

EFEITO DE DOSES DE GESSO+MATÉRIA SECA DE CROTALÁRIA E
DE NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO EM ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO

ELIAS NASCENTES BORGES

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Dr. FRANCISCO LOMBARDI NETO

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

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Agosto - 1995

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Divisão de Biblioteca e Documentação - CAMPUS "LUIZ DE QUEIROZ"/USP

Borges, Elias Nascentes

Efeito de doses de gesso+massa seca de crotalária e de níveis de compactação em atributos físicos de um latossolo vermelho-escuro. Piracicaba, 1995.

136p.

Tese - ESALQ.

Bibliografia.

1. Gesso em solo compactado - Efeito 2. Matéria seca em solo compactado - Efeito 3. Solo - Condutividade hidráulica I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.43

EFEITO DE DOSES DE GESSO+MATÉRIA SECA DE CROTALÁRIA E
DE NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO EM ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO

ELIAS NASCENTES BORGES

Aprovado em: 8/11/1995

Comissão julgadora:

Dr. Francisco Lombardi Neto	IAC/CAMPINAS
Prof. Dr. Geraldo Victorino de França	USP/ESALQ
Prof. Dr. Gilberto Fernandes Corrêa	UFU/UBERLÂNDIA
Prof. Dr. Liovando Marciano da Costa	UFV/VIÇOSA
Prof ^a . Dra Marlene Cristina Alves	UNESP/ILHA SOLTEIRA



Dr. FRANCISCO LOMBARDI NETO

Orientador

Aos meus pais, Vicente e Sebastiana, aos irmãos e à todos
familiares

OFEREÇO

À minha esposa Eloá e as nossas filhas Mariana e Ana Paula

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus e ao povo brasileiro, por tudo que tem-me proporcionado.

À Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade oferecida para realização do curso.

À Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por intermédio do Prof. Dr. Geraldo Victorino de França, pela acolhida e compreensão.

Ao Dr. Francisco Lombardi Neto, pela orientação desinteressada, pelo estímulo, pelo exemplo de profissionalismo demonstrado.

Ao Prof. Dr. Liovando Marciano da Costa que a muitos anos tem-me orientado para busca do melhor caminho, do aprendizado e da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Gilberto Fernandes Corrêa, pelo interesse e paciência com que tem participado do meu trabalho no dia a dia.

A Prof^a. Dra. Marlene Cristina Alves pelas sugestões apresentadas.

Aos professores da USP/ESALQ pela valiosa contribuição ao meu aprendizado.

Ao Programa Institucional de Capacitação de Docentes da CAPES (PICD/CAPES) pela bolsa concedida durante a realização do curso.

Aos professores do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP/CENA, em especial ao pesquisador responsável pelo Laboratório de Raios Gama, pela orientação e empréstimo do equipamento.

À todos os pesquisadores da Seção de Conservação do Solo do IAC-Campinas, pela presteza no atendimento.

À todos os Colegas de trabalho do Departamento Agronomia da UFU, em especial os da área de Solos e do LABAS, que muito tem contribuído para meu desenvolvimento profissional.

Aos colegas de cursos de pós graduação da ESALQ/USP, pela convivência e o apoio desinteressado.

Enfim, à todos aqueles que, direta ou indiretamente, tenham contribuído para o êxito deste trabalho..

SUMÁRIO

	Páginas
AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURA	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
RESUMO.....	xxi
SUMMARY.....	xxiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Local de condução do experimento e solo utilizado..	21
3.2. Aparelho compactador e coluna para compactação.....	22
3.3. Caracterização do vaso utilizado.....	23
3.4. Aparelho de raios gama.....	23
3.5. Delineamento experimental.....	24
3.6. Metodologia de implantação.....	25
3.6.1. Correção e adubação da amostra de solo.....	25
3.6.2. Estabelecimento dos tratamentos no anel superior	26
3.6.3. Estabelecimento dos tratamentos no anel	

central.....	26
3.6.4. Formação do vaso e condução da cultura.....	38
3.6.5. Determinações laboratoriais.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Alterações físicas do solo avaliadas antes do cultivo da soja	32
4.1.1. Efeito dos tratamentos no conteúdo volumétrico de sólidos e na porosidade total do solo.....	35
4.1.2. Efeito dos tratamentos na densidade do solo avaliada através da leitura no aparelho de raios gama, antes do plantio da soja.....	39
4.1.3. Efeito dos tratamentos na porosidade total do solo, calculada com os valores de densidade do solo, obtidos através da leitura no aparelho de raios gama, antes do plantio da soja.....	40
4.2. Alterações em alguns parâmetros físicos do solo avaliados depois do cultivo da soja.....	41
4.2.1. Efeito dos tratamentos na densidade do solo avaliada através da leitura do aparelho de raios gama após o cultivo da soja	42
4.2.1.1. Efeito das doses de gesso+MSC	

dentro de níveis de compactação.....	42
4.2.1.2. Efeito dos níveis de compactação dentro de doses de gesso+MSC	51
4.2.2. Efeito dos tratamentos no conteúdo volumétrico de materiais sólidos do solo calculados após o cultivo da soja.....	53
4.2.2.1. Efeito da compactação dentro das doses de gesso+MSC	53
4.2.2.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação....	55
4.2.3. Efeito dos tratamentos na porosidade total do solo, calculada com densidade do solo, obtida através da leitura no aparelho de raios gama após o cultivo da soja	56
4.2.3.1 Efeito das doses de Gesso+MSC dentro de níveis de compactação.....	57
4.2.3.2 Efeito dos níveis de compactação dentro de doses de gesso+MSC.....	59
4.2.4. Efeito dos tratamentos no conteúdo volumétrico de ar(PLAAP) de água(POAAP) do solo, calculados após cultivo da soja.....	62

4.2.4.1. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC.....	62
4.2.4.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro de níveis de compactação.....	66
4.3. Efeito dos tratamentos nas frações granulométricas do solo.....	68
4.3.1. Fração areia	68
4.3.2. Fração silte	71
4.3.3. Efeito das doses de gesso+MSC nos teores de argila dispersa em água.....	73
4.3.4. Efeito dos tratamentos na fração argila dispersa em solução de hidróxido de sódio 0,1N	79
4.3.5. Efeito dos tratamentos doses de gesso+MSC e da compactação no grau de floculação	80
4.4. Efeito dos tratamentos doses de gesso+MSC de níveis de compactação na condutividade hidráulica do solo saturado	84
4.4.1. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC	84
4.4.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação	90
4.5. Efeito dos tratamentos na produção de matéria	

seca da parte aérea	92
4.5.1. Efeito da compactação dentro das doses de gesso+MSC	93
4.5.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação	97
4.6. Efeito dos tratamentos no desenvolvimento ra- dicular da soja	101
4.6.1. Efeito da compactação na produção de raízes no anel superior	102
4.6.2. Efeito da compactação na produção de raízes no anel inferior do vaso	106
5. CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Características químicas do solo da camada de 10-30cm, utilizado no experimento 22
- Tabela 2 - Características físicas do solo da camada de 10-30cm, utilizado no experimento 22
- Tabela 3 - Concentrações e fontes dos elementos utilizados na adubação básica do solo. 27
- Tabela 4 - Avaliação de atributos físicos, antes do plantio da soja, de materiais de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidos a diferentes densidades do solo induzidas pela compactação, quando umedecido com 70% da capacidade campo 33
- Tabela 5 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidas a diferentes densidades do solo na camada subsuperficial, induzidas pela compactação quando umedecido com 70% da CC, antes do plantio da soja..... 34
- Tabela 6 - Equações de regressão ajustadas entre conteúdo

- volumétrico de sólidos do solo (Y_1), e de porosidade total (Y_2) em percentagem, calculados antes do cultivo da soja em função da densidade do solo do anel central do vaso (X) em g/cm^3 e de doses de gesso+MSC aplicadas na camada superficial (T), em t/ha..... 36
- Tabela 7 - Equações de regressão ajustadas entre conteúdo volumétrico de água do solo (Y_1) e de aeração (Y_2) em percentagem, calculados antes do cultivo da soja em função da densidade do solo do anel central do vaso (X), em g/cm^3 e de doses de gesso+MSC aplicadas na camada superficial (T), em t/ha ... 48
- Tabela 8 - Avaliação dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, umedecido com 70 % da C.C. e submetido a diferentes densidades do solo, pela compactação, após o cultivo da soja 43
- Tabela 9 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro umedecido com 70 % da CC, avaliadas após o cultivo da soja, e, submetido a diferentes densidade do solo da camada subsuperficial pela compactação..... 44
- Tabela 10 - Equações de regressões ajustadas dentro de densidades do solo estudadas, para valores de den-

- sidades do solo lidas no aparelho de raios gama após o cultivo da soja(Y), em função de doses da mistura gesso+MSC(X), em t/ha, aplicadas na camada superficial. 45
- Tabela 11 - Valores da diferença dos atributos físicos em amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidas a diferentes densidades do solo, induzidas pela compactação, obtidas antes e após o cultivo da soja..... 58
- Tabela 12 - Resumo das análise de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetidas a diferentes densidade do solo induzida pela compactação quando umedecido com 70% da Capacidade de campo obtidas antes e após o cultivo da soja 49
- Tabela 13 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, para valores de densidades do solo avaliadas pelo aparelho de raios gama, após a colheita da soja(Y), em g/cm^3 , em função da densidade do solo do anel central do vaso(X), em g/cm^3 52
- Tabela 14 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de Gesso+MSC estudadas, entre o conteúdo volumétrico de sólidos do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função da

	densidade do solo(X), do anel central do vaso, em g/cm ³	54
Tabela 15	- Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, para o conteúdo volumétrico de sólidos do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função de doses da mistura gesso+MSC(X), aplicadas no anel central do vaso, em t/ha	56
Tabela 16	- Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre porosidade total do solo(Y), calculada a partir da densidade do solo lida no aparelho de raios gama após o cultivo da soja, em função de doses da mistura gesso+MSC(X) aplicadas na camada superficial do vaso, em t/ha	58
Tabela 17	- Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, entre os valores de porosidade total do solo, calculada a partir da densidade do solo(Y), lida no aparelho de raios gama, após a colheita da soja, em percentagem, em função da densidade do solo(X), do anel central do vaso, g/cm ³	60
Tabela 18	- Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre o conteúdo volumétrico de água do solo(Y), em percentagem,	

	calculado após o cultivo da soja, em função das doses de gesso+MSC(X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha	63
Tabela 19 -	Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre conteúdo volumétrico de ar do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função das doses de gesso+MSC(X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha	63
Tabela 20-	Equações de regressão ajustadas dentro das doses de gesso+MSC, entre o conteúdo volumétrico de água do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função da densidade do material solo do anel central do vaso(X), em g/cm ³	67
Tabela 21 -	Equações de regressão ajustadas dentro de cada dose de gesso+MSC estudadas, entre conteúdo volumétrico de aeração do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função da densidade do material de solo do anel central do vaso(X), em g/cm ³	68
Tabela 22 -	Valores de argila dispersa em água(ARGH ₂ O), argila dispersa em hidróxido de sódio(ARGNa), silte, grau floculação(GRAUFLOC), areia muito grossa(AREMG), areia grossa(AREGR), areia média	

- (AREMD) e areia fina (AREFINA) obtidos após cultivo da soja, em amostras de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, incubadas com doses de gesso+MSC, submetidas a diferentes níveis de compactação 69
- Tabela 23 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos argila dispersa em água (ARGH₂O), argila dispersa em sódio (ARGNa), silte, grau de floculação (GRAUFLOC), areia muito grossa (AREMG) areia grossa (AREG), areia média (AREM) e areia fina (AREFINA) de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro umedecido com 70% da CC após cultivo da soja e submetidas a diferentes densidades do solo no anel central do vaso, induzidas pela compactação 70
- Tabela 24 - Valores de infiltração de água e condutividade hidráulica do solo saturado em amostras deformadas de Latossolo Vermelho-Escuro textura média, incubadas com doses de gesso+MSC e submetidas a diferentes níveis de compactação, avaliadas após o cultivo da soja..... 85
- Tabela 25 - Resumo das análise de variância da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SOLO}), produção de matéria seca da parte aérea (PMSPA) e de raízes nos anéis superiores (PRAIZ1), e inferiores

- (PRAIZ3) do vaso de plantas de soja, submetidas a diferentes níveis de compactação no anel central do vaso e doses de gesso+MSC na camada superficial 86
- Tabela 26 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC, estudadas, entre os valores de condutividade hidráulica do solo saturado, medidos após o cultivo da soja(Y), em função da densidade do solo do anel central do vaso(X), em g/cm^3 89
- Tabela 27 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre os valores de condutividade hidráulica do solo saturado(Y), medida após o cultivo da soja, em função de doses da mistura gesso+MSC(X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha 90
- Tabela 28 - Produção de matéria seca da parte aérea (PMSPA) e de raízes nos anéis superficiais (PRAIZ1) e inferior (PRAIZ3) do vaso da soja, submetidas a diferentes níveis compactação do solo no anel central e doses de gesso+MSC no anel superficial do vaso 94
- Tabela 29 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, entre produção de matéria seca da parte aérea da soja(Y), em g, em

função da densidade do material de solo do anel
central do vaso(X), em g/cm³ 95

Tabela 30 - Equações de regressão ajustadas dentro de den-
sidades do material de solo estudadas entre
produção de matéria seca da parte aérea de
soja(Y), em g, em função de doses da mistura
gesso+MSC(X) aplicadas no anel superficial do
vaso, em t/ha 99

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Esquema do vaso formado pela sobreposição de
três anéis de PVC 24

LISTA DE SÍMBOLOS

REFINA ...	Percentagem de areia fina.
AREGR	Percentagem de areia grossa.
AREMD	Percentagem de areia média.
AREMG	Percentagem de areia muito grossa.
ARGNa	Percentagem de argila dispersa em solução de hidróxido de sódio 0,1N.
CC	Capacidade de Campo.
Dp	Densidade de partícula, g/cm^3 , método do balão volumétrico.
Ds	Densidade do solo modificada, g/cm^3 (relação peso TFSE/Volume).
DsCALC ...	Densidade do solo calculada (relação entre a massa de solo utilizada e o volume fixo do anel central), em g/cm^3 .
DsRGAN ...	Densidade do solo lida no aparelho de raios gama antes do cultivo da soja, em g/cm^3 .
DsRGAN-AP .	Diferença entre as densidades do solo lidas antes e a depois do cultivo da soja pelo aparelho de raios gama, em g/cm^3 .

