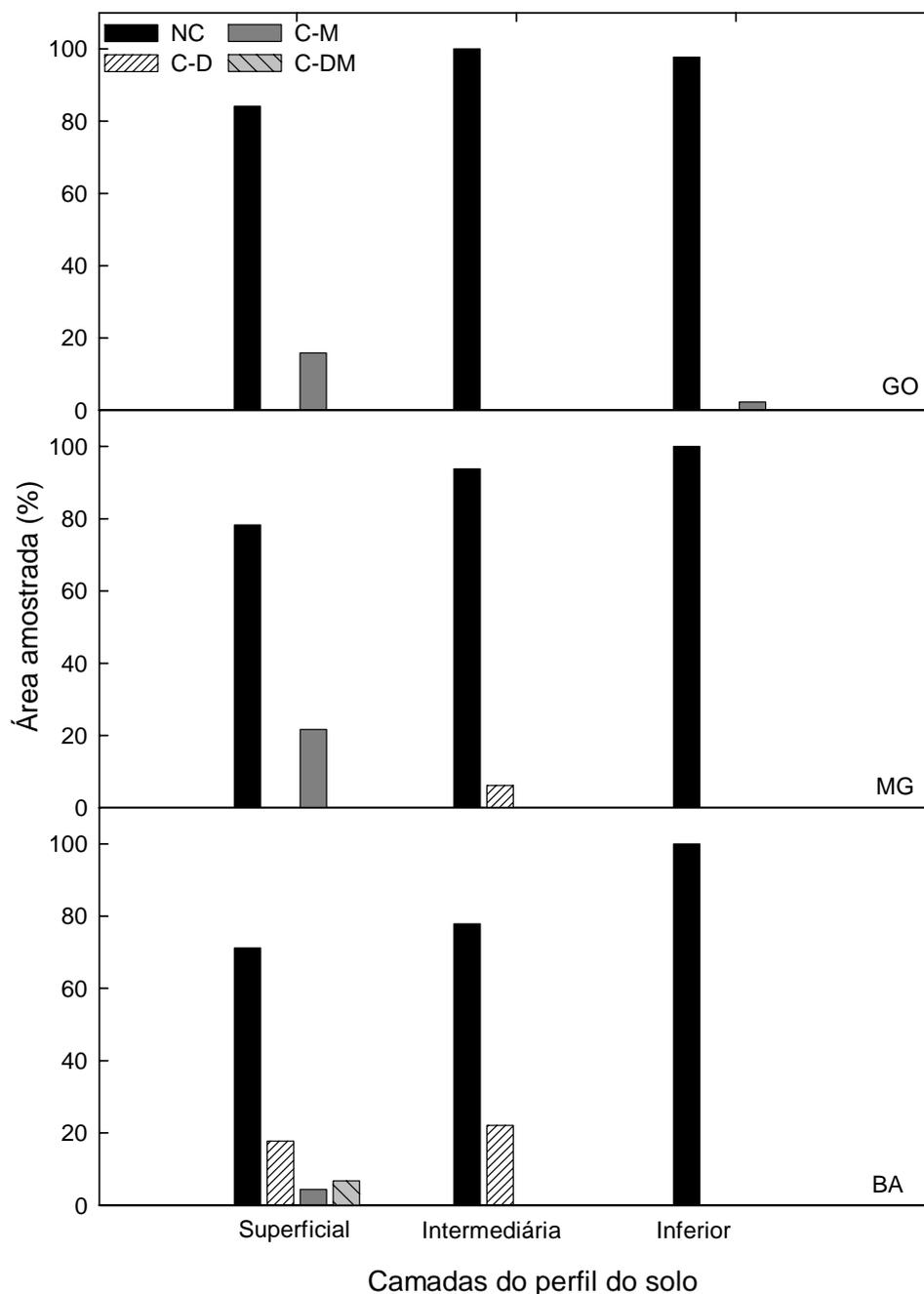


Figura 16. Situação das áreas amostradas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. Santa Maria, RS, 2005. (NC - Não compactado; C-D - compactado em função da densidade do solo; C-M - compactado em função da macroporosidade; C-DM - compactado em função da densidade do solo e macroporosidade).

Na camada intermediária observou-se que 22,11% das amostras coletadas (450 ha) apresentaram indicação de compactação em relação à densidade do solo. Na camada inferior não foi observado nenhuma amostra com indicação de compactação (Figura 16). Maior indicação de compactação do solo foi observada na camada intermediária em relação a camada superficial (maior incidência verificada nas amostras avaliadas no RS) provavelmente em função do sistema de manejo de solo mais utilizado nessas áreas (sistema convencional).

O sistema de cultivo utilizado na maioria das áreas do Brasil central é o preparo convencional. O revolvimento realizado no solo a cada safra desfaz possíveis áreas adensadas na camada superficial do solo, minimizando os efeitos da compactação nessa camada. Porém, áreas adensadas são transferidas para camadas intermediárias do perfil do solo, abaixo da profundidade atingida pelos implementos de preparo do solo, compactando essas camadas. Segundo Wolschick (2000), o contínuo preparo do solo para cultivos anuais provoca a desestruturação da camada superficial, transformando-a em duas fases distintas: a superficial pulverizada e a subsuperficial compactada.

A frequência dos solos amostrados no Brasil central em cada faixa de teor de argila, para as três camadas do perfil dos solos irrigados amostrados é apresentada na tabela 8.

As áreas amostradas no Estado da BA apresentaram baixos teores de argila (Figura 13), sendo somente agrupadas nas faixas de 0-20, 20-30 e 30-40% de teor de argila. A maior frequência das áreas amostradas desse Estado, concentrou-se na faixa de 0-20% de argila. Para o Estado de GO observou-se amostras de solo com maior teor de argila (Figura 13), onde o maior número de amostras coletadas foi classificado na faixa de teor de argila superior a 70%.

No Estado de MG, a maior frequência das amostras coletadas foi observada nas faixas de 30-40 e 40-50% de teor de argila (Tabela 8).

Tabela 8. Freqüência e freqüência relativa das amostras de solo coletadas nos Estados de GO, MG e BA, em cada classe de argila, nas três camadas do perfil de solo. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de Argila (%)	Camadas do perfil do solo					
	Superficial		Intermediária		Inferior	
	Freq.	Freq. Relativa	Freq.	Freq. Relativa	Freq.	Freq. Relativa
Estado de GO						
0-20	0	0,00	0	0,00	0	0,00
20-30	8	26,67	6	21,43	5	20,00
30-40	4	13,33	4	14,29	2	8,00
40-50	4	13,33	0	0,00	0	0,00
50-60	3	10,00	1	3,57	1	4,00
60-70	0	0,00	7	25,00	5	20,00
>70	11	36,67	10	35,71	12	48,00
Estado de MG						
0-20	4	13,79	4	14,29	4	16,67
20-30	12	41,38	7	25,00	0	0,00
30-40	4	13,79	8	28,57	15	62,50
40-50	6	20,69	3	10,71	3	12,50
50-60	3	10,34	4	14,29	0	0,00
60-70	0	0,00	0	0,00	0	0,00
>70	0	0,00	2	7,14	2	8,33
Estado da BA						
0-20	63	87,50	46	79,31	44	83,02
20-30	9	12,50	9	15,52	7	13,21
30-40	0	0,00	3	5,17	2	3,77
40-50	0	0,00	0	0,00	0	0,00
50-60	0	0,00	0	0,00	0	0,00
60-70	0	0,00	0	0,00	0	0,00
>70	0	0,00	0	0,00	0	0,00

As frações texturais médias e a classe textural das amostras de solo coletadas no Brasil central, em cada faixa de argila, para as três camadas do perfil de solo amostrados são apresentadas na tabela 9.

Na figura 17 são apresentados os valores de densidade do solo (máxima, mínima e média) das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central pertencentes a faixa de 0-20% de argila.

Observa-se que as amostras de solos coletadas nos Estados de MG e da BA apresentaram valores máximos de densidade do solo no limite e acima do limite estabelecido como crítico, para essa faixa de argila, nas camadas superficial e intermediária do perfil do solo. Isso significa que existem áreas com indicação de compactação em relação à densidade do solo, nesses Estados, para a faixa de 0-20% de argila.

Tabela 9. Frações texturais médias (%) e classe textural das amostras de solo coletadas nos Estados de GO, MG e BA, para cada faixa de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de Argila (%)	Camadas do perfil do solo											
	Superficial				Intermediária				Inferior			
	Areia	Silte	Argila	Classe	Areia	Silte	Argila	Classe	Areia	Silte	Argila	Classe
Estado de GO												
0-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-30	60,15	16,95	22,90	Franco argilo arenoso	59,95	15,95	24,10	Franco argilo arenoso	59,40	15,20	25,40	Franco argilo arenoso
30-40	37,10	30,70	32,20	Franco argiloso	38,10	29,80	32,10	Franco argiloso	48,60	19,60	31,80	Franco argilo arenoso
40-50	15,35	36,55	48,10	Argila	-	-	-	-	-	-	-	-
50-60	6,50	40,73	52,77	Argilo siltoso	22,70	22,30	55,00	Argila	20,90	19,50	59,60	Argila
60-70	-	-	-	-	7,69	29,65	62,66	Muito argiloso	3,20	33,56	63,24	Muito argiloso
>70	3,52	23,45	73,03	Muito argiloso	2,85	17,46	76,69	Muito argiloso	5,11	14,26	80,63	Muito argiloso
Estado de MG												
0-20	80,6	9,30	10,10	Areia franca	80,73	9,25	10,02	Areia franca	77,90	10,10	12,00	Franco arenoso
20-30	60,60	14,73	24,67	Franco argilo arenoso	59,80	13,19	27,01	Franco argilo arenoso	-	-	-	-
30-40	56,85	10,23	32,92	Franco argilo arenoso	55,49	12,19	32,32	Franco argilo arenoso	54,31	11,31	34b,23	Franco argilo arenoso
40-50	40,37	12,16	47,47	Argila	48,50	10,50	41,00	Argilo arenoso	43,20	11,57	45,23	Argila
50-60	9,30	31,00	59,70	Argila	32,60	14,40	52,90	Argila	-	-	-	-
60-70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>70	-	-	-	-	5,30	16,80	77,90	Muito argiloso	6,40	13,13	80,47	Muito argiloso
Estado da BA												
0-20	81,67	9,38	8,95	Areia franca	79,63	9,65	10,72	Franco arenoso	73,62	10,97	15,41	Franco arenoso
20-30	69,77	4,67	25,56	Franco argilo arenoso	68,33	7,30	24,37	Franco argilo arenoso	66,19	7,43	26,38	Franco argilo arenoso

Continua...

Continuação...

30-40	-	-	-	62,10	5,10	32,80	Franco argilo arenoso	60,00	7,20	32,80	Franco argilo arenoso
40-50	-	-	-	-	-	-		-	-	-	
50-60	-	-	-	-	-	-		-	-	-	
60-70	-	-	-	-	-	-		-	-	-	
>70	-	-	-	-	-	-		-	-	-	

Onde: - significa que não existem amostras pertencentes a essas faixas de teor de argila.

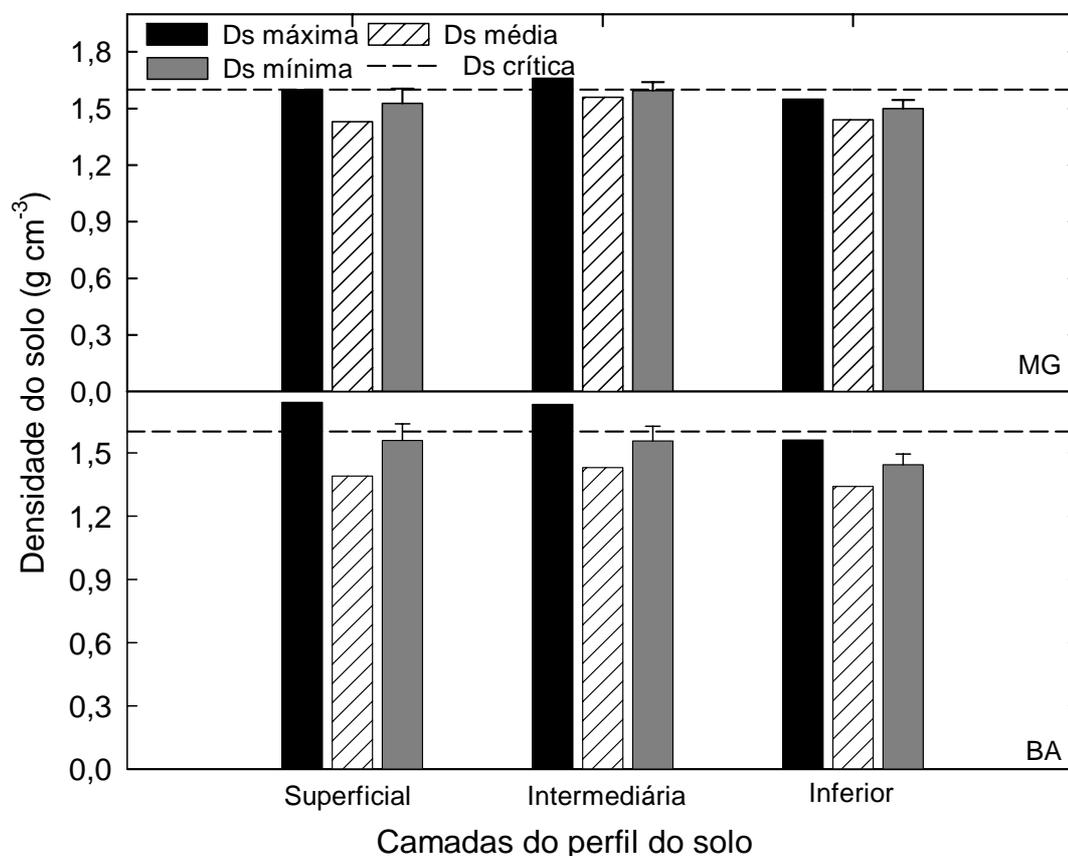


Figura 17. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (D_s).

Os valores da porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) das amostras de solo irrigados coletadas no Brasil central pertencentes a faixa de 0-20% de argila são apresentados na figura 18.

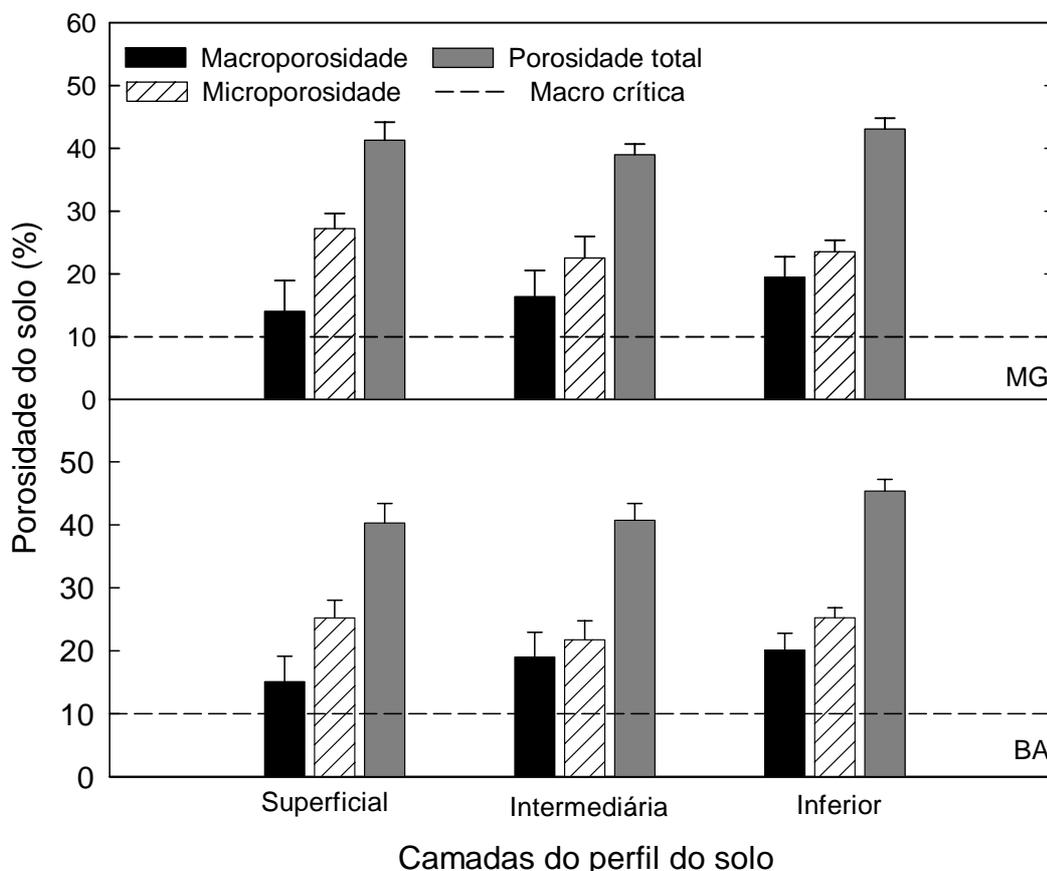


Figura 18. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 0-20% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

Observa-se que os valores da macroporosidade foram superiores ao limite crítico estabelecido para essa faixa de argila, nas três camadas do perfil do solo. Esses resultados indicam que as áreas amostradas não apresentaram indicação de compactação em relação a macroporosidade do solo, nessa faixa de argila.

As amostras de solo coletadas nos Estados de GO e MG não apresentaram áreas com densidade do solo superior ao limite estabelecido como crítico para a faixa de 20-30% de argila (Figura 19).

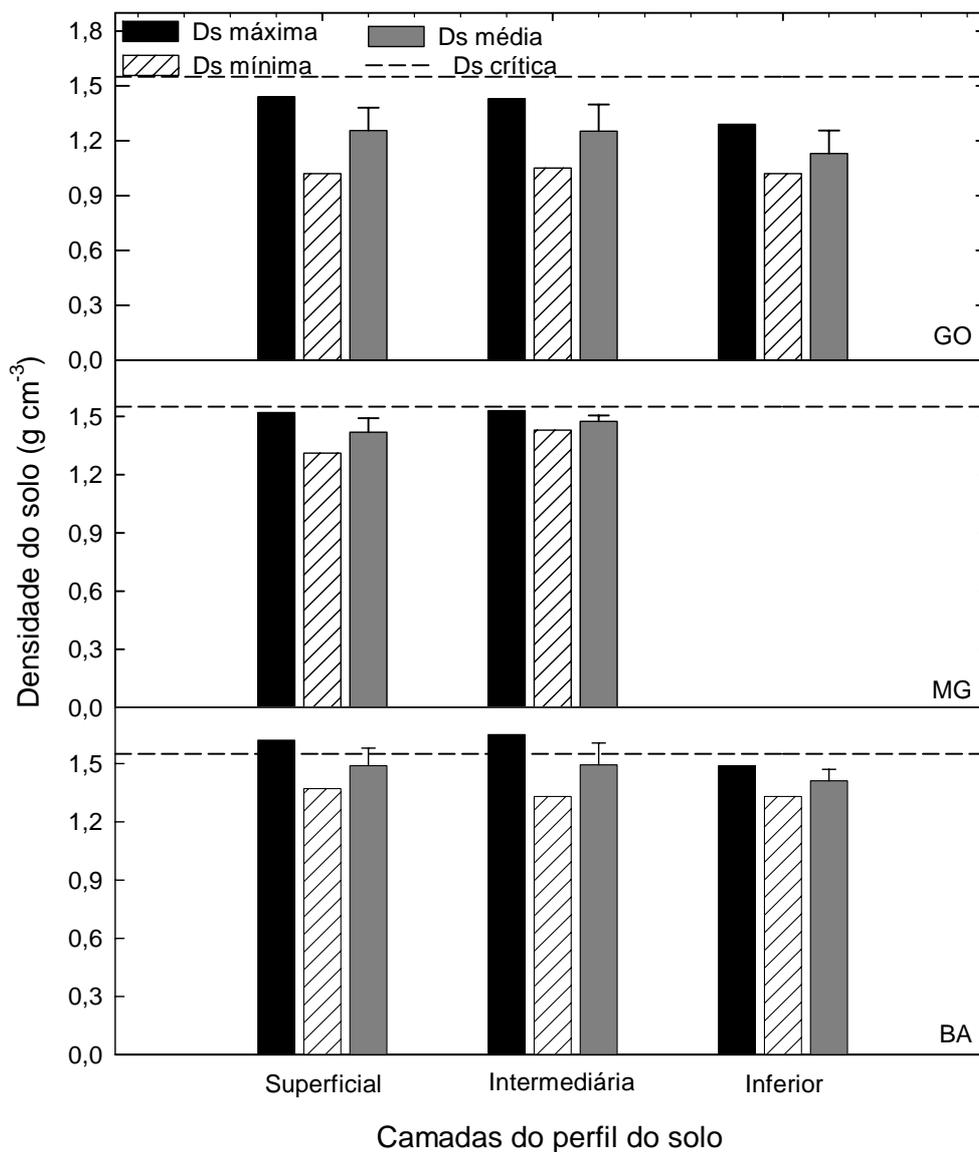


Figura 19. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds).

A densidade máxima observada nas amostras de solo coletadas no Estado da BA, nas camadas superficial e intermediária do perfil do solo, foi superior ao limite crítico estabelecido para essa faixa de argila (Figura 19), indicando que existem áreas com problemas de compactação em função da densidade do solo nessa faixa de teor de argila.

Na figura 20 observa-se que os valores de macroporosidade das amostras de solos irrigados coletadas no Estado de MG, na faixa de 20-30% de argila, na camada superficial do perfil do solo, foram semelhantes ao limite estabelecido como crítico para essa faixa de argila, indicando que essas áreas necessitam atenção especial para evitar que esse valor decresça e se torne limitante ao desenvolvimento das culturas.

As demais áreas amostradas no Brasil central, nessa faixa de teor de argila, apresentaram macroporosidade do solo superior ao limite indicado como crítico (Figura 20).

Observa-se na figura 21, que as amostras de solo coletadas nos Estados de MG e da BA, na camada superficial do perfil do solo, apresentaram densidade do solo superior ao limite crítico estabelecido para essa faixa de argila. Isso representa que existem áreas com indicação de compactação do solo em função da densidade do solo nesses Estados, para a faixa de 30-40% de argila. As demais amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, na faixa de 30-40% de argila, não apresentaram indicação de compactação em função da densidade do solo (Figura 21).

Os valores de macroporosidade das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, classificadas na faixa de 30-40% de argila (Figura 22), foram superiores ao limite estabelecido como crítico para essa faixa de argila, significando que as áreas amostradas pertencentes a essa classe de argila não apresentaram limitações de macroporosidade do solo.