- DsRGAP ... Densidade do solo lida no aparelho de raios gama depois do cultivo da soja, em g/cm^3 .
- GRAUFLOC.. Grau de flocculação do solo, em percentagem.
- K_{SOLO} ... Condutividade hidráulica do solo saturado no solo do anel central do vaso, em cm/s.
- MSC Massa seca de crotalária, em t/ha.
- MSOLAN .. Massa sólida do anel central do vaso, em percentagem, antes do cultivo da soja.
- MSOLAN-AP. Diferença entre os conteúdos volumétricos de sólidos do solo no anel central do vaso, calculados antes e depois do cultivo da soja, em percentagem.
- MSOLAP ... Matéria sólida do anel central do vaso, em percentagem, depois do cultivo da soja.
- N. C..... Níveis de compactação do solo no anel central do vaso.
- PLAAN Poros livres de água no anel central do vaso, em percentagem, antes do cultivo da soja
- PLAAN-AP.. Diferença entre os conteúdos volumétricos de sólidos do solo no anel central, em percentagem, calculados antes e depois do cultivo da soja
- PLAAP Poros livres de água no anel central do vaso, em percentagem, depois do cultivo da soja
- PMSPA Peso da matéria seca da parte aérea, em g.
- POAAN Poros ocupados com água no anel central do vaso, em percentagem, antes do cultivo da soja
- POAAN-AP.. Diferença entre conteúdos volumétricos de sólidos

- do solo no anel central do vaso, em percentagem calculados antes e depois do cultivo da soja,
- POAAP Poros do solo ocupados com água, no anel central do vaso, depois do cultivo da soja, em percentagem.
- PRAIZA1 .. Peso seco de raízes no anel superior do vaso, em g.
- PRAIZA3 .. Peso seco de raízes no anel inferior do vaso, em g.
- PtCALAN .. Porosidade total calculada no solo do anel central do vaso, antes do cultivo da soja em percentagem.
- PtCALAN-AP. Diferença entre a porosidade total do solo no anel central do vaso, calculadas antes e depois do cultivo da soja em percentagem.
- PTFSA Peso da terra fina seca ao ar, em g.
- VANEL Volume do anel central do vaso, em dm^3 .

EFEITO DE DOSES DE GESSO+MASSA SECA DE CROTALÁRIA E DE NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO EM ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO

Autor: ELIAS NASCENTES BORGES

Orientador: Dr. FRANCISCO LOMBARDI NETO

RESUMO

Estudou-se em casa-de-vegetação o efeito de doses da mistura gesso+massa seca de crotalária(MSC) e de níveis de compactação, em alguns atributos físicos de camada compactada de solo, antes e após cultivo da soja e, na produção de matéria seca da parte aérea e de raízes. Utilizou-se para tal, amostra de Latossolo Vermelho-Escuro álico textura média, do município de Uberlândia, MG. Os vasos utilizados, foram constituídos por colunas de PVC, formadas pela sobreposição de três anéis de 15 cm de diâmetro e altura de 5 cm para o anel central e o inferior e 12,5 cm para o anel superior, unidos por fita adesiva.

O anel superior recebeu material de solo corrigido, adubado e previamente homogeneizado com doses de gesso+MSC. No anel central foi introduzido material de solo sem correção química e submetido a diferentes níveis de compactação (densidades de 1,32; 1,47; 1,62 e 1,77 g/cm³). O anel inferior do vaso continha material de solo sem tratamento prévio.

Após compactação da amostra de solo no anel central da coluna, por meio de uma prensa hidráulica, o bloco foi submetido ao aparelho de raios gama para determinação da densidade.

Quarenta e cinco dias após a germinação da soja, foram determinados: peso de matéria seca da parte aérea, peso de matéria seca de raízes, densidade do solo pelo aparelho de raios gama, análise granulométrica, argila dispersa em água e condutividade hidráulica do solo saturado, no anel central da coluna.

A análise e interpretação dos dados possibilitaram constatar que a aplicação das doses gesso+MSC provocou reduções lineares nos valores: densidade do solo, conteúdos volumétricos de sólidos e de água; argila dispersa em água; argila dispersa em solução de hidróxido de sódio e no grau de dispersão. Por outro lado foi constatado aumentos nos valores de porosidade total calculada; pseudo-silte, grau de floculação, conteúdo volumétrico de macroporos.

A produção de matéria seca da parte aérea da soja decresceu com o aumento das doses de gesso+MSC quando as densidades da camada subsuperficial eram de 1,62 e 1,77 g/cm³,

contudo, esta produção não foi influenciada quando as densidades eram de 1,32 e 1,47 g/cm³.

Não houve crescimento de raízes quando a densidade do solo da camada subsuperficial foi maior do que 1,62g/cm³.

EFFECT OF APPLICTION OF GYPSUM+*Crotalaria juncea* DRY MATTER AND
COMPACTION LEVEL ON PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE DARK-RED LATOSOL
(Oxisol)

Author: ELIAS NASCENTES BORGES

Adviser: Dr. FRANCISCO LOMBARDI NETO

SUMMARY

This reserch was conducted under greenhouse conditions, with the objective of studying the effects of the application of different levels of the mixture gypsum plus dry matter of *Crotalaria juncea* (CDM) on some physical attributes of compacted layers of a coarse-silty of dak-red latosol (Oxisol), before and after a soybean cropping, as well as on the plants dry matter yield of root and shoot.

A greenhouse experiment was conducted as a randomized complete-block design, in which the experimental units

were constituted of PVC pots assembled by the stacking of three rings put together with scotch tape.

The upper ring was filled with fertilized and corrected soil, previously homogenized with the mixture gypsum + CDM. The middle ring received soil uncorrected, without fertilization and submitted to different levels of compaction (bulk densities of 1.32, 1.47, 1.62 and 1.77 g/cm³). Compaction was attained thorough a hydraulic press and bulk densities were checked in a gamma-ray apparatus. The bottom ring contained untreated soil.

Fourty-five days after soybean germination, the following variables were determined: shoot dry matter, root dry matter, soil bulk density (through the gamma-ray instrument), granulometric analysis, water-dispersed clay and saturated hydraulic conductivity of the soil in the inner ring.

The data obtained demonstrated that the treatment with gypsum plus CDM promoted linear reductions in the following parameters: values of bulk densities, solid and aqueous soil fractions by volume, water-dispersed clay, sodium-hidroxyde-dispersed clay and general degree of dispersion. The same treatments caused increments on the following atributes: total calculated porosity, pseudo silt content, clay flocculation degree, volumetric pore content and aeration. Shoot dry matter drecreased with the application of the gypsum + CDM treatments when the subsurface bulk densities were 1.62 e 1.77 g/cm³. No

effect was found when such densities were 1.32 e 1.47 g/cm³. There was no growth root when the subsurface soil bulk density was greater that 1.62 g/cm³.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 20% da extensão do seu território constituído por solos sob vegetação de cerrado (EMBRAPA, 1978) que, graças a rápida evolução das pesquisas na Ciência Agronômica, transformaram-se em áreas de grande potencial para produção de alimentos. Contudo, após alguns anos sob utilização intensiva, vem-se verificando, nestes solos, rápida degradação das propriedades físicas, com reflexos negativos na produção, produtividade agrícola e na conservação desse recurso natural.

A pulverização do solo, com movimentação vertical de partículas e subsequente formação de camada compactada subsuperficialmente (12 a 25 cm de profundidade) proporcionam drástica redução na macroporosidade. Esta redução além de favorecer a formação de um ambiente redutor, com possibilidade de provocar o aparecimento de elementos em níveis tóxicos às plantas, compromete a infiltração de água e a penetração das raízes, tornando estes solos mais susceptíveis à erosão. Alguns

pesquisadores, dentre os quais MONTOVANI (1987), atribuem a gênese dessa camada compactada ao uso excessivo de máquinas, implementos agrícolas e ao preparo do solo fora da faixa ideal de umidade. Outros pesquisadores, tem destacado, neste processo, o efeito da alta taxa de dispersão de argila provocada, seja pela rápida oxidação da matéria orgânica (RESENDE, 1982), e/ou pelas intensas calagens e adubações que recebem esses solos, como mostrado por ROSA JÚNIOR (1984) e SUMNER (1992).

A substituição do alumínio trocável (trivalente), elemento de poder flocculante nos solos sob vegetação de cerrado, por cálcio e magnésio (divalentes), provoca expansão na dupla camada difusa, favorecendo a dispersão de argila, que carregada pela água, deposita em profundidade, formando a camada compactada. A esta translocação vertical de argila e sua conseqüente deposição em profundidade, HUDSON (1977) denomina erosão vertical.

O rompimento dessa camada poderá ser feito mecanicamente, mediante uso de implementos agrícolas como arado ou o subsolador. Contudo, este processo não é ideal, uma vez que a compactação poderá ser restabelecida devido redução na quantidade de agentes de estruturação e cimentação dos agregados.

À adição de matéria orgânica ou mesmo do gesso nesta zona de compactação é desejável pois, além de serem descritos como condicionadores do solo, possuem efeitos benéficos na capacidade de troca de cátions (CTC), retenção de água e

disponibilidade de nutrientes às plantas, propiciando o crescimento do sistema radicular.

Assim, aproveitando possível efeito benéfico do gesso nas propriedades físicas do solo (SUMNER, 1992) e sua característica de alta mobilidade no perfil (PAVAN et al. 1984), pode-se admitir, como hipótese, que: a aplicação isolada de gesso ou em mistura com resíduos orgânicos, mesmo se a incorporação for superficial, poderá reduzir ou prevenir o processo de compactação subsuperficial, promovendo condições mais favoráveis ao desenvolvimento em profundidade do sistema radicular das culturas.

Diante do exposto, esta pesquisa teve por objetivos:

- (a) avaliar o efeito de mistura gesso + massa seca de crotalária, tendo em vista o controle ou a prevenção da compactação subsuperficial em Latossolo Vermelho-Escuro textura média;
- (b) estudar o crescimento da parte aérea e de raízes, na presença de doses da mistura gesso+massa seca de crotalária e de níveis de compactação da camada subsuperficial
- (c) estudar possíveis alterações nos atributos físicos: densidade do solo, infiltração de água, dispersão e floculação de argila, introduzidas pela compactação com e sem a adição da mistura gesso+massa seca de crotalária.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os solos sob vegetação de cerrado, em sua condição natural, têm sido descritos por diversos pesquisadores como possuidores de boas propriedades físicas, principalmente com relação à estrutura e densidade (LOPES, 1984).

Estas características físicas desejáveis devem-se ao alto grau de floculação e agregação causado pela presença de elementos de maior valência, como alumínio, ferro e manganês (RUSSEL & RUSSEL, 1964) e aos altos teores de matéria orgânica (RESENDE, 1982). No entanto, tem-se observado que essas propriedades desejáveis tendem a desaparecer quando estes solos são colocados em produção agrícola, sendo comum a formação de uma camada compactada subsuperficial (CINTRA & MIELNICZUCK, 1983 e COSTA et al., 1984).

Aliado às diversas causas de compactação como chuva, trânsito de animais, veículos, máquinas e implementos (LAL, 1976; CASSEL et al., 1978 e MONTOVANI, 1987), recentemente tem-se acrescentado o efeito da excessiva calagem e adubação,

necessários aos solos de cerrado para torná-los produtivos (ROSA JÚNIOR, 1984; JUCKSCH, 1987 e SUMNER, 1992).

PEELE et al. (1938), estudando o efeito da calagem na erodibilidade de solos lateríticos, descreve que a adição de calcário a nível de campo reduziu a permeabilidade do solo e provocou efeito dispersante dos agregados, causando dessa maneira maior susceptibilidade à erosão.

Estudando o efeito adsorção de cátions nas propriedades físicas de solos tropicais constituídos principalmente de caulinita e óxidos de ferro, AHMED et al. (1969) observaram que após saturação com íons de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ ou com a combinação destes, os limites de plasticidade não variaram em função da natureza da saturação, contudo a percentagem de agregados estáveis e a condutividade hidráulica foram afetadas pelos quatro cátions, na seguinte ordem: $\text{Ca}^{2+} = \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, sugerindo que uma aplicação pesada de adubo potássico poderá degradar a estrutura do solo.

GUPTA et al. (1984) verificaram que o aumento da alcalinidade do solo pelo efeito sódico (razão de adsorção de sódio - RAS entre 5-100 $\mu\text{mol}^{-1/2}$), com pH variando de 6,0 a 10,8; aumentou a taxa de dispersão de argila. Variando de 5 a 40 % a quantidade da argila caulinita em mistura com areia, HALLSWORTH (1963) observou que a migração da argila, através da coluna, aumentava com valores crescentes de pH e decrescia com a quantidade de argila caulinita.

Estudos de MOURA FILHO & BUOL (1972) permitiram observar que num Latossolo Roxo, originalmente sob vegetação de cerrado, após 15 anos de cultivo, a macroporosidade diminuiu de 25% para 12% e o teor de argila diminuiu de 13% para 7% no horizonte superficial, enquanto que, subsuperficialmente, estes percentuais aumentaram em torno de 8%. Observação semelhante foi feita por ROSA JÚNIOR (1984), constatando em um Latossolo Roxo fase cerrado, com calagem excessiva, a porcentagem de argila total diminuía e a dispersa em água aumentava na camada superficial, ocorrendo o inverso em camadas subsuperficial, com o aparecimento de uma camada compactada entre 10 e 25 cm de profundidade.

Na falta de aparelhos e/ou métodos mais adequados para caracterizar e/ou quantificar a compactação, a densidade do solo tem sido o parâmetro mais utilizado para tal, embora esta varie com uma série de características do solo como: teor de matéria orgânica, textura e estrutura do solo.

BLAKE (1965) e VIEIRA (1978) comentam que a densidade do solo além de fornecer informações seguras sobre o estado de compactação, está intimamente relacionada com a difusão de gases, condutividade hidráulica, disponibilidade de nutrientes, estado de oxidação/redução, os quais são considerados fatores de impedimento à penetração de raízes e de predisposição do solo à erosão.

A interação compactação/água/ar no solo influencia a resistência oferecida pelo solo à penetração de raízes, disponibilidade de água e nutrientes. Assim, BORGES et al. (1987), observaram que à medida que se compactava o solo, além da resistência física à penetração de raízes, a água prontamente disponível à planta diminuía, embora a quantidade volumétrica desta aumentasse. Esse fato deve-se a compactação que transfere a água para os microcapilares onde, além de ficar retida com maior força, torna-se não acessível às raízes devido ao pequeno diâmetro dos poros.

GRABLE (1966) e CAMARGO (1983) mostram que um desbalanceamento da relação água/oxigênio/gás carbônico, pode induzir a produção de substâncias tóxicas para os vegetais, alterações no pH e na disponibilidade de nutrientes. Como esta relação é dependente da porosidade, alterando-a com a compactação, modifica-se também o ambiente próximo às raízes.

VOMOCIL & FLOCKER (1961), estudando as relações entre espaço poroso e compactação, verificaram que uma redução de 90% no espaço poroso restringia o crescimento vegetal por deficiência de oxigênio, excesso de gás carbônico e presença de elementos em níveis tóxicos devido ao ambiente redutor.

A influência da camada compactada subsuperficial na absorção, concentração de nutrientes na parte aérea e, conseqüentemente, sobre o crescimento vegetal ainda não está bem definida.