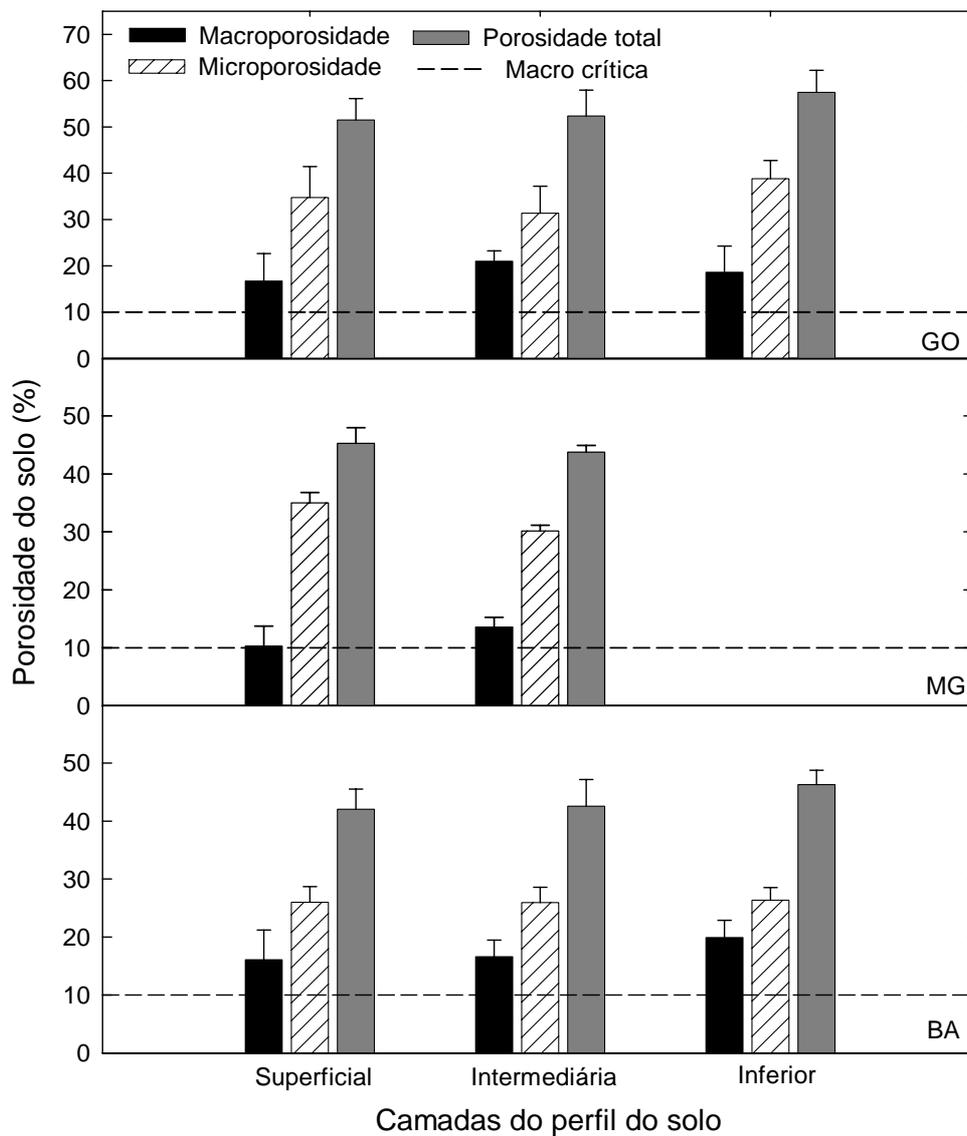


Figura 20. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 20-30% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

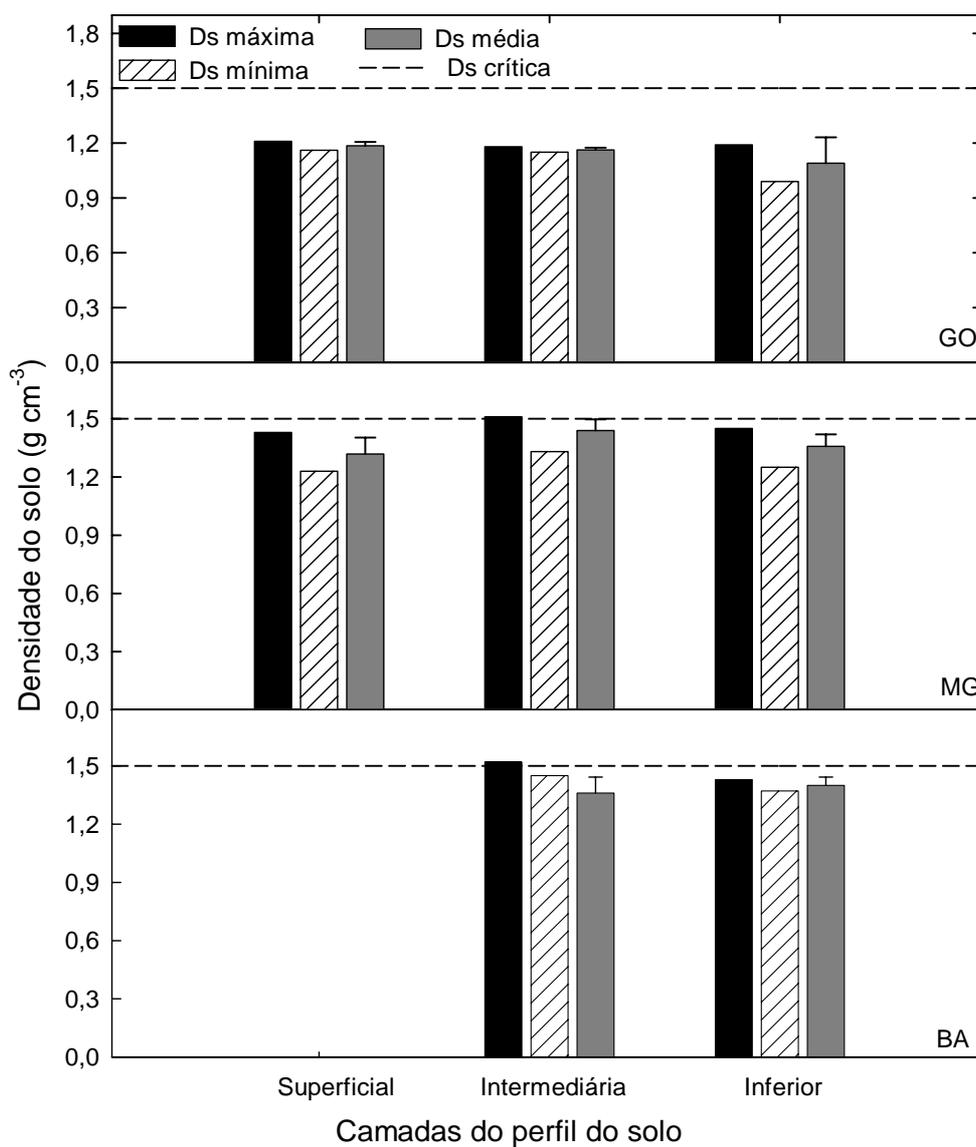


Figura 21. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA) pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds).

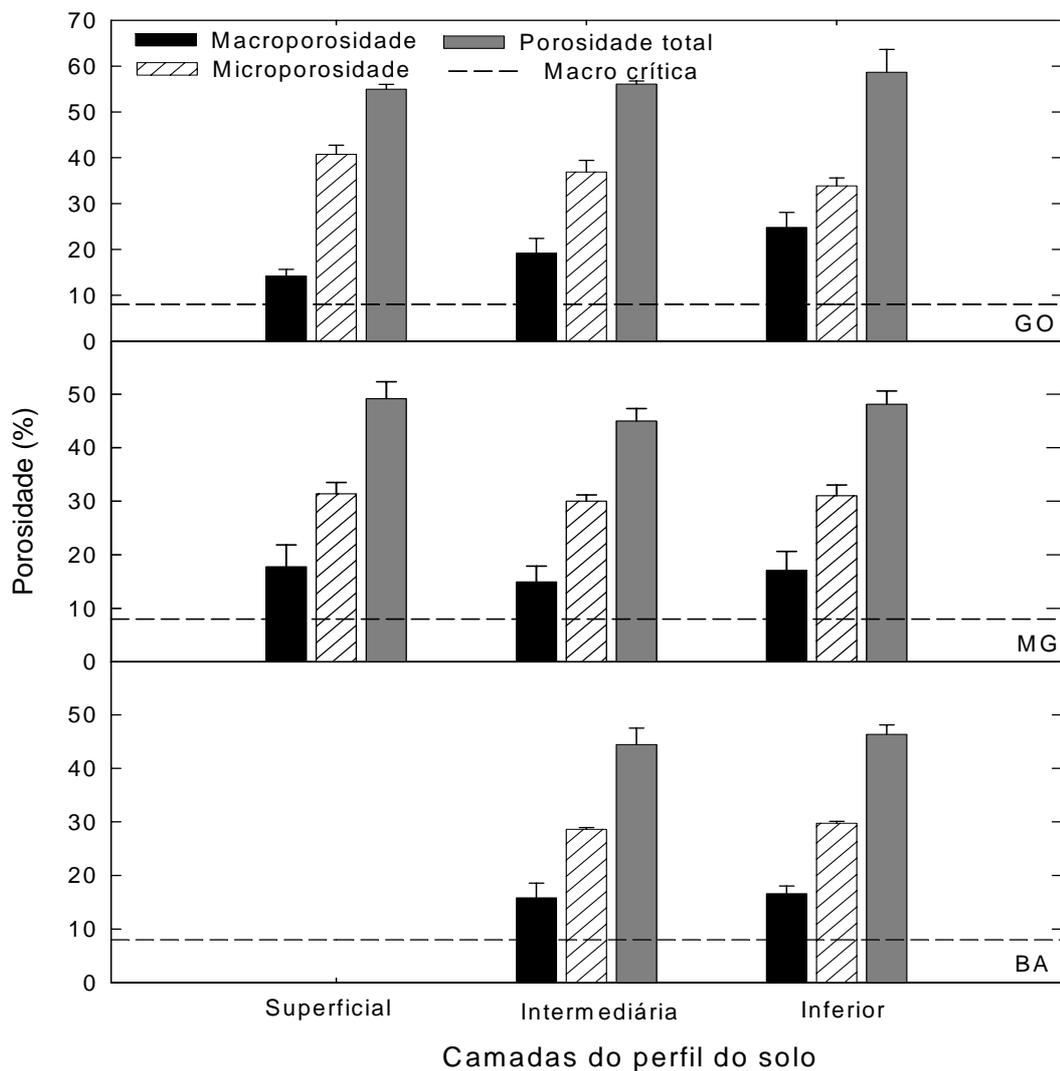


Figura 22. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), pertencentes a faixa de 30-40% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

Na figura 23 observa-se que as amostras de solo de áreas irrigadas coletadas no Brasil central, na faixa de 40-50 % de argila, não apresentaram indicação de compactação do solo em função da densidade do solo.

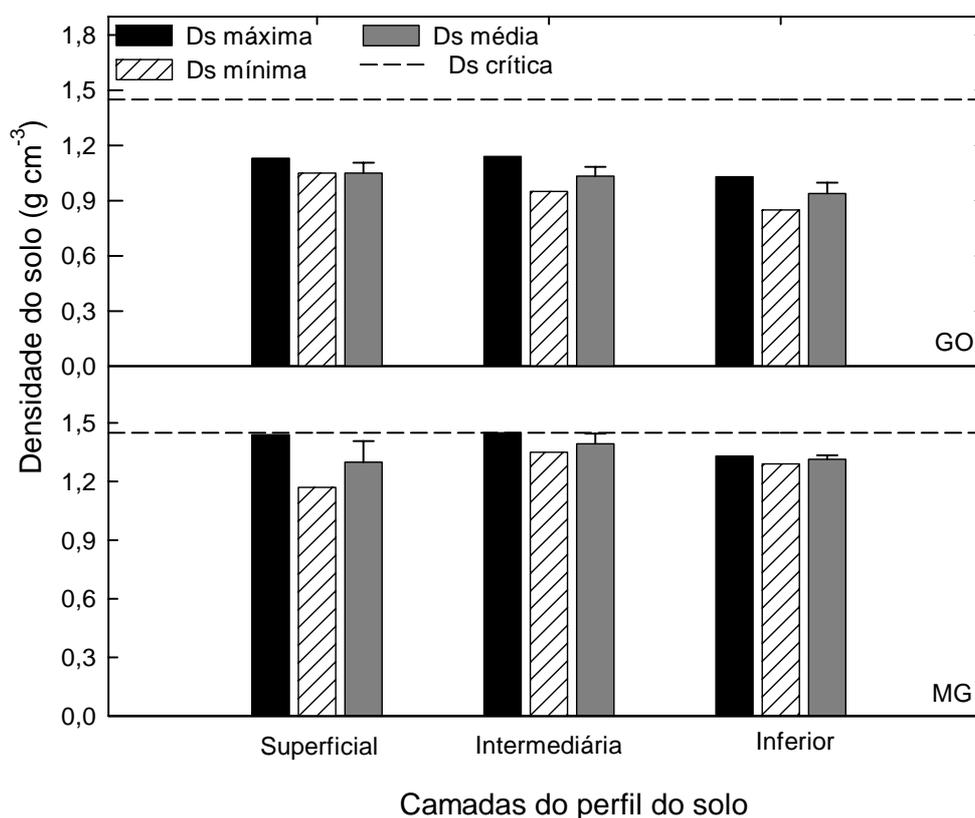


Figura 23. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds).

No entanto, as amostras coletadas no Estado de MG, apresentaram nas camadas superficial e intermediária, valores de densidade semelhantes ao valor estabelecido como crítico para essa faixa de argila, necessitando de manejo adequado para evitar que esses solos se tornem com o tempo com valores densidade limitante.

A macroporosidade observada nas amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, na faixa de 40-50% de argila (Figura 24), foi superior ao limite estabelecido como crítico para essa faixa, indicando não haver restrições de macroporosidade nas áreas amostradas pertencentes a essa faixa de argila.

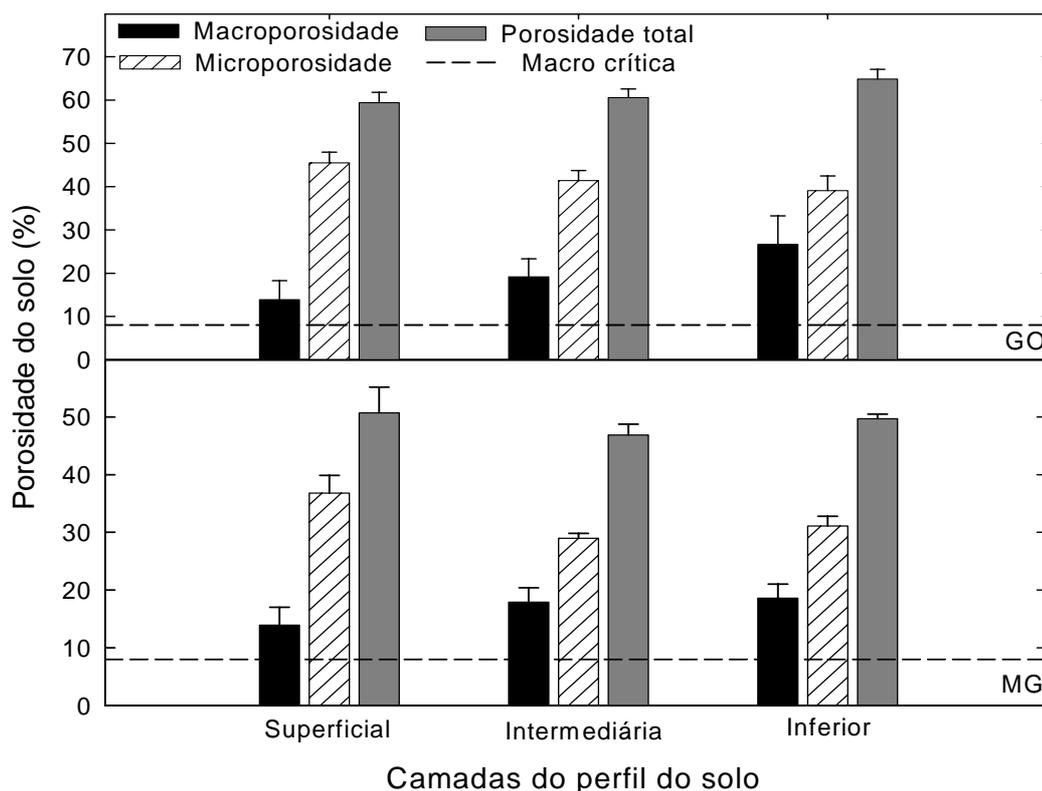


Figura 24. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de 40-50% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

Na figura 25 observa-se que as amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, classificadas na faixa de 50-60% de argila apresentaram valores de densidade do solo inferior a valor estabelecido como crítico para essa faixa de argila, nas três camadas do perfil do solo, indicando não haver restrições de densidade do solo nessas áreas.

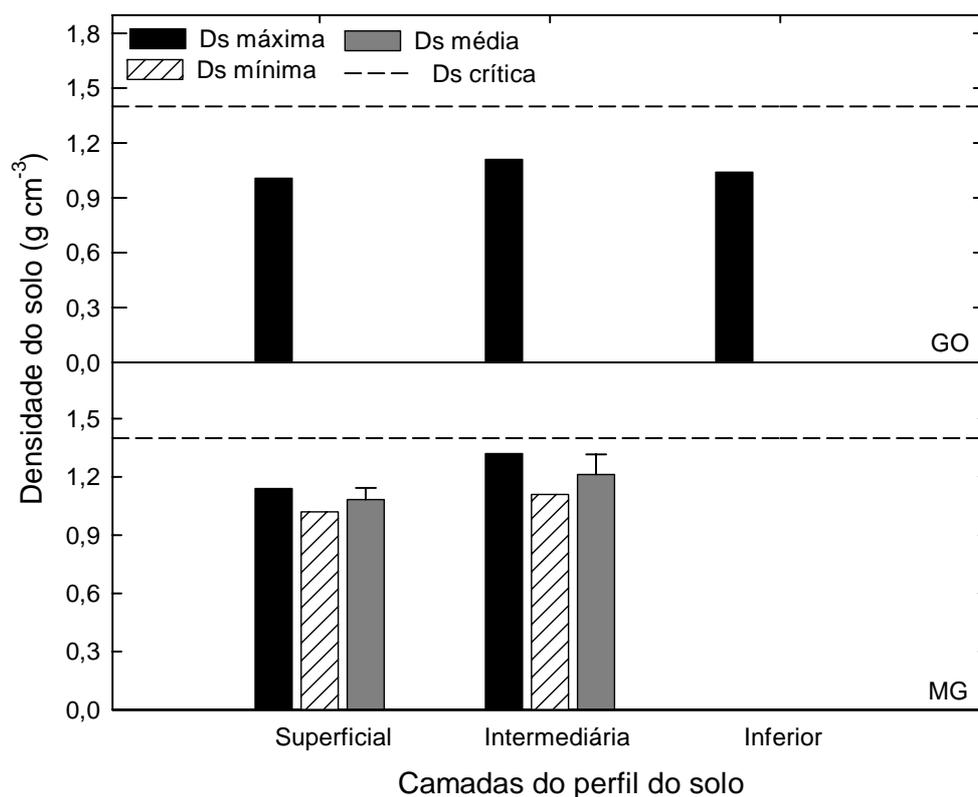


Figura 25. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds).

Observa-se na figura 26 que a macroporosidade das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, na faixa de 50-60% de argila, foi superior ao limite estabelecido como crítico para essa faixa de argila, nas três camadas do perfil do solo, indicando não haver restrições de

macroporosidade nas áreas amostradas pertencentes a essa faixa de argila.

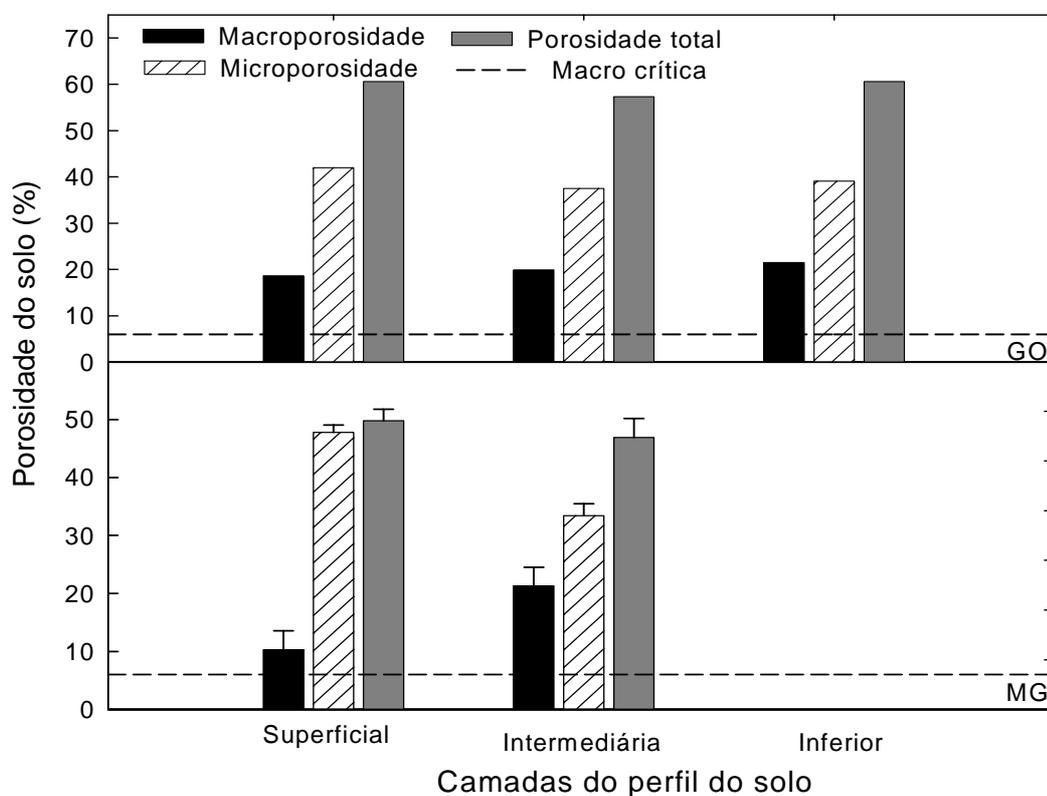


Figura 26. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de 50-60% de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

Os valores de densidade do solo (máxima, mínima e média) e de porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, classificadas na faixa de 60-70% de argila são apresentados na figura 27.

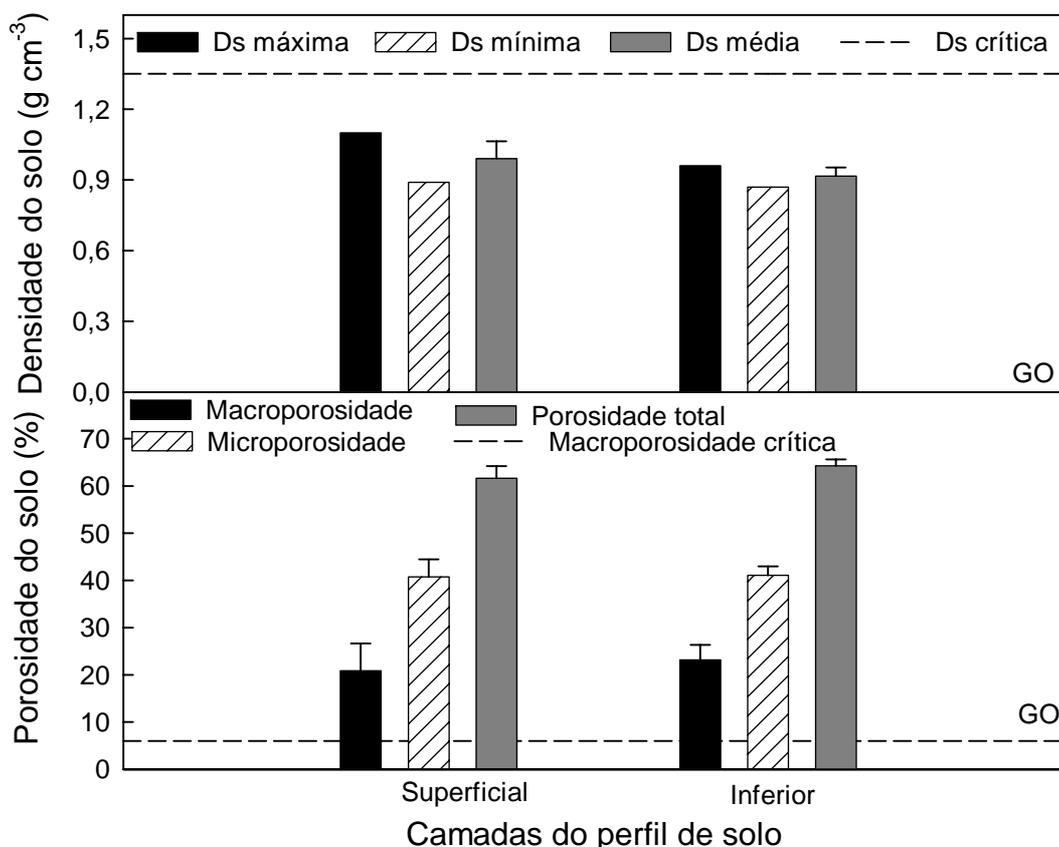


Figura 27. Densidade do solo e porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas do Estado de Goiás (GO), pertencentes a faixa de 60-70% de argila, nas camadas superficial e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds) e macroporosidade do solo.