Autores como ROSEMBERG & WILLITS (1962); CINTRA & MIELNICZUCK (1983) e BORGES et al. (1987) observaram maior concentração de nutrientes na parte aérea e maior produção de matéria seca quando era aplicada uma leve compactação. Estes pesquisadores afirmam que isto ocorre graças a um melhor arranjo das partículas e conseqüente aumento do volume de solo e água explorados pelas raízes.

No entanto, pesquisadores como LABANAUSKAS et al. (1968); CASTILLO et al. (1982) observaram morte das raízes, com menor concentração dos principais elementos essenciais, provocando com isto menores produções de matéria seca. A morte de raízes estava associada ao ambiente redutor introduzido pela deficiência de oxigênio, excesso de água e gás carbônico. PHILLIPS & KIRKHAM (1962) conseguiram reduzir parcialmente esse problema pela aplicação de maiores doses de fertilizantes e oxigenação da camada compactada.

Tem-se constatado, em muitos casos, que a restrição ao crescimento de raízes em profundidade não se deve somente à presença de impedimentos de natureza mecânica tais como a compactação e suas conseqüências (CASSEL, 1980 e CINTRA & MIELNICZUCK, 1983), mas também à presença de alumínio tóxico, pobreza em bases e baixos valores de CTC (RIOS & PEARSON, 1964; RITCHEY et al., 1982a; RITCHEY et al., 1982b; NEVES, 1983; ADAMS & MOORE, 1983 e SILVA et al., 1984).

FOY (1974) esclarece que a presença de alumínio e manganês em grande quantidade, além de competir com os cátions essenciais pelos sítios de troca das raízes, alteram a permeabilidade da membrana citoplasmática, interferindo sobre a nutrição das plantas.

Os efeitos tóxicos do alumínio sobre as plantas são vários e se manifestam de formas complexas (JACKSON, 1967 e FOY, 1974). Esse cátion tem efeito direto sobre o metabolismo, causando inibição de desenvolvimento celular, impedindo assim o crescimento de raízes (CLARKSON, 1969).

Em solos pobres e ácidos, como os de cerrado, a correção e a fertilização são práticas obrigatórias (LOPES, 1984 e FREIRE et al., 1984). Contudo, o uso intensivo dessas práticas tem-se restringido à camada superficial, condicionando o crescimento de raízes em um pequeno volume de solo, tornando as plantas susceptíveis aos veranicos, os quais são de ocorrência comum nas regiões de cerrado (EMBRAPA, 1976; EMBRAPA 1978; EMBRAPA, 1981).

Para eliminar esses efeitos negativos à produção, é necessário que não só as camadas superficiais sejam adequadas ao desenvolvimento das raízes como também as camadas mais profundas do solo. Desse modo, para que não ocorra restrição ao aproveitamento de água e nutrientes em profundidade, há necessidade de corrigir tanto os impedimentos de natureza química como os físicos.

Um grande número de pesquisadores discutem a contribuição do gesso na redução do alumínio tóxico, melhoria do suprimento de água e nutrientes, através das camadas mais profundas do solo, às plantas. Resposta à aplicação de gesso agrícola tem mostrado ser mais expressiva em regiões onde é comum a ocorrência de déficit hídrico prolongado (COCHARANE & AZEVEDO, 1982).

CARVALHO et al. (1985) observaram que a aplicação de 6 t/ha de gesso agrícola atrasou a senescência das folhas causada pelos veranicos, traduzindo em aumentos reais de 22% na produção de grãos, em relação à parcela sem gesso agrícola.

O estudo da interação do gesso com o solo através da especiação química, em meio complexo como o solo, é trabalhoso, acessível praticamente por meios computacionais (RAIJ, 1992). Grande número de reações como floculação, precipitação, hidrólise, formação de complexo, troca e pareamento iônico entre os íons do sulfato de cálcio com o alumínio e outros constituintes do solo já foram identificadas, diminuindo a toxidez de alumínio (PAVAN, 1986).

NOBLE & SUMNER (1989) encontraram que para uma atividade fixa de alumínio de 80 μM , variação na atividade de cálcio fornecido sob forma de gesso, de 625 μM a 10.000 μM , reduziu o Al^{3+} de 20,3 μM para 6,3 μM ; $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ de 6,45 μM para 1,99 μM ; $\text{Al}(\text{OH})^+$ de 10,10 μM para 3,17 μM . Estas espécies química são consideradas altamente tóxicas às plantas.

Por outro lado o AlSO_4^+ , espécie química não tóxica às plantas, cresceu de 21,2 μM para 37,7 μM . Neste experimento, a alongação de raízes variou de 86 mm quando aplicou 625 μM de cálcio, para 217 mm com 10.000 μM de cálcio.

SHAINBERG et al. (1989) estabeleceram várias hipóteses para a melhoria de camadas subsuperficiais com o uso do gesso. Segundo esses autores, não há dúvida de que a redução de elementos tóxicos às plantas como o Al^{3+} e Mn^{2+} , bem como a adição de bases e enxofre estão envolvidos. Estes pesquisadores discutiram possíveis mecanismos pelos quais a toxidez do alumínio é reduzida, destacando: (a) efeito da auto-calagem, proposta inicialmente por REEVE & SUMNER (1972) e comprovada por FARINA & CHANNON (1988) e SHAINBERG et al. (1989), a qual envolve essencialmente a troca de ligantes de OH^- por SO_4^{2-} nas superfícies dos sesquióxidos, seguida de precipitação do Al^{3+} com os OH^- liberados; (b) co-adsorção de SO_4^{2-} e Al^{3+} , sugerida por SUMNER et al. (1986), com precipitação de um ou mais sulfatos básicos de alumínio que são estáveis em condições de solos ácidos. Segundo HUE et al. (1985), quando o SO_4^{2-} é adsorvido especificamente à superfície da argila, este é capaz de aumentar a densidade de cargas negativas que, por sua vez, levaria a uma adsorção do Al^{3+} , diminuindo sua atividade em solução; (c) formação do par iônico AlSO_4^+ , de alta mobilidade no solo, proposta por PAVAN et al. (1982) e PAVAN et al. (1984), reduzindo a toxidez do alumínio por retirá-lo da zona de absorção pela

raiz. Com base nos mecanismos sugeridos acima, redução do alumínio tóxico seria possível através da utilização de sais de reação neutra como os cloretos e sulfatos de cálcio, de magnésio e de potássio (RITCHEY et al., 1983 e PAVAN et al., 1984). Entre os sais de reação neutra, PAOLINELLI et al. (1986), propõem o uso do gesso agrícola pois, além de apresentar baixo custo adiciona enxofre ao solo.

PAVAN et al. (1984) verificaram que, após a aplicação do gesso em solos ácidos, ocorriam várias reações de precipitação e dissolução, culminando com variações do pH, CTC, atividade individual de outros íons e associações de compostos.

REEVE & SUMNER (1972), visando comparar a velocidade de movimentação de alguns cátions fornecidos por diversos sais, observaram que num oxissolo o gesso foi muito mais eficiente na movimentação de bases do que o Ca(OH)_2 e o CaCO_3 , reduzindo inclusive o teor de Al trocável presente nas camadas mais profundas do solo.

Conquanto o gesso agrícola apresente movimentação intermediária em relação aos outros sais de reação neutra, RITCHEY et al. (1980) e SOPRANO (1986) observaram alguma perda de K, Ca e Mg para fora da zona de exploração das raízes. Para minimizar esse efeito, tem-se recomendado a mistura do gesso ao calcário dolomítico (EMBRAPA, 1981). Contudo, apesar das evidências positivas do uso do gesso, o número de trabalhos avaliando doses e proporções de mistura com outros

condicionadores de solo, como a matéria orgânica, são ainda reduzidos.

A cada dia maior ênfase é dada ao gesso como condicionador das propriedades físicas do solo. SUMNER (1992) acredita que são vários os agentes de desagregação e dispersão de argilas. Mesmo uma forte chuva em um solo descoberto pode causar várias alterações nas propriedades físicas do solo quando a concentração de eletrólito agregante está baixa. Neste caso, o autor acredita que a redução da dispersão de argilas e a obstrução da porosidade pode ser drasticamente reduzidas espalhando gesso na superfície após o preparo do solo e antes da próxima chuva, para suprir, neste caso, o eletrólito necessário à boa floculação.

MILLER (1987); MILLER & SCIFRES (1988) e WARRINGTON et al. (1989) trabalhando com aplicação de gesso em alfissolos, ultissolos e inceptissolos encontraram aumento na taxa de infiltração de água até de 5 vezes mediante o uso do gesso, quando comparado ao tratamento controle. As perdas de solos foram reduzidas de até 4 vezes, na presença do gesso. A concentração de sedimentos argilosos no extrato aquoso foi reduzida em até 2 vezes pela presença do gesso, evidenciando desse modo, grande poder floculador do gesso. Contudo, ROTH & PAVAN (1991) observaram que para um oxissolo da região de Brasília, o uso do gesso reduziu a taxa de infiltração de água de 37,7 mm/h para

25,6 mm/h, enquanto a concentração de sedimentos argilosos aumentou de 0,89 g/l para 1,17 g/l.

SUMNER (1992), acredita que, para o caso do oxissolo, o gesso de fato reduziu a taxa de infiltração devido ao menor poder floculante do Ca^{2+} quando comparado ao Al^{3+} , originalmente presente em altas concentrações. Essa hipótese encontra suporte no trabalho de ROTH & PAVAN (1991) os quais verificaram que, com a correção do pH para 6,0; mediante calagem, a taxa de infiltração reduziu de 37,7 mm/h para 11,8 mm/h e a concentração de sedimentos aumentou de 0,98 g/l para 2,48 g/l, quando na presença do gesso.

HOWELL (1987) afirma que em países como Israel, Georgia e Austrália, o gesso é usado comercialmente para prevenir o encrostamento do solo e a dispersão de argila.

Quando o encrostamento era subsuperficial, em solos intensamente intemperizados, SUMNER et al. (1990) demonstraram que a aplicação de gesso na superfície reduziu a resistência à penetração de uma agulha cônica projetada para simular o comportamento das raízes em camadas endurecidas. Neste caso, os pesquisadores acreditam que o gesso agiu diretamente, na floculação da camada subsuperficial, e indiretamente, melhorando o enraizamento que resultou em maior agregação. Medidas da quantidade de argila dispersa e da condutividade hidráulica em solos com camadas subsuperficiais compactadas foi feita por Chaing citado por SUMNER (1992), em amostras de ultissolos,

observando que a quantidade de argila dispersa era significativamente inferior na solução com gesso quando comparado a percolação de água pura. A condutividade hidráulica também foi melhorada pelo uso do gesso.

Com relação à utilização de matéria orgânica (M.O.) misturada ao gesso agrícola, visando uma possível adição da mesma em profundidade, a pesquisa ainda não possui resultados conclusivos. Contudo, devido aos benefícios introduzidos no solo pela adição de matéria orgânica, esta deve ser uma possibilidade a ser analisada.

O desenvolvimento da estrutura do solo está inicialmente sob a ação do fenômeno da dispersão-floculação que, por sua vez, está relacionado com o balanço das cargas elétricas do solo. OADES (1984) afirma que tanto a dispersão-floculação como a estabilidade dos agregados são influenciadas pela presença da matéria orgânica do solo. DONG et al. (1983), estudando a dispersão de vários alfissolos e molissolos, encontraram significativa relação inversa entre o conteúdo de matéria orgânica e a dispersão de argila, indicando que o aumento do conteúdo de matéria orgânica poderá aumentar a estabilidade dos agregados nos solos minerais.

Em solos de clima tropical e subtropical, ricos em óxidos de ferro e alumínio e em matéria orgânica, como os latossolos em geral, os oxi-hidróxidos e a M.O. são determinantes na formação de agregados estáveis (STEVENSON, 1982). Para esse

autor, a ação específica das substâncias orgânicas é função de sua atuação como agente na coesão das partículas de argila através de pontes de hidrogênio, ligações físicas por forças de Van der Waals, substâncias gelatinosas, hifas de fungos e raízes microscópicas de plantas, que podem circundar partículas do solo, formando agregados estáveis.

Além da natureza do cátion saturante, da presença e solubilidade dos sais em excesso e de fatores biológicos (ISLAM & HOSSAIN, 1954 e MARTIN et al., 1955), tem-se constatado enorme influência dos minerais de argilas, óxidos de ferro e hidróxido de alumínio e da M.O. na formação e estabilidade dos agregados (ALLINSON, 1973).

O fenômeno da floculação e dispersão de argila é muito influenciado pelo ponto de carga zero do solo (PCZ) e pH do solo. Estes, por sua vez, são influenciados pelo teor de matéria orgânica.

GILLMAN (1974) observou que, da subsuperfície até 30 cm de profundidade, ocorria abaixamento do PCZ decorrente da redução da matéria orgânica, o que teria provocado dispersão de argila. Na superfície do solo, onde o teor de matéria orgânica é maior, o PCZ igualou-se ao pH do solo e nenhuma dispersão de argila foi verificada. Contudo, OADES (1984) observou que a presença de substâncias orgânicas com balanço de carga negativa favorece a dispersão das partículas do solo de duas maneiras: (1) ligando a metais di e trivalentes, reduzindo suas concentrações na solução

do solo e (2) aumentando a carga líquida negativa do solo e, conseqüentemente, a espessura da dupla camada difusa.

STRICKLING (1951) observou variação sazonal na estabilidade dos agregados provocada pela deposição e decomposição de matéria orgânica da cultura da soja.

SALOMAN (1962) observou que os agregados eram maiores quando a relação C/N era maior que 13. A matéria orgânica rica em nitrogênio é rapidamente decomposta (FAHAD et al. 1982), e por isso menos efetiva na estruturação do solo (YAACOB & BLAIR, 1981).

Estudos conduzidos por ELSON & LUTZ (1940), em solos lateríticos, evidenciaram que a qualidade da matéria orgânica é mais importante do que sua quantidade para formação de agregados estáveis, essenciais para promover maior infiltração de água no solo. Estes pesquisadores concluíram que ácidos húmicos e sesquióxidos de ferro e alumínio são mais efetivos do que humatos de cálcio e de magnésio para a agregação estável. Neste estudo foi possível observar ainda decréscimo na agregação com a prática da calagem e da adubação com superfosfato.

KONONOVA (1961) esclarece que somente o conhecimento do carbono orgânico no solo não é suficiente para caracterizar o efeito da matéria orgânica sobre as propriedades físicas e químicas do solo.

Quando a matéria orgânica do solo é totalmente decomposta, destroem-se as ligas orgânicas que unem as partículas do solo e, portanto, a estrutura é desmanchada, tornando o solo

sem agregação (RUSSEL & RUSSEL, 1964 e PRIMAVESI, 1984). Quanto maior ou mais intensa for a decomposição do material morto, tanto maior será seu efeito agregante sobre o solo. Por isso, o estrume de curral bem curtido não tem o mesmo efeito agregante que restos orgânicos adicionados ao solo para posterior decomposição (KIEHL, 1985).