As amostras de solos coletadas em áreas irrigadas do Brasil central, na faixa de 60-70% de argila, apresentaram valores de densidade do solo inferior e de macroporosidade superior aos limites estabelecidos como críticos para essa faixa de argila, nas camadas superficial e inferior do perfil do solo, significando que essas amostras de solo não apresentaram indicação de compactação em função de densidade e macroporosidade do solo.

Observa-se na figura 28 que a densidade do solo das amostras coletadas no Brasil central, na faixa de argila superior a 70%, foi inferior

ao limite estabelecido como crítico nas três camadas do perfil do solo, não apresentando indicação de compactação em função da densidade do solo nessas amostras de solo.

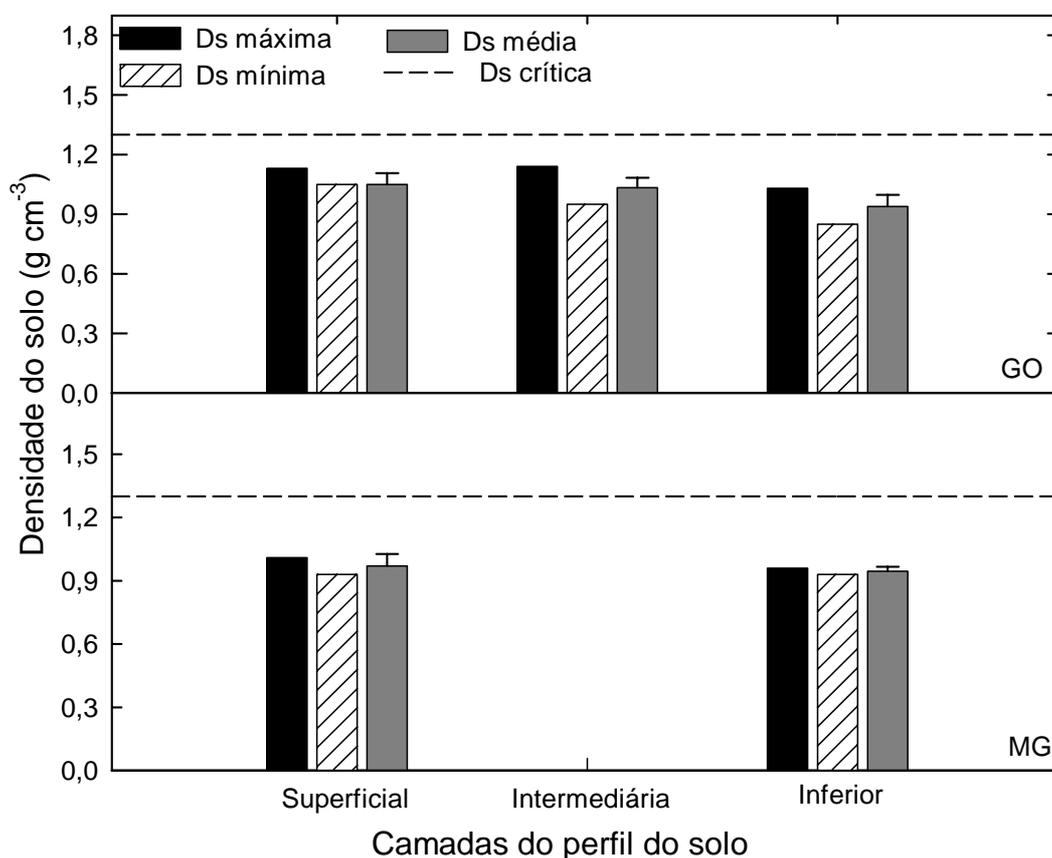


Figura 28. Densidade do solo das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO), e Minas Gerais (MG) pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de densidade do solo (Ds).

Os valores da porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, classificadas na faixa de argila superior a 70% são apresentadas na figura 29.

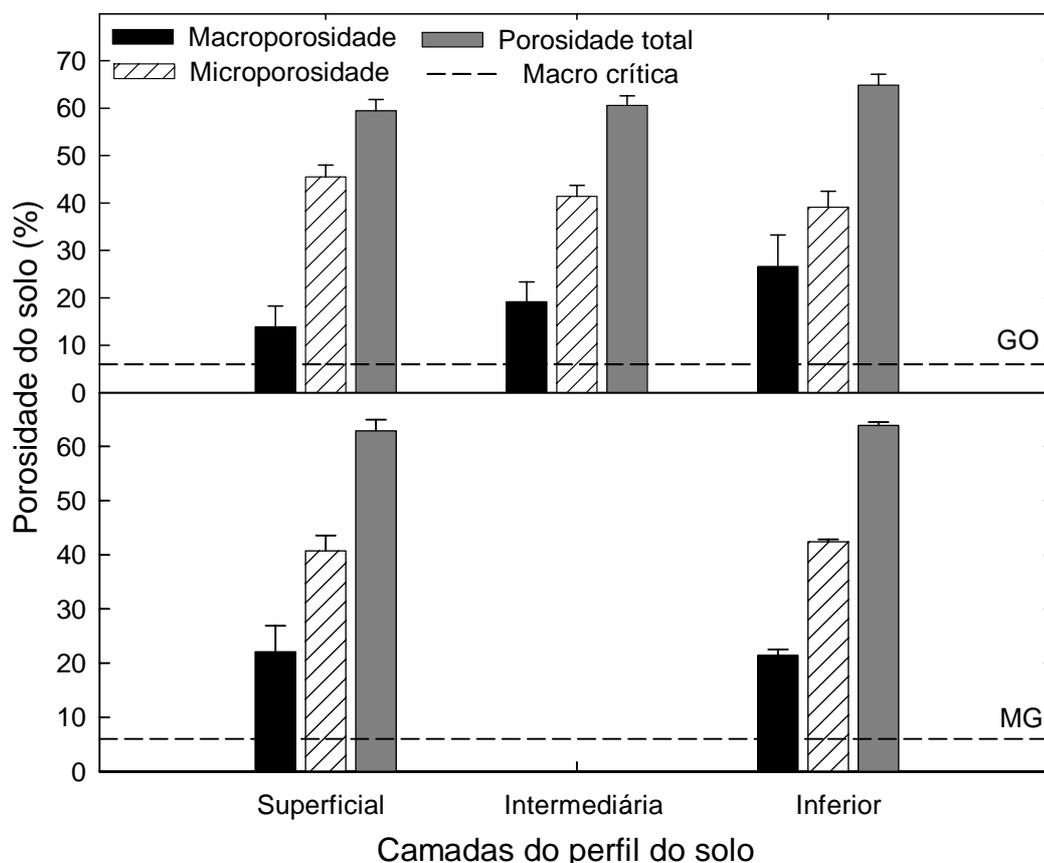


Figura 29. Porosidade das amostras de solo coletadas em áreas irrigadas dos Estados de Goiás (GO) e Minas Gerais (MG), pertencentes a faixa de argila superior a 70%, nas camadas superficial, intermediária e inferior. Santa Maria, RS, 2005. As barras verticais representam o desvio padrão e as linhas horizontais tracejadas os limites críticos de macroporosidade do solo.

Os valores de macroporosidade das amostras de solo coletadas no Brasil central, classificadas na faixa de argila superior a 70%, foram superiores ao valor estabelecido como crítico para essa faixa de argila, nas três camadas do perfil do solo, não ocorrendo indicação de compactação do solo em função da macroporosidade.

4.3.1. Níveis de compactação dos solos irrigados do Brasil central em função da densidade do solo e macroporosidade

Na tabela 10 são apresentados os resultados do teste qui-quadrado para os níveis de compactação do solo em função da densidade do solo e da macroporosidade, para as faixas de teor de argila em cada camada do perfil do solo.

Tabela 10. Estimativas do teste do qui-quadrado (X_c), grau de liberdade (GL) e nível mínimo de significância (NMS), observados nos testes de hipóteses da independência entre a indicação de compactação em função da densidade de solo e macroporosidade e as faixas de teor de argila, em cada camada do perfil do solo para as amostras de solo coletadas nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA). Santa Maria – RS, 2005.

Camadas do perfil de solo	Estados								
	GO			MG			BA		
	X_c	GL	NMS	X_c	GL	NMS	X_c	GL	NMS
Superficial	8,365	4	0,079*	8,521	4	0,074*	0,810	3	0,847ns
Intermediária	-	-	-	3,500	5	0,623ns	1,037	2	0,595ns
Inferior	4,167	4	0,384ns	-	-	-	-	-	-

*: significativo em nível de probabilidade de 0,05; ns: não significativo em nível de probabilidade de 0,05

A indicação de compactação dos solos em função da densidade do solo e da macroporosidade dos solos foi dependente das faixas de teor de argila na camada superficial dos solos amostrados nem GO e MG. Nas demais camadas desses Estados e no Estado da BA, indicação de compactação dos solos não dependeu das faixas de teor de argila dos solos.

A freqüência de indicação de compactação em função da densidade do solo e da macroporosidade das amostras de solo coletadas no Brasil central, em cada faixa de teor de argila, para a camada superficial do perfil do solo, é apresentada na tabela 11.

Tabela 11. Frequência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), em cada faixa de teor de argila, na camada superficial. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de teor de argila (%)	Goiás					Minas Gerais					Bahia				
	Níveis de compactação					Níveis de compactação					Níveis de compactação				
	NC	C-D	C-M	C-DM	Total	NC	C-D	C-M	C-DM	Total	NC	C-D	C-M	C-DM	Total
0-20	-	-	-	-	-	3	-	1	-	4	45	11	3	4	63
	-	-	-	-	-	0,103	-	0,034	-	0,138	0,625	0,153	0,042	0,056	0,875
	-	-	-	-	-	0,750	-	0,250	-		0,714	0,175	0,048	0,063	
	-	-	-	-	-	0,136	-	0,143	-		0,882	0,846	1,000	0,800	
	-	-	-	-	-	0,000	-	0,001	-		0,003	0,012	0,054	0,032	
20-30	6 (1)	-	2	-	8	6	-	6	-	12	6	2	0	1	9
	0,200(2)	-	0,067	-	0,267	0,207	-	0,207	-	0,414	0,083	0,028	-	0,014	0,125
	0,750(3)	-	0,250	-		0,500	-	0,500	-		0,667	0,222	-	0,111	
	0,231(4)	-	0,500	-		0,273	-	0,857	-		0,118	0,154	-	0,200	
	0,126(5)	-	0,817	-		1,058	-	3,325	-		0,022	0,087	0,375	0,225	
30-40	4	-	0	-	4	4	-	0	-	4	-	-	-	-	-
	0,133	-	-	-	0,133	0,138	-	-	-	0,138	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		1,000	-	-	-		-	-	-	-	
	0,154	-	-	-		0,182	-	-	-		-	-	-	-	
	0,082	-	0,533	-		0,307	-	0,966	-		-	-	-	-	
40-50	2	-	2	-	4	6	-	0	-	6	-	-	-	-	-
	0,067	-	0,067	-	0,133	0,207	-	-	-	0,207	-	-	-	-	-
	0,500	-	0,500	-		1,000	-	-	-		-	-	-	-	
	0,077	-	0,500	-		0,273	-	-	-		-	-	-	-	
	0,621	-	4,033	-		0,461	-	1,448	-		-	-	-	-	
50-60	3	-	0	-	3	3	-	0	-	3	-	-	-	-	-
	0,100	-	-	-	0,100	0,103	-	-	-	0,103	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		1,000	-	-	-		-	-	-	-	
	0,115	-	-	-		0,136	-	-	-		-	-	-	-	
	0,062	-	0,400	-		0,230	-	0,724	-		-	-	-	-	
60-70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Continua...

Continuação...

>70	11	-	0	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,367	-	-	-	0,367	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,423	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,226	-	1,467	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	26	-	4	-	30	-	-	7	-	29	51	13	3	5	72
	0,867	-	0,133	-	1,000	-	-	0,241	-	1	0,708	0,181	0,042	0,069	1

Onde: (1) = frequência de amostras em cada nível de compactação; (2) = % do total amostrado; (3) = % da linha; (4) = % da coluna; (5) = qui-quadrado; - = nenhuma amostra classificada nessa faixa de teor de argila.

Nos Estados de GO e MG não foi observada nenhuma amostra de solo das áreas irrigadas amostradas com indicação de compactação em função da densidade do solo (C-D) e da densidade do solo e macroporosidade (C-DM), na camada superficial.

No Estado de GO observou-se que 86,7% das áreas amostradas na camada superficial, que representaram 836,8 ha, não apresentaram indicação de compactação do solo. Por outro lado, 13,3% das áreas, representando 128,4 ha apresentaram indicação de compactação em função da macroporosidade (C-M), estando presentes nas faixas de 20-30 e 40-50% de teor de argila.

No Estado de MG foi observado que 75,9% das áreas amostradas na camada superficial, que representaram 673 ha, não apresentaram problemas de compactação. Enquanto que 24,1% das áreas amostradas representando uma área de 213,7 ha apresentaram indicação de compactação em função da macroporosidade do solo, sendo observado na faixa de 20-30% de argila a situação mais crítica, com 85,7% do total das áreas pertencentes a esse nível, representando uma área de 183,1 ha.

No Estado da BA observou-se na camada superficial, que 70,8% (1.443,3 ha) das áreas irrigadas amostradas, não apresentaram indicação de compactação do solo. Por outro lado, 18,1% das áreas irrigadas amostradas (367,9 ha), apresentaram indicação de compactação em função da densidade do solo, 4,2% (84,9 ha) apresentaram indicação de compactação em função da macroporosidade e 6,9% (141,5 ha), apresentaram indicação de compactação em função da densidade de solo e macroporosidade dos solos. Na faixa de 0-20% de argila, observou-se a maior frequência de amostras com indicativo de compactação do solo, sendo 15,3% (311,3 ha) do total de amostras coletadas, com indicação de compactação em função da densidade do solo, 4,2% (84,9 ha) do total amostrado, com indicação de compactação do solo em função da macroporosidade e 5,6% (113,2 ha) do total de amostras coletadas, com

indicação de compactação em função da densidade do solo e da macroporosidade.

Na tabela 12 é apresentada a frequência de indicação de compactação do solo em função da densidade de solo e da macroporosidade das amostras de solos irrigados coletadas no Brasil central, em cada faixa de teor de argila, na camada intermediária do perfil do solo.

No Estado de GO não foi observada nenhuma amostra de solo com indicação de compactação na camada intermediária do perfil do solo. Do total de áreas amostradas no Estado de MG, na camada intermediária, observou-se que 92,9% (823,8 ha) não apresentaram indicação de compactação do solo e 7,1% (62,9 ha) apresentaram indicação de compactação em função da densidade do solo.

No Estado da Bahia observou-se que 77,6% (1.580,2 ha) do total das áreas amostradas na camada intermediária, não apresentaram indicação de compactação do solo e 22,4% (456,1 ha), apresentaram indicação de compactação em função da densidade do solo. A maior frequência de indicação de compactação em função da densidade do solo, foi observada na faixa de 0-20% de argila com 69,2% (315,6 ha) do total das áreas pertencentes a esse nível.

Na camada inferior do perfil dos solos irrigados, observou-se que as amostras de solo coletadas no Brasil central não apresentaram indicação de compactação do solo.

Tabela 12. Freqüência da indicação de compactação dos solos irrigados, amostrados nos Estados de Goiás (GO), Minas Gerais (MG) e Bahia (BA), em cada faixa de teor de argila, na camada intermediária. Santa Maria, RS, 2005.

Faixas de teor de argila (%)	Goiás					Minas Gerais					Bahia				
	Níveis de compactação					Níveis de compactação					Níveis de compactação				
	NC	C-D	C-M	C-DM	Total	NC	C-D	C-M	C-DM	Total	NC	C-D	C-M	C-DM	Total
0-20	-	-	-	-	-	3	1	-	-	4	37	9	-	-	46
	-	-	-	-	-	0,107	0,036	-	-	0,143	0,638	0,155	-	-	0,793
	-	-	-	-	-	0,750	0,250	-	-		0,804	0,196	-	-	
	-	-	-	-	-	0,115	0,500	-	-		0,822	0,692	-	-	
	-	-	-	-	-	0,137	1,786	-	-		0,048	0,167	-	-	
20-30	6 (1)	-	-	-	6	7	0	-	-	7	6	3	-	-	9
	0,214(2)	-	-	-	0,214	0,250	-	-	-	0,250	0,103	0,052	-	-	0,155
	1,000(3)	-	-	-		1,000	-	-	-		0,667	0,333	-	-	
	0,214(4)	-	-	-		0,269	-	-	-		0,133	0,231	-	-	
	0,000(5)	-	-	-		0,038	0,500	-	-		0,138	0,479	-	-	
30-40	4	-	-	-	4	7	1	-	-	8	2	1	-	-	3
	0,143	-	-	-	0,143	0,250	0,036	-	-	0,286	0,034	0,017	-	-	0,052
	1,000	-	-	-		0,875	0,125	-	-		0,667	0,333	-	-	
	0,143	-	-	-		0,269	0,500	-	-		0,044	0,077	-	-	
	0,000	-	-	-		0,025	0,321	-	-		0,046	0,160	-	-	
40-50	-	-	-	-	-	3	0	-	-	3	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	0,107	-	-	-	0,107	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	1,000	-	-	-		-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	0,115	-	-	-		-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	0,016	0,214	-	-		-	-	-	-	
50-60	1	-	-	-	1	4	0	-	-	4	-	-	-	-	-
	0,036	-	-	-	0,036	0,143	-	-	-	0,143	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		1,000	-	-	-		-	-	-	-	
	0,036	-	-	-		0,154	-	-	-		-	-	-	-	
	0,000	-	-	-		0,022	0,286	-	-		-	-	-	-	

Continua...

Continuação...

60-70	7	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,250	-	-	-	0,250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,250	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,000	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>70	10	-	-	-	10	2	0	-	-	2	-	-	-	-	-
	0,357	-	-	-	0,357	0,071	-	-	-	0,071	-	-	-	-	-
	1,000	-	-	-		1	-	-	-		-	-	-	-	-
	0,357	-	-	-		0,077	-	-	-		-	-	-	-	-
	0,000	-	-	-		0,011	0,143	-	-		-	-	-	-	-
Total	28	-	-	-	28	26	2	-	-	28	45	13	-	-	58
	1	-	-	-	1	0,929	0,071	-	-	1	0,776	0,224	-	-	1

Onde: (1) = frequência de amostras em cada nível de compactação; (2) = % do total amostrado; (3) = % da linha; (4) = % da coluna; (5) = qui-quadrado; - = nenhuma amostra classificada nessa faixa de teor de argila.

4.4 Avaliação das correlações entre as variáveis

Na tabela 13 são apresentadas as correlações entre as variáveis estudadas. Para a realização desse teste, foram avaliados todos os dados conjuntamente. As correlações entre as variáveis, que foram inferiores a 70% não foram apresentadas na tabela.

Observa-se que a microporosidade correlacionou-se negativamente com a fração textural areia dos solos e positivamente com a fração argila, indicando que a elevação do teor de argila dos solos ocasionou um incremento no volume de microporos do solo. Em termos práticos, os solos arenosos possuem maior volume de macroporos e os solos argilosos maior microporosidade. A capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo são influenciados pela distribuição do tamanho de poros (Hillel, 1980; Carlesso & Zimmermann, 2000). Esta distribuição depende da textura e estrutura do solo e pode ser obtida por meio da curva característica de água no solo. Nos solos de textura arenosa, a infiltração de água no solo é mais rápida, devido ao predomínio de macroporos já, em solos argilosos, apesar da maior porosidade total, a infiltração de água no solo é mais lenta, devido ao predomínio de microporos.

A porosidade total apresentou correlação positiva com o teor de argila dos solos e negativa com a densidade do solo, significando que solos argilosos apresentam maior porosidade total do que solos arenosos e que a elevação da densidade do solo promove a redução da porosidade total dos solos.

Em trabalho realizado com solos de diferentes texturas, Petry (2000) observou que os solos de textura argila pesada e franco-argilo-siltosa apresentaram maiores valores de microporosidade e porosidade total do que solos de textura arenosa.

Tabela 13. Correlações entre os atributos físico-hídricos do solo avaliados. Santa Maria, RS, 2005.

	Atributos físico-hídricos do solo														
	A. Gr.	A. F.	Silte	Argila	Ds	Dp	Macro	Micro	Total	Sat.	0,001	0,006	0,033	0,1	0,5
A. F	0,77*														
Silte	-	-													
Argila	-0,82*	-0,96*	-												
Ds	-	-	-	-											
Dp	-	-	-	-	-										
Macro	-	-	-	-	-	-									
Micro	-0,77*	-0,88*	-	0,85*	-	-	-								
Total	-	-	-	0,70*	-0,89*	-	-	-							
Sat.	-0,72*	-0,72*	-	0,73*	-0,81*	-	-	0,70*	0,77*						
0,001	-0,74*	-0,72*	-	0,74*	-0,82*	-	-	0,73*	0,77*	0,96*					
0,006	-0,76*	-0,86*	-	0,84*	-	-	-	0,94*	-	0,80*	0,83*				
0,033	-0,74*	-0,87*	-	0,84*	-	-	-	0,93*	-	0,73*	0,75*	0,96*			
0,1	-0,74*	-0,88*	-	0,85*	-	-	-	0,93*	-	0,71*	0,73*	0,96*	0,99*		
0,5	-	-0,81*	-	-	-	-	-	0,82*	-	-	-	0,86*	0,88*	0,88*	
1,5	-0,76*	-0,86	-	0,85*	-	-	-	0,84*	-	0,71*	0,72*	0,88*	0,89*	0,91*	0,89*

Onde: A. Gr. = Areia grossa; A.F. = Areia Fina; Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Total = porosidade total; Sat. = umidade de saturação do solo; 0,001, 0,006, 0,033, 0,1, 0,5 e 1,5 = potenciais de água no solo; *: significativo em nível de probabilidade de 0,05.

De acordo com Santos & Ribeiro (2000), aumento da densidade do solo resulta em compactação e redução da porosidade total do mesmo. A compactação do solo caracterizada por elevados valores de densidade do solo é comumente associada à redução da porosidade total e macroporosidade, em razão do uso intensivo de máquinas e equipamentos (Silva & Ribeiro, 1997).

A umidade de saturação e o conteúdo de água dos solos nos potenciais de 0,001, 0,006, 0,033, 0,1, 0,5 e 1,5 MPa correlacionaram-se negativamente com o teor de areia dos solos e com a densidade dos solos e positivamente com o teor de argila dos solos (com exceção do potencial de 0,5 MPa), microporosidade, porosidade total (umidade de saturação e conteúdo de água no potencial de 0,001 MPa). Isso significa que solos arenosos possuem menor umidade de saturação e conteúdo de água nos potenciais de 0,001, 0,006, 0,033, 0,1, 0,5 e 1,5 MPa do que solos argilosos. De acordo com Hillel (1980) a quantidade total de água armazenada no solo está relacionada com as características físicas desse solo, especialmente a textura e a estrutura. Ainda, segundo o autor, a quantidade de água retida em potenciais superiores a 0,1MPa é basicamente definida em função da porosidade dos solos e a água retida em potenciais inferiores a 0,1 MPa é influenciada pela área superficial específica das partículas. Dessa forma, pode-se afirmar que os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água do que solos arenosos, pois possuem maior porosidade total e área superficial específica do que solos arenosos. Segundo Petry (2000), solos de textura argila pesada apresentam maior umidade de saturação do que solos de textura franco-arenosa. Ainda segundo o autor, em solos de textura franco-arenosa, o conteúdo de água no solo diminui rapidamente com potenciais inferiores a $-0,03$ MPa, confirmando que a retenção de água no solo aumenta com o aumento no teor de argila dos solos.

5. CONCLUSÕES

No Estado do Rio Grande do Sul (RS), 66,5% das áreas irrigadas amostradas apresentaram indicação de compactação do solo em função da densidade do solo e macroporosidade, na camada superficial, 20,5% na camada intermediária e 9,5% na camada inferior do perfil do solo.