Tanto o húmus como a matéria orgânica poderão promover vários benefícios ao solo, destacando-se (a) efeito desintoxicante, evitando prejuízos às plantas logo após à adição de fertilizantes, quando sua disponibilidade torna-se elevada, superando em duas ou mais vezes as concentrações exigidas pelas plantas. Desse modo, solos húmosos suportam adubações mais pesadas sem apresentar contudo efeitos tóxicos (BOGDANOVIG et al., 1964); (b) efeito regulador do pH do solo. Em solos ácidos ricos em alumínio e manganês trocáveis, restos orgânicos em decomposição podem formar complexos com estes, evitando o efeito tóxico e ácido (DUCHAUFOR & JAQUIM, 1966).

PRIMAVESI (1984) cita que a excreção de substância alcalinas e bases como cálcio, magnésio e potássio pelos microorganismos do solo, além de elevar os valores de pH do solo, são ainda importantes para agregação. Já em solos alcalinos, a matéria orgânica promove sua acidificação por melhorar a infiltração de água, facilitando a lixiviação de sais, e produzindo ácido carbônico.

O uso prolongado de alguns fertilizantes químicos poderá afetar, de modo adverso, a estrutura de alguns solos, levando-os à maior dispersão de argila e, conseqüentemente, ao adensamento subsuperficial, com redução de alguns fatores de produção e maior risco de erosão (RUSSEL & RUSSEL, 1964). Estes pesquisadores comentam ainda que a adubação mineral, por mais completa que seja, não consegue manter a produtividade do solo se não houver retorno sistemático da matéria orgânica.

MIYASAKA et al. (1966), enfatizam que o papel principal da matéria orgânica no solo não é fornecer nutrientes, já que a adubação mineral poderá suprir essa necessidade, mas sim fornecer ao solo substâncias agregantes, ativar a vida microbiana, aumentar a capacidade de troca e o poder tampão do solo.

Em solos fase cerrado, normalmente constituídos de argila de baixa atividade, uma das principais limitações químicas à sua utilização mais intensiva é a sua baixa capacidade de troca catiônica (CTC), que condiciona alta taxa de lixiviação dos fertilizantes adicionados, mesmo sob pequena intensidade de chuva.

GROHMANN (1972) afirma que tanto a CTC como a superfície específica nos solos tropicais são altamente influenciados pela presença da matéria orgânica, a qual contribui, em média, com 27,5 % da superfície específica no horizonte A e com 11% no horizonte B.

Estudando a contribuição global da M.O. na CTC de alguns solos tropicais RAIJ (1969) encontrou valores médios de 74 e 35 % para horizontes superficiais e subsuperficiais respectivamente.

LONGO (1982) trabalhando com três Latossolos Vermelho-Escuros Álicos A moderado provenientes de Viçosa, MG, Jequetinhonha, MG e da Amazônia, verificou redução da CTC, da ordem de 32,5; 44,8 e 66,5 %, respectivamente, após oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de condução do experimento e solo utilizado

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, do Departamento de Ciências do Solo da USP/ESALQ, Piracicaba, SP, utilizando massa vegetal seca de crotalária finamente moída (MSC) como adubação verde; gesso, obtido como subproduto da fabricação do ácido fosfórico na unidade de produção da FOSFERTIL em Uberaba, MG e amostra de Latossolo Vermelho-Escuro Álico, A moderado textura média fase cerrado subcaducifólio relevo suave, coletada na camada 10-30 cm na Fazenda Experimental Água Limpa da Universidade Federal de Uberlândia- Uberlândia/MG.

Esta unidade de solo, formada pelo retrabalhamento de sedimentos do arenito de Bauru, ocorre no Triângulo Mineiro sob o clima Aw da classificação de Koppen e representa cerca de 60% da extensão dessa região (EMBRAPA/SNLCS 1982).

A amostra após coletada, foi homogeneizada, passada em peneira de 2 mm e depois submetida a análise química e física (Tabelas 1 e 2) conforme EMBRAPA/SNLCS (1979).

Tabela 1 - Características químicas do material de solo da camada de 10 - 30 cm, utilizado no experimento

pH	P	K	Al	Ca	Mg	H+Al	SB	V	m	M.O.

H ₂ O	mg/dm ³	-----mmol _C /kg-----					-----%-----		-g/kg	
4.2	0,2	0,3	8,5	0,4	0,2	21,0	0,9	4,91	85,2	7,2

Tabela 2 - Características físicas do material de solo da camada de 10 - 30 cm, utilizado no experimento

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	CC ¹	Ds

-----g/kg-----				--%--	g/cm ³
50,0	550,0	214,0	186,0	18,68	1,34

¹Conforme COSTA (1983)

3.2. Aparelho compactador e coluna para compactação

Para efetuar a compactação do solo foi utilizada prensa hidráulica marca Sewa, capacidade de 100 toneladas, com disco de ferro de diâmetro igual ao do anel (15 cm) acoplado à cabeça do

hidráulico. O recipiente utilizado para compactação foi um anel cilíndrico de PVC de 5 cm de altura e 15 cm de diâmetro

Durante a compactação, o anel de PVC foi introduzido no interior de um protetor construído com chapa de ferro de 10mm de espessura, com formato de "meia cana", para aumentar a resistência do anel de PVC à deformação ou à ruptura quando submetido à carga da prensa hidráulica.

3.3. Caracterização do vaso utilizado

Cada vaso, com capacidade de 3,53 dm³, foi constituído pela sobreposição de três anéis de PVC de 15 cm de diâmetro e altura de 12,5 cm para o anel superior, sendo 2,5 cm destinados a retenção da irrigação e 5 cm para os anéis intermediário e inferior, unidos por fita adesiva após a aplicação dos tratamentos. O fundo do vaso foi vedado por uma placa de isopor perfurada (Figura 1).

3.4. Aparelho de raios gama

Para avaliação da densidade do solo, depois da compactação no anel central do vaso, antes e depois do cultivo da soja, foi utilizado o aparelho de raios gama, marca ORTEC que emite radiações de 660Kev (Césio 137) e de 60Kev (Amerício) instalado no CENA/USP

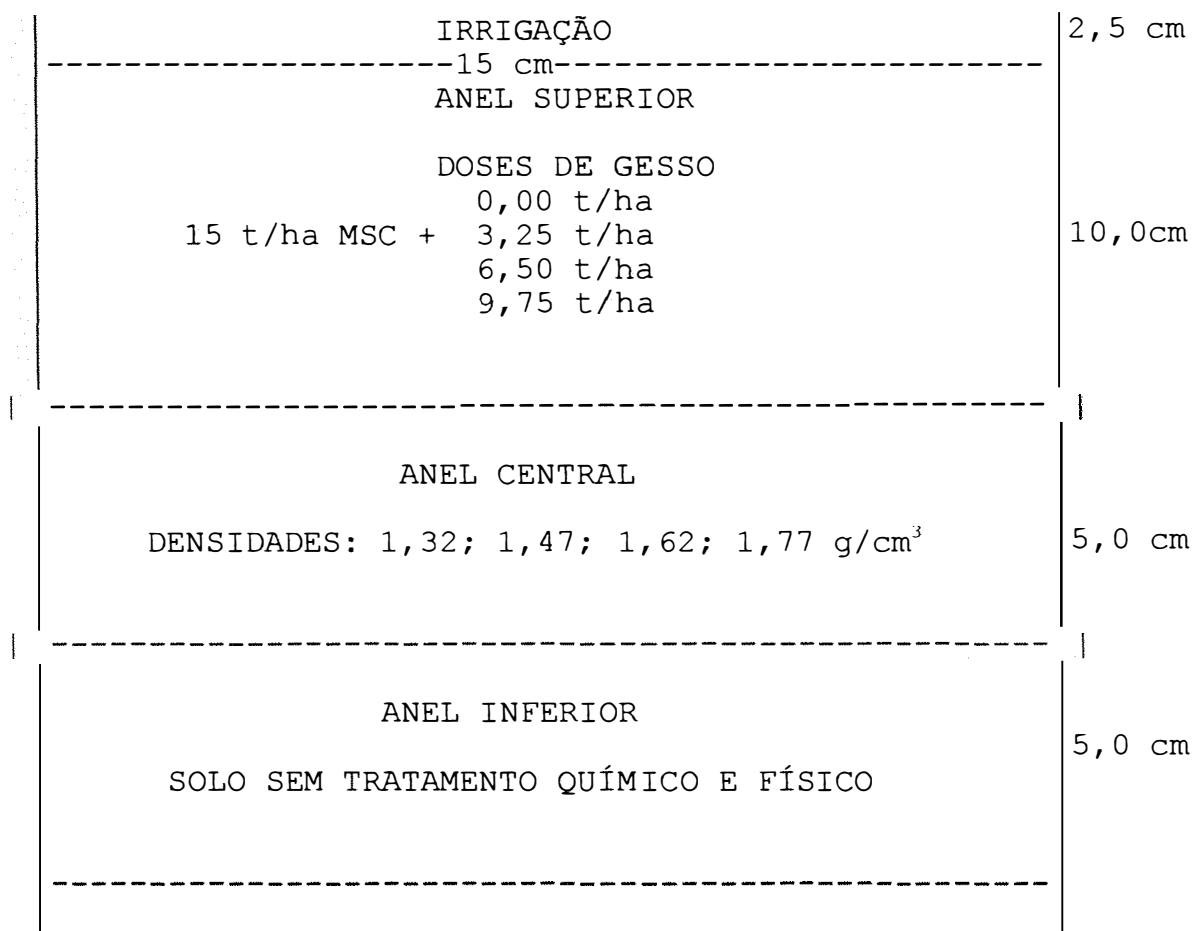


Figura 1. Esquema do vaso formado pela sobreposição de três anéis de PVC

3.5. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com os tratamentos constituídos de um fatorial 4x4, com quatro repetições, correspondendo, respectivamente, a quatro valores de densidade do solo: 1,32 (normal); 1,47; 1,62 e 1,77 g/cm³, aplicadas no anel intermediário de uma coluna constituída pela sobreposição de três anéis de PVC; quatro níveis da mistura

gesso/massa seca de crotalária (0,00; 3,25; 6,50; e 9,75 t/ha de gesso previamente homogeneizado ao equivalente a 15 t/ha de matéria seca de crotalária), incorporado ao material do solo no anel superior da coluna.

As análises estatísticas foram realizadas segundo PIMENTEL GOMES (1978), utilizando, para testar os efeitos de tratamentos, análises de regressões e Teste de Tukey produzidas pelo programa estatístico SANEST.

3.6. Metodologia de implantação

3.6.1. Correção e adubação da amostra de solo

Na metade da amostra do material de solo, foi aplicado o equivalente a 2,5 t/ha de um calcário constituído pela mistura carbonato de cálcio + carbonato de magnésio P.A. na relação estequiométrica 4:1 em dose equivalente a 1 x NC (necessidade de calagem), tomando-se como base para cálculo a curva de incubação para obter pH 6,0. Seguiu-se um período de incubação de aproximadamente 20 dias com umidade mantida próxima a 80% da capacidade de campo.

Após estabilização do pH, o material de solo foi secado ao ar, homogeneizado e passado em peneira de 4 mm para receber adubação de correção e produção (Tabela 3)

3.6.2. Estabelecimento dos tratamentos no anel superior

Em todas as colunas, o primeiro anel (2,5 - 12,5 cm de altura a partir do ápice), com capacidade de 1,77 dm³, recebeu material de solo corrigido, adubado, sem compactação e homogeneizado com as doses de 0,00(zero); 3,25; 6,50 e 9,75 t/ha de gesso previamente misturado ao equivalente a 15 t/ha de massa seca de crotalária moída.

3.6.3. Estabelecimento dos tratamentos no anel central

O segundo anel (5 cm de altura) recebeu diferentes quantidades de material de solo objetivando obter as densidades de: 1,32(normal); 1,47; 1,62 e 1,77 g/cm³.

A compactação do material de solo, quantificada pela densidade do solo e aplicada somente no anel central de cada coluna, foi obtida fixando o volume do anel em 0,88 dm³ e determinando-se previamente a quantidade de material de solo seco ao ar, com 1,5 % de umidade na base de peso seco (1169,1; 1301,0; 1432,8 e 1563,7g) necessária para alcançar os diferentes valores de densidade.

Tabela 3 - Concentrações e fontes dos elementos utilizados na adubação básica do solo.

Elemento	Concentração -- (mg/dm ³) --	Fontes	Quantidade de Reagente/l (solução estoque) ¹
P	280,30	KH ₂ PO ₄	17,0 g
		NH ₄ H ₂ PO ₄	20,1 g
K	147,70	KH ₂ PO ₄	-
N	100,00	(NH ₄) ₂ SO ₄	4,1 g
		NH ₄ H ₂ PO ₄	-
S	33,50	(NH ₄) ₂ SO ₄	-
		CuSO ₄ .5H ₂ O	116,4 mg
		ZnSO ₄ .7H ₂ O	586,5 mg
Fe	1,55	FeCl ₃ .6H ₂ O	252,1 mg
Mn	3,66	MnCl ₂ .4H ₂ O	439,5 mg
Cu	1,39	CuSO ₄ .5H ₂ O	-
Zn	0,20	ZnSO ₄ .7H ₂ O	16,8 mg
B	0,82	H ₃ BO ₃	156,3 mg

¹Foram aplicados 45ml da solução estoque para cada sub-amostra de 1,5 kg de solo.

Cada sub-amostra a ser compactada foi umedecida com uma quantidade de água equivalente a 70 % de sua capacidade de campo

e, mediante o uso da prensa hidráulica, no Departamento de Engenharia Florestal USP/ESALQ, foram aplicadas as cargas de 0,00; 5,94; 9,05 e 13,58 MPa para alcançar os diferentes níveis de compactação desejados.

Obtidos os tratamentos da compactação, os anéis com os diferentes valores de densidade do solo foram submetidos ao espectrômetro de raios gama para determinação da densidade do solo pelo método da atenuação de radiação gama, antes de efetuar o plantio da soja (DsRGAN), conforme metodologia proposta por Davidson et al. (1963) e citada por REICHARDT (1965) e FERRAZ (1974).

Para verificar possíveis efeitos dos tratamentos de gesso+MSC e da compactação no movimento de bases e outros nutrientes, o anel inferior recebeu o material de solo sem tratamento prévio.

3.6.4. Formação do vaso e condução da cultura

Uma vez avaliados os valores de densidade do solo pelo método de radiação gama, o anel central foi unido a um anel superior de 1,77 dm³, contendo material de solo homogeneizado com as doses de 0,00; 3,25; 6,50 e 9,75 t/ha de gesso previamente misturado ao equivalente a 15 t/ha de massa seca de crotalária moída e a um anel inferior de 0,88 dm³ contendo o material de solo sem tratamento prévio. Cada coluna assim constituída, foi

incubada para decomposição da matéria orgânica por um período de 50 dias, com umidade próxima à capacidade de campo (CC.)

Após o período da incubação, cada coluna recebeu quatro sementes de soja variedade IAC-8, com poder de germinação de 80%, do Banco de Sementes do Departamento de Fitotecnia USP/ESALQ, reduzindo-se a duas plantas por coluna, após desbaste.

Durante condução do experimento, foram realizadas irrigações em quantidade equivalente à capacidade de campo.

Decorridos 45 dias do início da emergência, as plantas de soja foram fotografadas e em seguida cortadas rente ao solo, secas em estufa de ventilação forçada e pesadas. As colunas foram desmontadas e os blocos de solo do anel central, com teor de umidade próxima daquela proposta para realização da compactação, foram novamente submetidos ao espectrômetro de raios gama para determinação da densidade do solo, pelo método da atenuação da radiação gama, após cultivo da soja (DsRGAP). As raízes dos anéis superior e inferior foram coletadas, lavadas e secas, para obtenção do peso de matéria seca.

3.6.5. Determinações laboratoriais

Desmontada a coluna com os tratamentos, o material de solo do anel central foi analisado quanto à:

- condutividade hidráulica do solo saturado - determinada pelo método descrito por KLUTE & DIRKSEM (1986), através da expressão:

$$K = Q \cdot L / (A \cdot \Delta H)$$

onde: K = coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica do solo saturado (cm/s);

A = Área da seção transversal da amostra (cm²);

Q = Volume de água medido (cm³);

L = Comprimento da amostra (cm);

ΔH = Diferença de potencial hidráulico entre o topo e a base da carga hidráulica (cm).

Nessa expressão, K tem dimensões de velocidade (L/T).

A carga hidráulica constante sobre a amostra foi mantida através de um frasco, com o mesmo princípio de Mariotte, e seu valor igual à diferença entre a altura da mangueira de dreno da coluna e a da amostra.

Para evitar infiltração de água, no contato bloco de material de solo/coluna de PVC, as laterais do vaso foram parafinadas.

- Densidade de partícula (D_p), distribuição das frações granulométricas e argila dispersa em água foram determinadas conforme EMBRAPA/SNLCS (1979).

- Porosidade total do solo, antes do cultivo (PtCALAN) e após cultivo da soja (PtCALAP); conteúdo de matéria sólida do anel central, antes do cultivo (MSOLAN) e após cultivo da soja (MSOLAP); poros ocupados com água, antes do plantio (POAAN) e após cultivo da soja (POAAP) e poros livres de água, antes do plantio (PLAAN) e após cultivo da soja (PLAAP) foram calculados

utilizando os valores de densidade do solo obtidos no aparelho de raios gama antes (AN) e após o cultivo (AP) da soja, e da densidade de partículas, através de fórmulas desenvolvidas na teoria da mecânica de solo, como segue:

a) Determinações efetuadas antes do plantio da soja:

$$PtCALAN = (Dp - DsRGAN) / Dp * 100;$$

$$MSOLAN = 100 - PtCALAN;$$

$$POAN = 0,70 * C.C. * DsRGAN;$$

$$PLAAN = PtCALAN - POAAN;$$

b) Determinações efetuadas após cultivo da soja:

$$PtCALAP = (Dp - DsRGAP) / Dp * 100;$$

$$MSOLAP = 100 - PtCALAP;$$

$$POAAP = 0,70 * CC * DsRGAP;$$

$$PLAAP = PtCALAP - POAAP$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Alterações físicas do solo avaliadas antes do cultivo da soja

A amostra de solo utilizada apresentou-se com nível de compactação(NC) zero, ou seja, na densidade do solo de $1,32 \text{ g/cm}^3$ OS atributos físicos estão próximos daqueles considerados ideais para o desenvolvimento de plantas, propostos por FRIED & BROESART (1967), quais sejam: valores médios de 49,47 % para sólidos(MSOLAN) e de 50,80 % para a porosidade total(PtCALAN). Desse espaço poroso, 17,3 % estavam ocupados com água e 33,2% com ar (Tabela 4).

Estes valores diferem daqueles sugeridos por KIEHL (1985). Este pesquisador, afirma que o espaço poroso de 50 % em volume, deve ser distribuído em 2/3 para retenção de água e 1/3 para armazenamento de ar.

Tabela 4 - Avaliação de atributos físicos, antes do plantio da soja, de materiais de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidos a diferentes densidades do solo induzidas pela compactação, quando umedecido com 70% da capacidade campo

Gesso ¹	N.C. ²	VANEL ³	PTFSA ⁴	DsCALC ⁵	DsRGAN	Dp ⁶	PtCALAN	MSOLAN	POAAN	PLAAN
-t/ha-		--cm ³ -	--g---	-----g/cm ³ -----			-----% V -----			
	0	883,64	1186,9	1,32	1,31	2,67	50,84	49,16	17,17	33,68
	1	883,64	1320,7	1,47	1,46	2,67	44,95	55,05	19,23	25,72
0,00	2	883,64	1454,6	1,62	1,64	2,67	38,20	61,80	21,59	16,60
	3	883,64	1588,5	1,77	1,75	2,67	34,27	65,73	22,95	11,33
	0	883,64	1186,9	1,32	1,30	2,67	51,20	48,80	17,04	34,15
	1	883,64	1320,7	1,47	1,45	2,67	45,60	54,40	19,00	26,58
3,25	2	883,64	1454,6	1,62	1,65	2,67	37,97	62,03	21,66	16,32
	3	883,64	1588,5	1,77	1,74	2,67	34,42	65,27	22,90	11,53
	0	883,64	1186,9	1,32	1,33	2,67	50,15	49,85	17,41	32,73
	1	883,64	1320,7	1,47	1,49	2,67	44,02	55,98	19,55	24,48
6,50	2	883,64	1454,6	1,62	1,65	2,67	38,10	61,90	21,63	16,44
	3	883,64	1588,5	1,77	1,73	2,67	35,45	64,55	22,55	12,88
	0	883,64	1186,9	1,32	1,33	2,67	49,90	50,10	17,49	32,41
	1	883,64	1320,7	1,47	1,46	2,67	45,12	54,88	19,16	25,96
9,75	2	883,64	1454,6	1,62	1,62	2,67	39,20	60,81	21,24	17,93
	3	883,64	1588,5	1,77	1,73	2,67	35,22	64,78	22,63	12,58

¹Dose de gesso misturada à matéria seca de crotalária em quantidade equivalente a 15 t/ha

²Níveis de compactação efetuada no anel central do vaso

³Volume do anel central do vaso de PVC

⁴Terra fina seca ao ar, contendo 1,5 % de umidade em peso

⁵Relação entre massa de solo utilizada (TFSA) e o volume fixo do anel central

⁶Densidade de partícula, método do balão volumétrico e álcool etílico.

Tabela 5 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidas a diferentes densidades do solo na camada subsuperficial, induzidas pela compactação quando umedecido com 70% da CC, antes do plantio da soja.

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L	-----QM-----				
		DsRGAN	PtCALAN	MSOLAN	POAAN	PLAAN
Blocos	3	0,000121	0,000018	0,16981	0,02072	0,30925
Gesso+MSC	(3)	0,000473	0,000006	0,66142	0,08080	1,20452
Efeito Linear	1	0,000139	0,000019	0,18788	0,02298	0,34283
Efeito Quadr.	1	0,000118	0,000017	0,16646	0,02023	0,30277
Ind. da regressão	1	0,001159	0,000155	1,62992	0,19920	2,96796
Densidade (Ds)	(3)	0,552456**	0,077585**	77,67790**	94,8089**	1414,195**
Efeito Linear	1	1,635777**	0,22978**	2328,110**	284,1925**	4239,086**
Efeito Quadr.	1	0,012349**	0,001712**	1,92278	0,23410	3,48835
Ind. regressão	1	0,009212**	0,001260**	0,00077	0,00009	0,00146
Gesso+MSC X Dens.	9	0,010656	0,000172	1,66459	0,20314	3,03097
RESÍDUO	45	0,000831	0,000116	1,16858	0,14263	2,12771
C.V %		1,87	2,56	1,87	1,87	6,64

** , * Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F

Com a introdução dos níveis de compactação, pode ser observado (Tabela 4) que o conteúdo volumétrico de sólidos avaliado antes do plantio (MSOLAN), aumentou, em média, de 49,47 % para 65,16 %, enquanto que o espaço poroso total (PtCALAN), percentagem em volume, reduziu, em média, de 50,52 % para 34,84 %. A compactação, portanto provocou inversão na relação poros ocupados com ar (PLAAN)/poros ocupados com água (POAAN), (Tabela 4).

Nota-se que a compactação, executada para obter à densidade do solo de $1,77 \text{ g/cm}^3$ reduziu os poros livres de água (poros de aeração) de 33,24 % para 12,08 %, equivalendo a uma redução de 175%. Quanto ao conteúdo volumétrico de água, este aumentou de 17,28 % para 22,76 %, equivalendo a um aumento de 32%. Esta distribuição é, portanto, distante daquela considerada adequada para o crescimento de plantas, proposta como sendo de 25% para cada fração (FRIED & BROESART, 1967).

4.1.1. Efeito dos tratamentos no conteúdo volumétrico de sólidos e na porosidade total do solo

O relacionamento entre conteúdo volumétrico de sólidos e de porosidade total, com os níveis de compactação, quantificados pela densidade do solo, avaliados antes do cultivo da soja, seguiram comportamento linear inverso entre si. Ou seja, enquanto o conteúdo volumétrico de sólidos (Y_1) cresceu

linearmente com a compactação, a porosidade total (Y_2) decresceu na mesma proporção, uma vez que, a equação quadrática ajustada apresentou pontos de mínimos fora do intervalo de densidades utilizadas neste estudo (Tabelas 4, 5 e 6).

Tabela 6 - Equações de regressão ajustadas entre conteúdo volumétrico de sólidos do solo (Y_1) e de porosidade total (Y_2) em percentagem, calculados antes do cultivo da soja em função da densidade do solo no anel central do vaso (X) em g/cm^3 e de doses de gesso+MSC aplicadas na camada superficial (T), em t/ha.

Equações de Regressão	r	Ponto de mínimo g/cm ³
$\hat{Y}_1 = 3,62 + 34,81X$	0,99**	-
$\hat{Y}_1 = \bar{Y} = 57,83$	-	-
$\hat{Y}_2 = 1,52 - 1,07X + 0,23X^2$	0,99**	2,32
$\hat{Y}_2 = 0,97 - 0,36X$	0,99**	-
$\hat{Y}_2 = \bar{Y} = 42,17$	-	-

** Significativo a 1%.

O aumento no conteúdo volumétrico de sólidos, pela aplicação da compactação, afetou a distribuição dos poros por tamanho. A pressão mecânica exercida sobre os agregados pela compactação possivelmente provocou a ruptura destes, facilitando a aproximação das partículas.

A consequência imediata, é a redução da porosidade total, pela diminuição dos poros maiores, com aumento no volume de poros menores. Estas condições, poderão proporcionar a

formação de um ambiente redutor, com drásticas alterações nos processos dinâmicos e biológicos do solo.

Esta observação é semelhante à encontrada por ALVARENGA (1993). Este pesquisador ao compactar manualmente um Latossolo Vermelho-Amarelo, para obter a densidade de $1,40 \text{ g/cm}^3$ observou que a macroporosidade reduziu de 31 % para 10 %.

SILVA (1984) também trabalhando com compactação de solo, observou que os poros maiores de 0,005 mm sofriam reduções na sua quantidade, enquanto que os menores que este tamanho sofriam incrementos.

Paralelamente à redução na porosidade total calculada, houve aumento no conteúdo volumétrico de água (POAAN), e drástica redução no espaço de aeração do solo (PLAAN), conforme dados da Tabela 4. Análises de regressão desses dados possibilitaram estabelecer que tanto o aumento no conteúdo de água como a redução do espaço de aeração possuíam comportamentos lineares, com $0,99^{**}$ de ajuste em ambos os casos (Tabelas 4, 5 e 7).

O aumento linear do conteúdo volumétrico de água e a conseqüente redução no espaço de aeração, em decorrência da compactação (Tabela 7), poderá ter importantes implicações no suprimento de oxigênio, disponibilidade de nutrientes e elementos em níveis tóxicos às plantas e aos microorganismos.

Outra preocupação com a redução da aeração do solo e o aumento do conteúdo volumétrico de água, como observado (Tabela 4), refere-se ao fato deste aumento na retenção de água pela

compactação não implicar em maior disponibilidade desta para as plantas. A força com que essa água é retida na microporosidade criada pela compactação é superior à capacidade que as plantas de soja possuem para extraí-la.

Tabela 7 - Equações de regressão ajustadas entre conteúdo volumétrico de água do solo (Y_1) e de aeração (Y_2) em percentagem, calculados antes do cultivo da soja em função da densidade do solo no anel central do vaso (X), em g/cm^3 , e de doses de gesso + MSC aplicadas na camada superficial (T), em t/ha

Equações de Regressão	r
$\hat{Y} = \bar{Y} = 20,21$	-
$\hat{Y} = 1,26 + 12,18X$	0,99**
$\hat{Y} = \bar{Y} = 21,96$	-
$\hat{Y} = 0,95 - 0,47X$	0,99**

** Significativo a 1%.

Dentro desse contexto, VOORHEES (1977) observou que o trigo, quando cultivado em solo com camada subsuperficial compactada, apresentava-se mais suscetível ao déficit hídrico do que aquele cultivado em solo não compactado.

4.1.2. Efeito dos tratamentos na densidade do solo avaliada através da leitura no aparelho de raios gama, antes do plantio da soja

Na descrição metodológica, os níveis de compactação foram propostos para atingir as densidades de 1,32; 1,47; 1,62 e 1,77 g/cm³. Para tal, fixou-se o volume do anel e variou a massa de TFSE. Observando a Tabela 4, percebe-se que as densidades lidas pelo aparelho de raios gama, encontram-se próximas aos valores inicialmente propostos. A análise de variância da diferença entre a densidade proposta metodologicamente e a lida no aparelho de raios gama antes do cultivo da soja, indicou não haver significância entre estes dois valores.

Os dados de densidade do solo, avaliados pelo aparelho de raios gama, relativos aos tratamentos de compactação e doses de gesso+MSC (Tabela 4) foram submetidos a análise de variância e de regressão (Tabelas 5 e 6).

Percebe-se que não houve efeito de gesso+MSC. Isto aconteceu porque este tratamento foi aplicado somente no anel superior do vaso e posterior à leitura no aparelho de raios gama.

Quanto ao efeito da compactação(X) nos valores de densidade do solo(Y), avaliado através da leitura no aparelho de raios gama, antes do plantio da soja, verifica-se o ajuste de uma equação de regressão com comportamento quadrática, $\hat{Y} = - 1,39 + 2,87X - 0,62X^2$ ($r = 0,99^{**}$). Como a derivada primeira dessa

equação fornece como ponto de máximo a densidade de $2,32 \text{ g/cm}^3$, fez-se opção pela equação linear, $\hat{Y} = 0,07 + 0,95X$, com $r = 0,99^{**}$. Esta equação indica que a densidade do solo foi sempre crescente com os níveis de compactação aplicados.