A maior freqüência de indicação de compactação do solo restritiva à produtividade das culturas, em função da macroporosidade (C-M) e da densidade do solo e macroporosidade (C-DM), na camada superficial dos solos do Estado do RS, foi observada na faixa de 40-50% de argila. A faixa de 50-60% de argila apresentou a maior freqüência de indicação de compactação restritiva à produtividade das culturas em função da densidade do solo (C-D).

No Brasil central, 13,3% das áreas amostradas na camada superficial, no Estado de Goiás (GO), 24,1% no Estado de Minas Gerais (MG) e 29,2% no Estado da Bahia (BA), apresentaram indicação de compactação em função da densidade do solo e macroporosidade do solo.

As faixas de teor de argila de 20-30 e 30-40% no Estado de GO, 20-30% no Estado de MG e 0-20% no Estado da BA, apresentaram a maior freqüência de indicação de compactação do solo, na camada superficial dos solos irrigados amostrados no Brasil central.

Na camada intermediária, as amostras coletadas no Estado de GO não apresentaram indicação de compactação do solo restritiva à produtividade das culturas. No Estado de MG, 7,1% do total amostrado e 13% no Estado da BA, apresentaram indicação de compactação do solo restritiva à produtividade das culturas em função da densidade do solo, sendo a maior freqüência observada nas faixas de 0-20 e 30-40% de argila no Estado de MG e 0-20% de argila no Estado da BA.

Na camada inferior, as amostras de solo coletadas no Brasil central não apresentaram indicação de compactação do solo restritiva à

produtividade das culturas, em função da densidade do solo e macroporosidade do solo.

A maior frequência das amostras coletadas em áreas irrigadas do Estado do RS foram classificadas na faixa de 40-50% de argila, na camada superficial e na faixa de argila superior a 70% nas camadas intermediária e inferior. No Estado de GO, a maior frequência das amostras coletadas foram classificadas na faixa de argila superior a 70% nas três camadas do perfil do solo. Em MG a maior frequência das amostras de solo coletadas foi classificada na faixa de 20-30% de argila na camada superficial e 30-40% de argila nas camadas intermediária e inferior. No Estado da BA a maior frequência das amostras coletadas foram classificadas na faixa de 0-20% de argila, nas três camadas do perfil do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBER, S.A., MACKAY, A.D., KUCHENBUCK, R.O., BARRACLOUGH, S. Effect of soil temperature and water on maize root growth. **Plant and soil**, Dordrecht, v.11, p. 267-269, 1988.
- BAVER, L.D., GARDNER, W.H., & GARDNER, W.R. **Soil physics**: New York. J. Wiley, 1972, 498 p.
- BODMAN, G.B. & CONSTATIN, G. K. **Influence of particle size distribution in soil compaction**. Hilgardia, Berkeley, v. 36. p. 567-591. 1996.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6 Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983, 647 p.
- CARLESSO. R., & ZIMMERMANN, F.L. **Água no solo: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM/Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88 p.
- CARTER, M.R. **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society Soil Science. 1993. 823 p.
- CASTRO, O.M. de , VIEIRA, R.S. **Condutividade hidráulica de um latossolo roxo sob três sistemas de preparo**. In: **CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO “SOLO SUELO 96”**, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais**. Águas de Lindóia: SBCS/SLACS, 1996. 1 CD-ROM.
- CHRISTOFIDIS, D. **Recursos hídricos e irrigação no Brasil**. In: Workshop **Disponibilidade de água e irrigação no nordeste**, Brasília, 1999. 34 p.
- CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos**. In: **IRRIGAÇÃO E TECNOLOGIA**. Brasília, 2002. p. 46-55.
- DA ROS, C.O., SECCO, D., FIORIN, J.E., PETRERE, C., CADORE, M. A., PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **R. bras. ci. solo**, Campinas, v. 21, n.2, p. 241-247, abr./jun. 1997.
- DECAGON DEVICES. Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter. USA, **Decagon devices**, 2000. 70 p.

- ELTZ, F.L.F., PEIXOTO, R.T.G., JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruna Álico. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas v.13, 1989, p. 249-167.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Serviço nacional de levantamento e conservação do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, p.15-37, 1979.
- FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.C.C., THIMOTEO, C.M.S. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, São Paulo, v. 23, n. 1, 1995, p. 117-132.
- FORSYTHE, W.M. Lãs propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia latino americana**, v.4, 1967, p. 165-176.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. **Particle-size analysis**. In: **KLUTE, A. Methods of soil analysis**. Part 1. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy. 1986.
- GERARD, C.J., SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agronomy journal**, v. 74, 1982, p. 875-879.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Adv. soil sci.** , v.6, 1987, p. 65-100.
- GUPTA, S.C, HADAS, A. & SCHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behaviour during compaction. In: LARSON, W.E., BLAKE, G.R. ALLMARAS, R.R., VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands, kluwer Academic Publishers, 1989. p. 137-152.
- HAKANSSON, I. & MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil till. res.**, 35, 1995, p. 85-97.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Academic Press, Orlando, 1980.
- ISLAM, K.R. WEIL, R.R. Soil quality indicator proprieties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of soil and water conservation**, v.55, 2000, p. 69-78.
- KARLEN. D. L.; WOLLWNHAUPT, N; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S.; JORDAHL, J.L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no till corn. **Soil till. res.**, v.31, 1994, p.149-167.

- KLEIN, V.A **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Piracicaba, 1998. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas)- Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 1998
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. soil sci**, v.1, 1985, p. 277-294.
- LOIOLA, M.L. & DOUZA, F. De. Estatísticas sobre irrigação no Brasil segundo o Censo Agropecuário 1995-1996. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.5. n.1, 2001, p. 171-180.
- LORIMER, M.S., DOUGLAS, L.A Effect of management practice on properties of a Victorian red brown earth. I. Soil physical properties. **Australia soil reserch**, Collingwood, v.33, n. 5, 1995, p. 851-857.
- OLIVEIRA, J. B. de, JACOMINE, P.K.T., CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil – Guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2 Ed. Jaboticabal: Funep/Unesp. 1992. 201 p.
- MARIA, I.C. de, CASTRO O.M., DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **R. bras. ci. solo**, Campinas, v.23, 1999, p.703-709,.
- MATERECHERA, S.A.; ALSON, A.M.; KIRB, J.M. & DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into compacted subsoil. **Plant and soil**, v. 144, 1992, p. 297-303.
- MARTINS, S.G., SILVA, M.L.N., CURI, N., FERREIRA, M.M. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, v.8 n.1, 2002, p. 032-041.
- PETRY, M.T. **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, 2000. 127p.
- REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manoele Ltda, 1990.
- REINERT, D.J., REICHERT, J.M. & SILVA, V.R. **Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado**. In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. & CERETTA, C.A. eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, 2001, 165p.

- RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil science**, Madison, v. 58, 1949, p.95-112.
- RUSSEL, R.S. & GROSS, M.G. Physical aspects of soil fertility-The response of roots to mechanical impedance. **Journal of agricultural science**, v. 22, 1974, p. 305-318.
- SANTOS, E.E.F. & RIBEIRO, M.R. Influência da Irrigação e do cultivo nas propriedades de um latossolo e um Argissolo da região do submédio São Francisco: Atributos morfológicos e físicos. **R. bras. ci. solo**, v. 24, 2000, p. 875-884.
- SECCO, D. **Estados de compactação de dois latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade das culturas**. Tese. (Doutorado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia UFSM, Santa Maria, 2003.
- SHIERLAW, W.J.; ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and soil**, v. 77, n.1, 1984, p. 15-28,.
- SILVA, A. P. da, LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **R. bras. ci. solo**, v.10, 1986, p. 91-95.
- SILVA, A.J.N. & RIBEIRO, M.R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **R. bras. ci. solo**, v. 21, 1997, p.677-684.
- SILVA, V. R., REINERT, D. Efeito do Sistema de cultivo na resistência de um latossolo roxo. In: **Encontro nacional de plantio direto na palha, 1998, Brasília. Cd-rom**. VI Encontro nacional de plantio direto na palha. Qualidade Ambiental e Prosperidade na Agricultura. Brasília – DF: 1998, v.1. p. 1-3.
- SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Tese. (Doutorado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia UFSM, Santa Maria, 2003.
- STEPNIEWSKI, W., HORN, R. & MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agr. ecosyst. environ.**, v. 88, 2002, p. 175-181.

- SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: **SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van, ed. Soil compaction in crop production.** Netherlands, Elsevier, 1994, p. 01-21.
- STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja.** Dissertação. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia UFSM, Santa Maria, 2003.
- TAVARES FILHO, J., RALISCH, R., GUIMARÃES, M.F., MEDINA, C.C., BALBINO, L.C. & NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para a avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **R. bras. ci. solo**, v. 23, 1991, p. 111-119.
- TORMENA, C. A. ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. bras. ci. solo**, v. 20, 1996, p. 333-339.
- WATANABE, S. H., TORMENA, C. A., ARAUJO, M.A. GONÇALVES, A.C.A., SILVA, A. P. PINTRO, J.C., COSTA, A.C.S., FILHO, P.S.V. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta scientiarum**, v. 22, 2000, p. 1055-1060.
- WOLSCHICK, D. **Perdas de nitrogênio por lixiviação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho em condições de excesso hídrico.** Santa Maria, UFSM. 2000. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2000.
- WU, I., VALMOCIL, J.A., CHILDS, S.W. Pore size, particle size, aggregate size and water retention. **Soil science.** Society of America Journal, Madison, v. 54, 1990, p. 952-956.
- ZIMMERMANN, F.L. **Crescimento de plantas de milho e armazenamento de água no solo em dois sistemas de cultivo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Programa de Pós-Graduação em Agronomia UFSM, Santa Maria, 2001.

ANEXOS

ANEXO I. Mapa das regiões brasileiras. As áreas hachuradas representam as regiões onde foram realizadas as coletas de amostras de solo para a caracterização física. Santa Maria-RS.



ANEXO II. Identificação dos produtores e locais onde foram realizadas as coletas das amostras de solo para caracterização física do solo. Santa Maria, RS, 2005.