Esse resultado é semelhante aos encontrados por BAVER et al. (1972) e VIEIRA (1978). Estes, observaram que qualquer pressão sobre a superfície do solo pode provocar ruptura dos agregados, aproximação das partículas e conseqüentemente um aumento na densidade do solo.

4.1.3. Efeito dos tratamentos na porosidade total do solo, calculada com os valores de densidade do solo, obtidos através da leitura no aparelho de raios gama, antes do plantio da soja

De maneira semelhante ao que aconteceu com os valores de densidade do solo lidos no aparelho de raios gama, observa-se que a porosidade total calculada não foi influenciada pelas misturas gesso+MSC. Entretanto, observa-se o efeito altamente significativo para os níveis de compactação (Tabelas 4, 5 e 6).

A análise de variância da regressão (Tabela 5) indica que há um efeito significativo pelo teste t para a regressão quadrática (Tabelas 5 e 6). Contudo, a constatação de que o ponto de mínima porosidade total encontra-se fora do intervalo desse estudo, ou seja, para densidade de $2,32 \text{ g/cm}^3$, optou-se por uma

regressão linear com $0,99^{**}$ de ajuste. Observando a equação linear, $\hat{Y} = 0,97 - 0,36X$, percebe-se que a porosidade total calculada, encontra-se próximo à porosidade original do solo no intercepto da curva e esta vai diminuindo a uma taxa de aproximadamente 10 %, com os níveis crescentes de compactação conforme demonstra o coeficiente angular da equação. Desse modo, a pressão de 5,94; 9,05 e 13,58 MPa, a que foram submetidas as amostras de solos para obter as densidades de 1,47; 1,62 e 1,77 g/cm³, certamente foram suficientes para promover a ruptura dos agregados, aproximar as partículas primárias do solo, reduzindo sua porosidade.

Segundo GROHMANN (1975), qualquer alteração na estrutura original do solo, seja pelo manejo incorreto durante uso agrícola, pisoteio de animais, ou qualquer outra força externa, irá provocar diminuição do espaço poroso, com surgimento de camada compactada.

4.2. Alterações em alguns parâmetros físicos do solo avaliados depois do cultivo da soja

Os dados obtidos e as análises estatísticas dos atributos: densidade do solo; conteúdo volumétrico dos sólidos; porosidade total; conteúdo volumétrico de água e de aeração, após o cultivo da soja, encontram-se nas Tabelas 8 e 9.

4.2.1. Efeito dos tratamentos na densidade do solo avaliada através da leitura do aparelho de raios gama após o cultivo da soja

A aplicação dos níveis de compactação e de doses da mistura gesso+MSC afetaram significativamente os valores da densidade do solo, obtidos através das leituras no aparelho de raios gama, após colheita da soja (Tabelas 8 e 9).

A existência de interação significativa entre compactação e gesso+MSC indica que estes dois tratamentos tiveram comportamento diferenciados dentro de seus respectivos níveis (Tabelas 8 e 9). Assim, o estudo foi desdobrado em efeito de doses de gesso+MSC dentro de cada nível de compactação e efeito dos níveis de compactação dentro de cada dose de gesso+MSC.

4.2.1.1. Efeito das doses de gesso+MSC dentro de níveis de compactação

A densidade do solo, avaliada através do aparelho de raios gama, após o cultivo da soja, reduziu linearmente com as doses de gesso+MSC, dentro dos níveis de compactação 0(zero); 2 e 3, ou seja, para as densidades de $1,32 \text{ g/cm}^3$; $1,62 \text{ g/cm}^3$ e $1,77 \text{ g/cm}^3$, não sendo observado efeito das doses gesso+MSC dentro da densidade de $1,47 \text{ g/cm}^3$ (Tabelas 8, 9 e 10)

Tabela 8 - Avaliação dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, umedecido com 70 % da C.C. e submetido a diferentes densidades do solo, pela compactação, após o cultivo da soja

Gesso ¹	N.C. ²	VANEL ³	PTFSA ⁴	DsCAL ⁵	DsRGAP ⁶	Dp ⁷	PtCALAP	MSOLAP	POAAP	PLAAP
t/ha		--cm ³ --	--g---	-----g/cm ³ -----			-----% V -----			
0,00	0	883,64	1186,9	1,32	1,31	2,67	51,02	48,97	17,11	33,91
	1	883,64	1320,7	1,47	1,43	2,67	46,47	53,51	18,69	27,79
	2	883,64	1454,6	1,62	1,61	2,67	39,77	60,23	21,04	18,72
	3	883,64	1588,5	1,77	1,63	2,67	38,92	61,07	21,33	17,58
3,25	0	883,64	1186,9	1,32	1,26	2,67	52,90	47,10	16,45	36,43
	1	883,64	1320,7	1,47	1,41	2,67	47,09	52,88	18,47	28,63
	2	883,64	1454,6	1,62	1,58	2,67	40,57	59,41	20,75	19,83
	3	883,64	1588,5	1,77	1,62	2,67	39,27	60,73	21,21	18,04
6,50	0	883,64	1186,9	1,32	1,25	2,67	53,17	46,81	16,35	36,83
	1	883,64	1320,7	1,47	1,40	2,67	47,42	52,56	18,36	29,06
	2	883,64	1454,6	1,62	1,51	2,67	43,45	56,58	19,76	23,65
	3	883,64	1588,5	1,77	1,59	2,67	40,32	59,69	20,85	19,45
9,75	0	883,64	1186,9	1,32	1,22	2,67	54,30	45,69	15,96	38,33
	1	883,64	1320,7	1,47	1,44	2,67	45,87	54,12	18,90	26,96
	2	883,64	1454,6	1,62	1,54	2,67	42,34	57,65	20,14	22,19
	3	883,64	1588,5	1,77	1,53	2,67	42,65	57,37	20,04	22,57

¹Dose de gesso misturada a matéria seca de crotalária em quantidade equivalente a 15 t/ha

²Níveis de compactação efetuada no anel central

³Volume do anel central do vaso de PVC

⁴Terra fina seca ao ar contendo 1,5 % de umidade em peso

⁵Relação entre a massa de material de solo utilizada e o volume fixo do anel central

⁶Densidade do solo no anel central, lida no aparelho de raios gama

⁷Densidade de partícula, método do balão volumétrico e álcool etílico

Tabela 9 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro umedecido com 70 % da CC, avaliadas após o cultivo da soja, e submetido a diferentes densidades da camada subsuperficial compactada

FONTE DE. VARIAÇÃO	G.L	QM				
		DsRGAP	PtCALAP	MSOLAP	POAAP	PLAAP
Blocos	3	0,00063	0,00008	0,8864	0,1081	1,6142
Gesso+MSC X Ds	9	0,00334*	0,00047*	4,6899*	0,5723**	8,5398*
Gesso+MSC	3	0,00124**	0,00155**	17,3911**	2,123**	31,6697**
Gesso+MSC d/Ds 1,32	(3)	0,00528**	0,00074**	7,4239**	0,9062*	13,5195*
Efeito Linear	1	0,01460**	0,00204**	20,5345**	2,5070**	37,3942**
Efeito Quadr.	1	0,00041	0,00006	0,5764	0,0702	1,0501
Ind. da regressão	1	0,00083	0,00012	1,1609	0,1414	2,1141
Gesso+MSC d/Ds 1,47	(3)	0,00135	0,00019	1,9059	0,0232	4,4696
Efeito Linear	1	0,00032	0,00004	0,4554	0,0555	0,8291
Efeito Quadr.	1	0,00340	0,00047	4,7720	0,5821	8,6877
Ind. da regressão	1	0,00035	0,00005	0,4902	0,0597	0,8921
Gesso+MSC d/Ds 1,62	(3)	0,00780**	0,00111**	10,9058**	1,3375**	19,9915
Efeito Linear	1	0,01587**	0,00224**	22,3207**	2,7235**	40,6395**
Efeito Quadr.	1	0,00257	0,00036	3,6205	0,4425	6,5733
Ind. da regressão	1	0,00498	0,00073	6,7730	0,8534	12,7416
Gesso+MSC d/Ds 1,77	(3)	0,00793**	0,00113**	11,1515**	1,3611**	20,3084**
Efeito Linear	1	0,02099	0,00299**	27,5111**	3,6019**	53,7460**
Efeito Quadr.	1	0,00275	0,00039	3,8760	0,4729	7,0569
Ind. da regressão	1	0,00005	0,00000	0,0674	0,0083	0,1227
Densidade	3	0,37362**	0,05238**	525,2745**	64,1186**	956,4428**
Ds d/Gesso+MSC 0	(3)	0,09409**	0,02145**	132,0578**	16,1488**	240,8779**
Efeito Linear	1	0,26331**	0,03698**	370,2258**	45,1937**	674,1347**
Efeito Quadr.	1	0,00973*	0,00139*	13,6437*	1,6660*	24,8352*
Ind. da regressão	1	0,00940*	0,00128*	12,9983*	1,5868*	23,6639*
Ds d/Gesso+MSC 3,25	(3)	0,11298**	0,00228**	158,8380**	19,3878**	289,2571**
Efeito Linear	1	0,31973**	0,04493**	449,5985**	54,8715**	818,6625**
Efeito Quadr.	1	0,01417**	0,00203**	19,9094**	2,4297**	36,2464**
Ind. da regressão	1	0,00513	0,00071	7,0662	0,8621	12,8625
Ds d/Gesso+MSC 6,50	(3)	0,08796**	0,01715**	123,6487**	15,0944**	225,1443**
Efeito Linear	1	0,25871**	0,03616**	363,8173**	44,4122**	662,4522**
Efeito Quadr.	1	0,00500	0,00069	6,9868	0,8533	12,7217
Ind. da regressão	1	0,00011	0,00002	0,1420	0,0174	0,2591
Ds d/Gesso+MSC 9,75	(3)	0,08857**	0,01672**	124,5483**	15,2046**	226,7829**
Efeito Linear	1	0,21166**	0,02960**	297,5792**	36,3272**	541,8456**
Efeito Quadr.	1	0,05393**	0,00761**	75,8336**	9,2583**	138,0801**
Ind. da regressão	1	0,00029	0,00002	0,2323	0,0283	0,4229
RESÍDUO	45	0,00149	0,00012	2,0954	0,2558	3,8156
C.V %		2,65	3,20	2,64	2,65	7,44

** , * Significativos 1, 5 % de probabilidade pelo teste F

Desse modo, pode ser evidenciado a viabilidade do uso da mistura gesso+MSC não só para melhorar a fertilidade do solo, mas também de alguns atributos físicos do solo.

Tabela 10 - Equações de regressão ajustadas dentro de densidades do solo estudadas, para valores de densidades do solo lidas no aparelho de raios gama, após o cultivo da soja(Y), em função de doses da mistura gesso+MSC(X), em t/ha, aplicadas na camada superficial.

Densidade	Equações	r
g/cm ³		
1,32	$\hat{Y} = 1,30 - 0,0083X$	0,96**
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} \text{ } 1,42 \text{ g/cm}^3$	-
1,62	$\hat{Y} = 1,60 - 0,0087X$	0,82**
1,77	$\hat{Y} = 1,64 - 0,010X$	0,94**

** Significativo a 1 %.

As equações de regressão ajustadas, com seus respectivos coeficientes de regressão, encontram-se na Tabela 10.

Comparando os valores dos interceptos das equações ajustadas, ou seja, a densidade do solo para a qual não houve aplicação da mistura gesso+MSC, com os valores de densidades determinadas pelo aparelho de raios gama antes do plantio da soja (Tabela 4), pode observar que a simples presença da soja, ou mesmo as práticas de manejo efetuadas, como as irrigações, as

quais proporcionam formação de ciclos de umedecimento e secagem foram suficientes para reduzir, de modo significativo, os valores da densidade do solo, em todos os níveis de compactação.

BOUYOUCOS (1924); RUSSEL (1938); ROVIRA & GREACEN (1957); HORN & DEXTER (1989) verificaram aumento do estado de agregação e sua estabilidade devido aos ciclos de umedecimento e secamento de solos cultivados.

Diversos pesquisadores, entre os quais, CHILDS (1969); MIRREH & KETCHESON (1972); GUMBS & WARKENTIN (1972) e VIEIRA (1978) admitem que a densidade do solo é um parâmetro que pode ser utilizado não só para indicar o estado de compactação, como também dimensões quantitativas da condutividade hidráulica, estado de aeração, disponibilidade de água, grau de flocculação das partículas, porosidade total, os quais variam de modo inverso a este parâmetro. Desse modo, pode ser observado (Tabelas 8, 22 e 24) que, na medida em que o gesso+MSC reduziu a densidade do solo, houve aumento proporcional nos valores de aeração, porosidade do solo, grau de flocculação de argila e condutividade hidráulica do solo saturado.

O efeito significativo da mistura gesso+MSC na redução da densidade do solo, pode ainda ser evidenciado mediante observação da análise estatística da diferença entre a densidade do solo lida no aparelho de raios gama, antes da aplicação das doses de gesso+MSC, com os valores de densidade lidos no aparelho de raios gama após o cultivo da soja (Tabelas 11 e 12). A

regressão linear $\hat{Y} = 0,057 + 0,0059X$ com coeficiente de regressão de $0,85^{**}$, possibilita calcular de quanto reduz a densidade do solo para cada dose aplicada. Com aplicação de 9,75 t/ha da mistura gesso+MSC, a densidade do solo foi reduzida em $0,11 \text{ g/cm}^3$, ou seja, a densidade reduziu de $1,77 \text{ g/cm}^3$, para aproximadamente, $1,65 \text{ g/cm}^3$. Esta redução é altamente significativa, considerando que BORGES (1986) encontrou que a diferença de densidade do solo entre a ausência total e o melhor crescimento radicular, tanto da soja como do eucalipto, ocorriam no intervalo de $1,15 \text{ g/cm}^3$ e $1,25 \text{ g/cm}^3$. Neste caso, o intervalo entre os dois extremos de crescimento radicular foi de $0,10 \text{ g/cm}^3$.

Redução na resistência mecânica à penetração da agulha de cone do penetrômetro foi observada por McCRAY et al. (1991), quando o solo era lixiviado com solução de gesso+MSC ao invés de ser com água pura.

Detalhe importante, que pode ser observado pela regressão linear, é a existência de um intercepto de $0,057 \text{ g/cm}^3$. Este valor indica a redução da densidade do solo quando não houve aplicação da mistura gesso+MSC, confirmando fato anteriormente mencionado. O simples fato de se cultivar a soja, ou de irrigar os vasos provocando ciclos de umedecimento e secamento foi para suficiente reduzir de modo significativo a densidade do solo.

Tabela 11 - Valores da diferença dos atributos físicos em amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, submetidas a diferentes densidades do solo, induzidas pela compactação, obtidas antes e após o cultivo da soja

Gesso ¹	N.C. ²	DsCALC ³	DsRGAN-AP ⁴	PtCALAN-AP ⁵	MSOLAN-AP ⁶	POAAN-AP ⁷	PLAAN-AP ⁸
t/ha		g/cm ³			% V		
	0	1,32	0,01	-0,48	0,51	0,17	-3,25
	1	1,47	0,04	-1,53	1,53	0,53	-2,55
0,00	2	1,62	0,05	-1,70	1,72	0,59	-4,32
	3	1,77	0,12	-4,63	4,63	1,61	-7,33
	0	1,32	0,05	-1,73	1,69	0,59	-2,28
	1	1,47	0,04	-1,55	1,56	0,54	-2,09
3,25	2	1,62	0,07	-2,60	2,60	0,90	-3,50
	3	1,77	0,13	-4,85	4,83	1,68	-6,51
	0	1,32	0,08	-3,03	3,04	1,06	-4,09
	1	1,47	0,09	-3,43	3,40	1,18	-4,57
6,50	2	1,62	0,14	-5,35	5,34	1,86	-7,20
	3	1,77	0,13	-4,88	4,87	1,69	-6,56
	0	1,32	0,12	-4,38	4,38	1,53	-5,91
	1	1,47	0,03	-1,08	1,08	0,37	-1,45
9,75	2	1,62	0,08	-3,18	3,16	1,10	-4,26
	3	1,77	0,20	-7,40	7,41	2,58	-9,99

¹Dose de gesso misturada à matéria seca de crotalária, em quantidade equivalente a 15 t/ha

²Níveis de compactação efetuada no material de solo no anel central do vaso

³Relação entre a massa de material de solo utilizada e volume fixo do anel central

⁴Diferença entre as Densidades do solo lidas no aparelho de raios gama antes e após o cultivo da soja

⁵Diferença entre a porosidade total obtida antes e após o cultivo da soja

⁶Diferença entre matéria sólida calculada antes e após o cultivo da soja

⁷Diferença entre poros ocupados com água, obtidos antes e após o cultivo da soja

⁸Diferença entre poros livres de água, obtidos antes e após o cultivo da soja

Tabela 12 - Resumo das análises de variância dos atributos físicos de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetidas a diferentes densidades do solo induzidas pela compactação, quando umedecido com 70% de sua capacidade de campo obtidas antes e após o cultivo da soja.

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L	-----SQ-----				
		DsRGAN-AP	MSOLAN-AP	PtCALAN-AP	POAAN-AP	PLAAN-AP
Blocos	3	0,0010	1,4426	1,3794	0,1760	2,6259
Gesso+MSC	(3)	0,0117**	16,3804**	16,5573**	1,9998**	29,8196**
Efeito Linear	1	0,0297**	41,7879**	42,1951**	5,1020*	76,0763**
Efeito Quadr.	1	0,0015**	2,1119	2,3256	0,2578	3,8430
Ind. da regressão	1	0,0037	5,2413	5,1511	0,6397	9,5396
Densidade(Ds)	(3)	0,0278**	39,0792**	39,1894*	4,7694**	71,1481**
Efeito Linear	1	0,0614**	86,3886*	86,9444**	9,8802**	147,3674**
Efeito Quadr.	1	0,0214*	30,1730**	29,9756**	4,3811*	65,3739**
Ind. da regressão	1	0,0004	0,6760	0,6479	0,0467	0,7029
Gesso+MSC X Dens.	9	0,0332	46,7865	46,8394	5,7125	85,2046
RESÍDUO	45	0,0023	3,3097	3,30637	0,4040	6,0265
C.V %		56,30	56,20	56,12	57,26	56,27

** **, * - Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F

Considerando que as doses de gesso+MSC aplicadas foram previamente misturadas ao equivalente a 15 t/ha de matéria seca de crotalária, torna-se difícil distinguir qual a contribuição individual do gesso+MSC e qual a da matéria orgânica na redução dos valores de densidade do solo.

Com relação à contribuição da matéria orgânica, na melhoria do estado de agregação do solo, CURTIS & POST (1964), SAINI (1966) e JEFFREY (1970) afirmam que, em solos não cultivados, a matéria orgânica tem efeito marcante sobre a densidade do solo.

WILLIAMS (1970) observou que em solos arados e gradeados, 50 % da variação da densidade do solo poderia ser explicada pela variação no conteúdo de carbono orgânico. Este pesquisador enfatiza ainda que a matéria orgânica, além de seu efeito agregador pode afetar a densidade de partícula pela sua simples presença já que possui baixo peso específico.

Quanto ao efeito do gesso nos valores de densidade do solo, os estudos são escassos. SUMNER (1992) numa ampla revisão sobre uso do gesso como condicionador físico do solo, encontrou que em 12 solos dentre os 14 estudados, provenientes de diversas partes do mundo, o gesso aumentou a taxa de infiltração de água. Este pesquisador acredita que o aumento na condutividade hidráulica do solo deve-se ao gesso, que atuou na melhoria da agregação e redução da densidade do solo.

4.2.1.2. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC

Com relação ao efeito dos níveis de compactação aplicados, pode ser observado (Tabela 13), que as equações quadráticas ajustadas possuem pontos de máximo fora do intervalo de densidade do solo utilizado neste estudo. Desse modo, optou-se, por equações com comportamento linear. De maneira geral, as regressões ajustadas dentro de cada dose de gesso+MSC (Tabela 11) seguiram a mesma tendência da equação $\hat{Y} = 0,07 + 0,95X$, $r = 0,99^{**}$, ajustada entre densidade do solo lida no aparelho de raios gama antes do cultivo da soja e densidade do solo. Contudo, pode ser observado que as equações lineares da Tabela 11, possuem coeficientes angulares da reta menores do que esta, evidenciando a importância das doses de gesso+MSC, ou mesmo da interação entre fatores principais em reduzir a densidade convencional.

A diferença entre os valores de densidade do solo, obtida com o aparelho de raios gama, antes do plantio da soja, e a densidade do solo obtida após o cultivo (Tabela 11), submetida à análise estatística (Tabela 12), possibilita observar efeito significativo do tratamento gesso+MSC.

Tabela 13 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, para valores de densidades do solo avaliadas pelo aparelho de raios gama, após colheita da soja(Y), em g/cm³, em função da densidade do solo do anel central do vaso(X), em g/cm³.

Gesso+MSC	Equações	r	P. de máximo
t/ha			g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = -2,27 + 4,15X - 1,09X^2$	0,98*	1,90
	$\hat{Y} = 0,31 + 0,77X$	0,96*	-
3,25	$\hat{Y} = -2,95 + 4,93X - 1,32X^2$	0,99**	1,87
	$\hat{Y} = 0,17 + 0,84X$	0,97**	-
6,50	$\hat{Y} = 0,27 + 0,76X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = -5,71 + 8,66**X - 2,58X^2$	0,99**	1,68

** , * Significativos a 1 e 5 %.

Verifica-se que os dados da diferença entre densidades do solo lidas no aparelho de raios gama, antes e após o cultivo da soja(Y), em função dos níveis de compactação(X), ajustou adequadamente em uma equação quadrática: $\hat{Y} = 1,51 - 2,03X + 0,71X^2$ ($r = 0,99**$). Derivando esta equação, observa-se que a diferença entre as densidades lidas, antes e após o cultivo da soja foi mínima quando a densidade era de 1,43 g/cm³. É possível que a existência desse ponto de mínimo seja devido ao efeito

benéfico que uma leve compactação possa produzir no solo, como observado por CINTRA & MIELNICZUCK (1983).

Para valores acima desse mínimo, a diferença entre os valores de densidades obtida, antes e após o cultivo, foram crescentes, devido à predominância das alterações introduzidas, tanto pelas doses da mistura gesso+MSC como pelo crescimento da soja e manejo utilizado.

4.2.2. Efeito dos tratamentos no conteúdo de materiais sólidos do solo calculados após o cultivo da soja

Observa-se que, além da significância dos efeitos da compactação e do gesso+MSC, ocorre efeito significativo nas interações, indicando que tanto as doses de gesso+MSC como os níveis de compactação são dependentes entre si (Tabelas 8 e 9). Assim, procedeu-se ao estudo de cada fator dentro dos níveis do outro.

4.2.2.1. Efeito da compactação dentro das doses de gesso+MSC

As equações de regressão ajustadas para explicar as variações no conteúdo volumétrico de sólidos, após colheita da soja, provocadas pela compactação, apresentaram comportamento quadrático, com pontos de máximo fora do intervalo de estudo (Tabela 14). Assim, com exceção da regressão ajustada dentro da

dose de gesso+MSC de 9,75 t/ha, que mostrou efeito quadrático com ponto de máximo em 1,68 g/cm³, optou-se, para as demais regressões, pelo tipo linear, uma vez que estas também apresentam coeficientes lineares altamente significativos (Tabela 14).

Acréscimos lineares no conteúdo de sólidos era esperado, pois, ao aumentar a quantidade de massa, com a compactação, para um volume fixo do recipiente, ocorre redução do espaço poroso em benefício do volume de matéria sólida.

Tabela 14 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de Gesso+MSC estudadas, entre o conteúdo volumétrico de sólidos do solo(Y), calculado após o cultivo da soja em percentagem, em função da densidade do solo(X) do anel central do vaso, em g/cm³

Gesso	Equações	r	P. de máximo
t/ha			g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = 85,18 + 155,50X - 41,04X^2$	0,98*	1,89
	$\hat{Y} = 11,64 + 28,68X$	0,96*	-
3,25	$\hat{Y} = -110,75 + 104,81X - 49,57X^2$	0,99**	1,05
	$\hat{Y} = 6,20 + 31,61X$	0,97**	-
6,50	$\hat{Y} = 9,98 + 28,43X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = -214,26 + 324,70X - 96,76X^2$	0,99**	1,68
	$\hat{Y} = 13,98 + 25,72X$	0,97**	-

**, * Significativos a 1 e 5%.

4.2.2.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação

Quanto ao efeito das doses da mistura gesso+MSC, dentro de cada nível de compactação, sobre os valores do conteúdo volumétrico de sólidos, pode ser observado (Tabela 15), comportamento linear decrescente e significativo das doses de gesso+MSC, dentro das densidades de 1,32; 1,62 e 1,77 g/cm³. Como o volume de sólidos mais poros foi previamente fixado, antes do cultivo da soja (Tabela 4), é possível concluir que a redução linear no conteúdo volumétrico de sólidos ocorreu em benefício da porosidade total do solo. Este fato pode ser evidenciado pelos dados da Tabela 8, os quais indicam aumentos da porosidade total do solo com as doses crescentes de gesso+MSC.

Contudo, na densidade de 1,47 g/cm³ não foi constatado efeito significativo das doses de gesso+MSC. Possivelmente, as alterações provocadas pelo grande desenvolvimento radicular, quando o solo sofreu leve compactação, predominaram sobre o efeito das doses de gesso+MSC.

Profundas alterações do ambiente radicular e respostas positivas a uma leve compactação do solo foram observadas, por CINTRA & MIELNICZUCK (1983), nas culturas do trigo e da soja.

Tabela 15 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, para o conteúdo volumétrico de sólidos do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função de doses da mistura gesso+MSC(X), aplicadas no anel central do vaso, em t/ha

Densidade	Equações	r
g/cm ³		
1,32	$\hat{Y} = 48,67 - 0,31X$	0,96**
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} = 53,27$	-
1,62	$\hat{Y} = 60,06 - 0,33X$	0,82**
1,77	$\hat{Y} = 61,54 - 0,37X$	0,94**

** Significativo a 1%.

4.2.3. Efeito dos tratamentos na porosidade total do solo, calculada com a densidade do solo, obtida através da leitura no aparelho de raios gama após o cultivo da soja

Os dados obtidos e sua análise estatística (Tabelas 8 e 9) permitem observar que, tanto a aplicação da mistura gesso+MSC quanto os níveis de compactação, tiveram efeito significativo e interativo entre si, na porosidade do solo, avaliada após

experimento. Desse modo, as doses da mistura gesso+MSC comportaram de maneira diferente, dentro de cada nível de compactação e vice versa.

4.2.3.1. Efeito das doses de Gesso+MSC dentro dos níveis de compactação

As equações de regressão calculadas para a porosidade total obtida após experimento, como variável dependente, e doses da mistura gesso+MSC, como variável independente (Tabela 16), indicam comportamento linear crescente da porosidade com as doses da mistura gesso+MSC dentro das densidade de 1,32 g/cm³; 1,62 g/cm³ e 1,77 g/cm³, não observando entretanto, efeito das doses da mistura para a densidade de 1,47 g/cm³.

Este aumento da porosidade total, devido as doses de gesso+MSC reflete a redução da densidade do solo, provocada pela adição de gesso+MSC conforme item 4.2.1.1.

A diferença entre a porosidade total calculada antes do cultivo da soja e a porosidade total obtida depois do cultivo da soja, ambos com o uso do aparelho de raios gama (Tabela 11), submetida à análise estatística, indica que tanto a compactação como as doses de gesso+MSC tiveram influência, mas de modo independente, no aumento da porosidade total (Tabela 12).

O estabelecimento da equação linear: $\hat{Y} = 0,02145 + 0,0022X$, com coeficiente de regressão linear de **0,92****,

evidencia que ocorreu aumento da porosidade de maneira linear, quando doses crescentes de gesso+MSC foram aplicadas. O coeficiente de inclinação da reta ajustada, dá a dimensão de quanto aumenta a porosidade do solo para cada 1,00 t/ha da mistura aplicada.

Tabela 16 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre porosidade total do solo(Y), calculada a partir da densidade lida no aparelho de raios gama após o cultivo da soja, em função de doses da mistura gesso+MSC(X), aplicadas na camada superficial do vaso, em t/ha.

Densidades	Equações	r
g/cm ³		
1,32	$\hat{Y} = 0,51 + 0,0031X$	0,98**
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} = 46,72$	-
1,62	$\hat{Y} = 0,40 + 0,0033X$	0,91**
1,77	$\hat{Y} = 0,39 + 0,0038X$	0,97**

** Significativo a 1%.

A constatação de que gesso+MSC poderá promover aumentos na porosidade do solo é de grande importância, pois pesquisadores

como MOURA FILHO & BUOL (1972); SOMAPALA & WILLAT (1979) e CAMARGO (1983) afirmam que processos como: oxigenação do sistema radicular, condutividade hidráulica do solo, crescimento do sistema radicular, disponibilidade de nutrientes e de elementos em níveis tóxicos às plantas, são amplamente dependentes da porosidade do solo e, condicionam a produtividade vegetal. Cabe salientar, no entanto, que somente o aumento da porosidade total não é suficiente. Melhor distribuição entre tamanhos de poros deve ser considerada tão importante quanto o aumento da porosidade total.