Produtor	Pivô	Latitude	Longitude	Altitude	Cidade	Estado
Ajadir Machiavelli	1	28° 38' 52.0"	53° 27' 31.0"	445	Cruz Alta	RS
Arcádio Cavalli	2	28° 34' 16.0"	53° 20' 57.9"	420	Cruz Alta	RS
Carlos Abreu	1	28° 34' 54.0"	53° 22' 27.0"	429	Cruz Alta	RS
Carlos Abreu	3	28° 34' 48.0"	53° 23' 51.0"	436	Cruz Alta	RS
Carlos Abreu	7	28° 36' 04.0"	53° 21' 55.0"	464	Cruz Alta	RS
Carlos Abreu	8	28° 35' 56.0"	53° 22' 46.0"	468	Cruz Alta	RS
Carlos Abreu	9	28° 35' 06.0"	53° 21' 51.0"	465	Cruz Alta	RS
Clarice Bilibio	1	27° 59' 27.0"	53° 40' 52.0"	556	Santo Augusto	RS
Clarice Bilibio	2	27° 59' 02.0"	53° 40' 18.0"	542	Santo Augusto	RS
Clarice Bilibio	3	27° 58' 40.0"	53° 39' 42.0"	508	Santo Augusto	RS
Fazenda Taruma	1	28° 52' 59.9"	54° 01' 53.3"	494	Jóia	RS
Fazenda Taruma	2	28° 52' 24.5"	54° 02' 06.4"	499	Jóia	RS
Jorge Moraes	1	29° 04' 19.0"	53° 07' 59.9"	315	Salto do Jacuí	RS
Jorge Moraes	2	29° 04' 21.0"	53° 02' 22.0"	310	Salto do Jacuí	RS
Jorge Moraes	3	29° 04' 33.0"	53° 08' 44.0"	367	Salto do Jacuí	RS
Jorge Moraes	4	29° 04' 37.0"	53° 09' 07.0"	340	Salto do Jacuí	RS
Jose Rebelatto	2	27° 39' 08.3"	53° 49' 47.1"	491	Campo Novo	RS
Nelson Lauxen	3	28° 33' 17.6"	53° 37' 27.7"	448	Cruz Alta	RS
Rogério Furian	1	28° 45' 15.0"	53° 35' 23.0"	400	Cruz Alta	RS
Agroantoniazzi	1	29° 36' 10.4"	55° 19' 10.4"	135	S. F. de Assis	RS
Agrop. Zamboni	1	27° 52' 58.0"	53° 45' 27.0"	527	Santo Augusto	RS
Agrop. Zamboni	2	27° 52' 40.0"	53° 44' 56.0"	520	Santo Augusto	RS
Agrop. Zamboni	3	27° 53' 55.0"	53° 45' 00.0"	514	Santo Augusto	RS
Angelo Mariotti	2	27° 57' 04.0"	53° 44' 44.0"	539	Santo Augusto	RS
Angelo Mariotti	4	27° 58' 53.0"	53° 44' 29.5"	540	Santo Augusto	RS
Angelo Mariotti	6	27° 57' 51.4"	53° 44' 15.4"	539	Santo Augusto	RS
Antenor Macagnan	3	28° 28' 50.0"	53° 33' 28.0"	480	Cruz Alta	RS
Antonia S. Polo	3	27° 56' 27.6"	53° 47' 06.4"	504	Santo Augusto	RS
Antonia S. Polo	4	27° 56' 60.0"	53° 48' 11.7"	513	Santo Augusto	RS
Antonia S. Polo	5	27° 56' 05.0"	53° 48' 54.0"	489	Santo Augusto	RS
Antonio Losso	1	27° 36' 41.0"	53° 41' 42.0"	464	Braga	RS
Antonio Losso	2	27° 37' 10.0"	53° 41' 33.0"	485	Braga	RS
Ari Becker	1	28° 35' 23.0"	53° 20' 03.0"	791	Cruz Alta	RS
Armando Eickhoff	2	27° 44' 03.0"	53° 35' 26.0"	514	Santo Augusto	RS
Armando Eickhoff	4	27° 43' 33.0"	53° 34' 52.0"	487	Santo Augusto	RS
Carlos Sperotto	1	27° 54' 28.5"	53° 43' 56.9"	534	Santo Augusto	RS
Claudir de Bortoli	6	28° 45' 57.9"	53° 25' 00.0"	415	Cruz Alta	RS
Claudir de Bortoli	9	28° 46' 11.5"	53° 26' 27.0"	420	Cruz Alta	RS
Claudir de Bortoli	10	28° 55' 50.0"	53° 34' 36.0"	367	Cruz Alta	RS
Constantino Cesca	1	28° 29' 32.0"	53° 32' 27.0"	472	Cruz Alta	RS
Carlos Depiere	2	27° 51' 55.0"	53° 45' 40.0"	516	Santo Augusto	RS
Gilberto Greiwe	3	27° 59' 21.0"	54° 04' 01.0"	419	Independência	RS
Gilberto Greiwe	4	27° 58' 08.0"	54° 04' 17.0"	369	Independência	RS
Gilberto Greiwe	5	27° 57' 35.0"	54° 03' 52.0"	401	Independência	RS
Humberto Cesar	4	27° 39' 46.2"	53° 23' 24.9"	534	P. das Missões	RS
Humberto Cesar	5	27° 39' 40.8"	53° 22' 54.3"	548	P. das Missões	RS

Continua...

Continuação...

Luis A. Dutra	1	28° 27' 37.0"	53° 27' 42.0"	507	Cruz Alta	RS
Macagnan	6	28° 44' 25.0"	53° 26' 59.0"	379	Cruz Alta	RS
Macagnan	7	28° 43' 57.0"	53° 27' 14.0"	400	Cruz Alta	RS
Macagnan	9	28° 44' 38.0"	53° 25' 08.0"	411	Cruz Alta	RS
Macagnan	10	28° 43' 58.0"	53° 28' 00.0"	384	Cruz Alta	RS
Mario Utzig	1	28° 25' 11.0"	53° 19' 03.6"	500	Santa Bárbara	RS
Mario Utzig	2	28° 25' 43.9"	53° 19' 29.0"	507	Santa Bárbara	RS
Nogueira	1	28° 43' 41.0"	53° 20' 02.0"	470	Cruz Alta	RS
Olavo Antoniazzi	1	28° 46' 06.2"	53° 58' 34.7"	339	Jóia	RS
Olavo Antoniazzi	2	28° 45' 09.6"	53° 58' 59.3"	370	Jóia	RS
Olavo Antoniazzi	3	28° 45' 22.6"	53° 59' 43.3"	391	Jóia	RS
Olívio Trentin	1	27° 57' 22.0"	53° 34' 24.0"	543	P. das Missões	RS
Padoin	2	27° 57' 45.0"	53° 46' 30.0"	541	Santo Augusto	RS
Padoin	4	27° 59' 12.0"	53° 45' 46.0"	509	Santo Augusto	RS
Padoin	5	27° 59' 12.0"	53° 46' 23.0"	524	Santo Augusto	RS
Paolo Rigo	2	29° 14' 48.9"	55° 47' 23.0"	117	Manoel Viana	RS
Paolo Rigo	1	29° 15' 00.0"	55° 48' 00.0"	130	Manoel Viana	RS
Pedro Dilly	1	28° 30' 19.0"	53° 15' 57.0"	458	Santa Bárbara	RS
Pedro Dilly	2	28° 30' 40.0"	53° 15' 44.0"	477	Santa Bárbara	RS
Pedro Dilly	3	28° 30' 06.0"	53° 15' 08.0"	452	Santa Bárbara	RS
Pedro Dilly	4	28° 28' 56.0"	53° 12' 50.0"	444	Santa Bárbara	RS
Pedro Dilly	5	28° 30' 04.0"	53° 17' 09.0"	446	Santa Bárbara	RS
Pedro Dilly	6	28° 30' 05.0"	53° 17' 30.0"	444	Santa Bárbara	RS
Pedro V. Marques	1	28° 21' 28.2"	54° 54' 22.8"	220	S. Luiz Gonzaga	RS
Roque Becker	1	28° 52' 22.0"	53° 32' 08.0"	397	Manoel Viana	RS
Roque Becker	2	28° 53' 17.0"	53° 31' 55.0"	390	Manoel Viana	RS
Sérgio Ferreira	1	28° 41' 42.0"	53° 49' 20.0"	418	Cruz Alta	RS
Sérgio Ferreira	2	28° 41' 06.0"	53° 49' 21.0"	400	Cruz Alta	RS
Sérgio Ferreira	3	28° 40' 17.0"	53° 48' 51.0"	410	Cruz Alta	RS
Sérgio Ferreira	4	28° 39' 17.0"	53° 48' 56.0"	415	Cruz Alta	RS
Sérgio Ferreira	5	28° 38' 35.0"	53° 48' 28.0"	415	Cruz Alta	RS
Valdinei Donato	1	28° 20' 23.2"	55° 09' 11.9"	218	S. Luiz Gonzaga	RS
Valdinei Donato	2	28° 20' 37.6"	55° 09' 31.9"	222	S. Luiz Gonzaga	RS
Valdinei Donato	3	28° 20' 52.1"	55° 09' 58.5"	225	S. Luiz Gonzaga	RS
Valdinei Donato	4	28° 20' 46.3"	55° 10' 42.4"	219	S. Luiz Gonzaga	RS
Valdinei Donato	1	28° 20' 38.3"	55° 09' 38.5"	217	S. Luiz Gonzaga	RS
Valdinei Donato	2	28° 20' 36.3"	55° 09' 30.5"	220	S. Luiz Gonzaga	RS
Audacir Minetto	1	16° 45' 12.9"	47° 38' 20.0"	1005	Cristalina	GO
Audacir Minetto	2	16° 58' 32.9"	47° 38' 29.0"	1009	Cristalina	GO
Audacir Minetto	3	16° 57' 04.0"	47° 38' 26.8"	1017	Cristalina	GO
Audacir Minetto	4	16° 57' 31.0"	47° 38' 11.6"	1032	Cristalina	GO
Audacir Minetto	5	17° 00' 06.4"	47° 38' 14.9"	903	Cristalina	GO
Pedro Boaretto	2	14° 49' 01.6"	47° 45' 36.9"	1148	Agua Fria b	GO
F. Pamplona	2	16° 14' 05.5"	47° 38' 27.5"	1002	Luziânia	GO
F. Pamplona	23	16° 12' 53.0"	47° 36' 41.1"	990	Luziânia	GO
F. Pamplona	26	16° 12' 10.1"	47° 37' 29.9"	1004	Luziânia	GO
Senair Gôndolo	1	17° 03' 00.0"	47° 11' 0.9"	810	Cristalina	GO
Valdemar Cenci	80	15° 47' 56.4"	47° 29' 54.0"	962	Planaltina	GO

Continua...

Continuação...

Agroreservas	3	15° 57' 11.0"	46° 33' 20.0"	931	Unaí	MG
Agroreservas	7	15° 58' 13.6"	46° 36' 29.0"	934	Unaí	MG
Fazenda HJ	10	16° 34' 16.9"	47° 16' 28.9"	893	Unaí	MG
Geraldo Michels	1	16° 19' 10.6"	46° 9' 43.6"	863	Unaí	MG
Geraldo Michels	2	16° 19' 4.0"	46° 9' 15.9"	864	Unaí	MG
Geraldo Michels	3	16° 18' 35.4"	46° 9' 29.6"	884	Unaí	MG
Geraldo Michels	4	16° 18' 25.2"	46° 10' 29.6"	888	Unaí	MG
Geraldo Michels	5	16° 18' 7.6"	46° 9' 43.7"	897	Unaí	MG
Geraldo Michels	6	16° 17' 54.5"	46° 10' 3.7"	887	Unaí	MG
Luis A. Manica	1	16° 16' 49.7"	46° 26' 49.7"	957	Unaí	MG
Luis A. Manica	2	16° 15' 34.1"	46° 19' 5.8"	874	Unaí	MG
F. Caliandra	1	12° 16' 28.8"	45° 33' 36.6"	724	Barreiras	BA
F. Caliandra	2	12° 15' 51.6"	45° 33' 34.2"	744	Barreiras	BA
F. Caliandra	3	12° 15' 15.0"	45° 33' 35.4"	754	Barreiras	BA
F. Caliandra	4	12° 16' 22.8"	45° 34' 15.0"	737	Barreiras	BA
F. Caliandra	5	12° 15' 45.0"	45° 34' 13.2"	751	Barreiras	BA
F. Busato	1	12° 55' 33.4"	45° 29' 49.5"	750	São Desidério	BA
F. Busato	10	12° 52' 16.4"	45° 30' 18.8"	782	São Desidério	BA
F. Busato	11	12° 51' 52.3"	45° 31' 15.9"	778	São Desidério	BA
F. Busato	12	12° 51' 36.7"	45° 30' 34.9"	777	São Desidério	BA
F. Busato	2	12° 55' 18.7"	45° 29' 12.9"	750	São Desidério	BA
F. Busato	3	12° 54' 57.6"	45° 30' 05.7"	783	São Desidério	BA
F. Busato	4	12° 54' 41.5"	45° 29' 27.4"	788	São Desidério	BA
F. Busato	5	12° 53' 52.7"	45° 30' 27.8"	773	São Desidério	BA
F. Busato	6	12° 53' 36.6"	45° 29' 46.5"	788	São Desidério	BA
F. Busato	7	12° 53' 12.1"	45° 30' 43.9"	776	São Desidério	BA
F. Busato	8	12° 52' 56.6"	45° 30' 02.7"	788	São Desidério	BA
F. Busato	9	12° 52' 32.0"	45° 30' 59.8"	778	São Desidério	BA
F. Rio de Janeiro	1	11° 52' 33.0"	46° 00' 23.4"	815	Barreiras	BA
F. Rio de Janeiro	2	11° 52' 55.2"	45° 59' 44.0"	815	Barreiras	BA
F. Rio de Janeiro	4	11° 51' 58.8"	45° 59' 55.0"	813	Barreiras	BA
Rogério Faedo	1	11° 45' 54.1"	45° 40' 06.1"	769	L. E. Magalhães	BA
Rogério Faedo	2	11° 47' 23.7"	45° 40' 30.0"	779	L. E. Magalhães	BA

ANEXO III. Demonstrativo dos locais onde foram realizadas as trincheiras para as coletas de amostras de solo quando as áreas apresentavam textura uniforme. Santa Maria-RS. 2005.