VOMOCIL & FLOCKER (1961); BAVER et al. (1972); CAMARGO (1983) e ALVARENGA (1993) afirmam que a adequada distribuição entre macro e microporos é essencial para a eficiência de outros fatores de crescimento da planta.

A observação de que o gesso+MSC tem efeito agregante no solo com possibilidade de reverter o processo da compactação, mediante redução da densidade e melhor aeração do solo (Tabelas 8, 11, 16 e 17), reveste-se de importância, haja visto ser este produto bom fornecedor de cálcio e de enxofre, de baixo custo e grande disponibilidade juntos aos solos de que mais necessitam.

4.2.3.2. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC

As equações de regressão ajustadas entre porosidade total (Y), e níveis de compactação, quantificada pela densidade

do solo (X), dentro de cada dose de gesso+MSC, encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, entre os valores de porosidade total do solo, calculadas a partir da densidade do solo(Y), lida no aparelho de raios gama, após a colheita da soja, em percentagem, em função da densidade do solo(X), no anel central do vaso, g/cm³

Gesso	Equações	r	P. de mínimo
t/ha			g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = 1,85 - 1,56X + 0,41X^2$	0,98*	1,89
	$\hat{Y} = 0,88 - 0,29X$	0,96*	-
3,25	$\hat{Y} = 2,12 - 1,86X + 0,50X^2$	0,99**	1,86
	$\hat{Y} = 0,94 - 0,28X$	0,97**	-
6,50	$\hat{Y} = 3,15 - 0,28X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = 3,15 - 3,25X + 0,97X^2$	0,99**	1,68

** , * Significativos a 1 e 5%.

Percebe-se que dentro das doses 0,0; 3,25 e 9,75 t/ha de gesso+MSC os níveis de compactação efetuados induziram comportamento quadrático na porosidade total calculada, enquanto que, na dose de 6,50 t/ha, os níveis de compactação produziram comportamento linear. Entretanto, os pontos de mínimo, obtidos

pela derivada primeira dessas equações quadráticas, situam-se fora do intervalo de densidade estudado, nas doses 0,0 e 3,25t/ha. Este comportamento parece indicar que houve redução linear na porosidade, em relação aos níveis crescentes de compactação. Dentro desse contexto, LAWS & EVANS (1949) e MACHADO & BRUM (1978) constataram redução da porosidade total e aumento da microporosidade com a compactação ocasionada por cultivos.

BRADY (1974) salienta que, embora a porosidade seja conseqüência da estrutura do solo e nível de compactação, esta depende diretamente da textura do solo. Em solos arenosos, sem compactação, a faixa de variação da porosidade total é de 35 a 50%, enquanto que, em solos argilosos é de 40 a 60 %.

BALLESTERO (1992) observou redução significativa nos valores de porosidade total, tanto na calculada como na determinada, nos tratamentos compactados em relação ao não compactado. Este pesquisador verificou ainda que a redução da porosidade pela compactação era dependente da umidade, sendo a redução mais significativa para teores maiores de umidade.

Dentro da dose de 9,75 t/ha, os níveis de compactação induziram alterações na porosidade total do solo de maneira quadrática. O ponto de mínima porosidade é obtido quando a densidade do solo é de 1,67 g/cm³. Este resultado possivelmente pode estar relacionado a problemas ocorridos durante a condução do experimento, principalmente com aqueles relacionados à irrigação dos vasos. Devido aos níveis crescentes de compactação

na camada subsuperficial, a quantidade de água evapotranspirada não foi a mesma em todos os vasos. Assim, era comum encontrar vasos com diferentes teores de umidade no momento da irrigação, devido ao efeito capilar criado pela compactação.

4.2.4. Efeito dos tratamentos no conteúdo volumétrico de ar(PLAAP) e de água(POAAP), calculados após cultivo da soja

A aplicação da análise de variância nos dados calculados, tanto para aeração como para o conteúdo volumétrico de água, tomando-se como base o umedecimento da amostra em 13,1%, base em peso, indica efeito significativo dos fatores principais e da interação gesso+MSCXcompactação (Tabelas 8 e 9). Desse modo, cada fator foi estudado dentro dos níveis do outro.

4.2.4.1. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC

O conteúdo volumétrico de água na amostra decresceu linearmente com a aplicação das doses de gesso+MSC as densidades eram de 1,32 g/cm³; 1,62 g/cm³ e 1,77 g/cm³ (Tabelas 8, 9 e 18).

Relacionando de maneira inversa, ao conteúdo volumétrico de água, a aeração do solo cresceu linearmente com as doses de gesso+MSC dentro dos mesmos valores de densidade (Tabelas 8, 9 e 19).

Tabela 18 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre o conteúdo volumétrico de água do solo(Y), em percentagem, calculado após o cultivo da soja, em função das doses de gesso+MSC(X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha

Densidades	Equações	r
g/cm ³		
1,32	$\hat{Y} = 17,00 - 0,11X$	0,96**
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} = 18,62 \%$	-
1,62	$\hat{Y} = 20,98 - 0,11X$	0,82**
1,77	$\hat{Y} = 21,50 - 0,13X$	0,94**

** Significativo a 1%.

Tabela 19 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre conteúdo volumétrico de ar do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função das doses de gesso+MSC(X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha

Densidades	Equações	r
g/cm ³		
1,32	$\hat{Y} = 34,33 + 0,42X$	0,98**
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} = 28,12 \%$	-
1,62	$\hat{Y} = 18,96 + 0,44X$	0,91**
1,77	$\hat{Y} = 16,96 + 0,55X$	0,97**

** Significativo a 1%.

Esta observação pode ser relevante se considerar que a compactação, a nível de campo, nos latossolos fase cerrado, pode

estar reduzindo a produtividade das culturas devido ao ambiente redutor estabelecido.

Possivelmente, a redução de produção, mesmo com intensificação no uso dos fatores de produção como insumos, mão-de-obra, mecanização, sementes melhoradas, etc, não seja devido somente à resistência mecânica oferecida pela camada compactada ao desenvolvimento das raízes, mas também a um desbalanceamento na relação ar/água no solo conforme se infere dos dados apresentados na Tabela 4.

A compactação além de oferecer resistência mecânica à penetração das raízes, por diminuir o diâmetro dos poros ou torná-los mais rígidos, pode favorecer ainda a formação de ambiente de redução com possibilidade de induzir o aparecimento de elementos em níveis tóxicos e alterações na disponibilidade dos elementos essenciais.

MONTOVANI (1987) mostra que a resistência mecânica do solo compactado pelo uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas é o principal responsável pela redução da produção agrícola. Contudo, BALIGAR et al. (1975) citam que, alterações morfológicas como raízes curtas, grossas e escamosas, normalmente encontradas em solos compactados, são sinais evidentes de que um ambiente de redução está contribuindo para a diminuição da produtividade.

RUSSEL & RUSSEL (1964) e GAVANDE (1972) acreditam ser a baixa difusão de oxigênio, com acúmulo de CO₂, verificado em

solos compactados podem ser responsáveis pela redução na produção agrícola após algum tempo de uso.

MIRREH & KETCHESON (1972) consideram que o baixo crescimento vegetal em solos compactados seja conseqüência da pequena disponibilidade de água, embora o seu conteúdo volumétrico seja aumentado pela compactação, como observado neste trabalho (Tabela 4).

PHILLIPS & KIRKHAN (1962) e ROSEMBERG & WILLITS (1962) afirmam que a importância da aeração está mais relacionada com os solos argilosos. Melhoria na distribuição da porosidade para aeração e para retenção de água no solo, com aplicação de gesso+MSC, possivelmente irá possibilitar melhor desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, maior produção vegetal.

A ausência de significância para doses de gesso+MSC, tanto para o conteúdo volumétrico de água como de aeração, dentro da densidade $1,47 \text{ g/cm}^3$, possivelmente seja devida à maior interação da planta com o solo, proporcionando melhor desenvolvimento da parte aérea e radicular conforme verificado na Tabela 28.

Visando quantificar o efeito das doses de gesso+MSC nesses dois atributos do solo, efetuou-se a diferença entre a água retida na amostra antes da aplicação das doses de gesso+MSC e água contida na amostra após o cultivo a soja (Tabela 11). A análise de variância (Tabela 12), permite observar o efeito significativo somente para os efeitos principais.

O ajuste das equações lineares: $\hat{Y}_1 = 2,90 + 0,03X$, $r = 0,92^{**}$ e, $\hat{Y}_2 = 0,75 + 0,078X$, $r = 0,93^{**}$. Nestas equações \hat{Y}_1 = diferença entre os conteúdos volumétricos de aeração, após o cultivo e antes do plantio da soja e \hat{Y}_2 = diferença entre os conteúdos volumétricos de água, antes do plantio e após o cultivo da soja, e X doses de gesso+MSC, em t/ha. A presença de coeficientes angulares positivos e significativos para esses dois atributos, deixa claro a efetividade das doses de gesso+MSC em alterar estes, possibilitando uma distribuição da relação ar/água do solo mais adequada e próxima da ideal para o crescimento das plantas, mesmo para os valores mais elevados de densidade.

Quanto à proporção quantitativa entre poros ocupados com ar e poros ocupados com água, diversos padrões e proporções têm sido sugeridos. BAVER et al. (1972) mencionam que quando os poros de arejamento estão abaixo de 10 - 15% estes são insuficientes para a expansão radicular.

4.2.4.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação

Tanto o conteúdo volumétrico de água, como o de aeração sofreram variações com a compactação, dentro das doses de gesso+MSC, conforme pode ser constatado pelas Tabelas 8 e 9.

Observa-se que o ajuste de equações tipo quadráticas, embora significativas, não refletem os dados obtidos (Tabelas 20 e 21), tanto para o conteúdo volumétrico de água como para o de aeração.

Tabela 20- Equações de regressão ajustadas dentro das doses de gesso+MSC, entre o conteúdo volumétrico de água do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em porcentagem, em função da densidade do material de solo no anel central do vaso(X), em g/cm³

Gesso t/ha	Equações	r	P. de máximo g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = -29,76 + 54,34X - 14,34X^2$	0,97*	1,89
	$\hat{Y} = 4,06 + 10,02X$	0,97**	-
3,25	$\hat{Y} = -38,69 + 64,55X - 17,32X^2$	0,99**	1,86
	$\hat{Y} = 2,17 + 11,04X$	0,97**	-
6,50	$\hat{Y} = 3,49 + 9,93X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = -74,87 + 113,45X - 33,80X^2$	0,99**	1,68
	$\hat{Y} = 4,22 + 7,76X$	0,89**	-

** , * Significativos a 1 e 5%.

Os pontos, tanto de máximo e/ou mínimo, obtidos pela primeira derivada, situam-se fora do intervalo de estudo proposto para este experimento. Assim, o comportamento linear e significativo no conteúdo volumétrico de água e de aeração é observado com a compactação, dentro das doses de gesso+MSC 0,0; 3,25 e 6,50 t/ha, e quadrático, com ponto de máxima retenção de

água na densidade de $1,68 \text{ g/cm}^3$, dentro da dose de $9,75 \text{ t/ha}$ (Tabelas 20 e 21).

Tabela 21 - Equações de regressão ajustadas dentro de cada dose de gesso+MSC estudadas, entre o conteúdo volumétrico de aeração do solo(Y), calculado após o cultivo da soja, em percentagem, em função da densidade do material de solo no anel central do vaso(X), em g/cm^3

Gesso+MSC	Equações	r	P. de Mínimo
t/ha			g/cm^3
0,0	$\hat{Y} = 214,92 - 209,81X + 55,37X^2$	0,99*	1,89
	$\hat{Y} = 84,30 - 38,71X$	0,97**	-
3,25	$\hat{Y} = 249,43 - 249,35X + 66,89X^2$	0,99**	1,87
	$\hat{Y} = 91,64 - 42,65X$	0,96**	-
6,50	$\hat{Y} = 86,53 - 38,37X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = 389,11 - 438,14X + 130,56X^2$	0,99**	1,68
	$\hat{Y} = 81,13 - 34,70X$	0,89**	-

** , * Significativos a 1 e 5%.

4.3. Efeito dos tratamentos nas frações granulométricas do solo

4.3.1. Fração areia

Os dados observados (Tabela 22) não apresentam sequer tendência de algum efeito dos tratamentos propostos. Esta evidência é confirmada pela análise de variância (Tabela 23).

Tabela 22 - Valores de argila dispersa em água (ARGH₂O), argila dispersa em hidróxido de sódio (ARGNa), silte, grau floculação (GRAUFLOC), areia muito grossa (AREMG), areia grossa (AREGR), areia média (AREMD) e areia fina (AREFINA) obtidos após o cultivo da soja, em amostras de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, incubadas com doses de gesso+MSC e submetidas a diferentes níveis de compactação

Gesso ¹	N.C. ²	DsCalc ³	ARGH ₂ O	ARGNa	SILT	GRAUFLOC	AREMG	AREGR	AREMD	AREFINA
t/ha-		-g/cm ³ -	----- % -----							
	0	1,32	1,50	13,14	5,18	88,58	2,19	18,52	48,34	12,63
	1	1,47	1,59	12,32	5,56	87,05	2,20	18,28	50,06	11,79
0,00	2	1,62	1,26	12,95	5,75	90,20	2,25	19,28	48,89	10,88
	3	1,77	2,13	11,82	6,84	82,04	2,56	18,35	48,94	11,61
	0	1,32	1,00	11,38	7,11	90,82	2,13	17,59	49,04	12,64
	1	1,47	0,81	11,94	6,29	93,16	2,26	18,08	49,84	11,67
3,25	2	1,62	1,00	12,07	6,35	91,73	1,98	17,68	49,40	12,50
	3	1,77	1,56	11,69	7,23	86,63	2,07	17,56	48,81	12,65
	0	1,32	1,31	11,19	7,16	88,25	2,28	17,41	50,05	11,88
	1	1,47	1,31	11,54	6,81	88,51	2,47	17,99	50,40	10,77
6,50	2	1,62	0,94	10,88	7,78	91,34	2,11	17,86	49,43	11,92
	3	1,77	1,13	11,38	7,65	90,13	2,36	17,80	49,28	11,43
	0	1,32	1,25	11,38	6,59	88,85	2,42	17,92	49,04	12,64
	1	1,47	0,61	11,75	6,79	94,09	2,41	17,30	49,54	12,19
9,75	2	1,62	0,75	10,86	7,76	93,09	2,38	17,57	48,73	11,32
	3	1,77	1,06	10,57	8,21	89,96	2,00	18,37	49,33	11,50

¹Dose de gesso misturada a matéria seca de crotalária em quantidade equivalente a 15 t/ha

²Compactação efetuada no anel central do vaso

³Relação entre a massa de solo utilizada e o volume fixo do anel central

⁴Densidade do solo do anel central lida no aparelho de raios gama após cultivo da soja

Tabela 23 - Resumo das análise de variância dos atributos físicos argila dispersa em água (ARGH₂O), argila dispersa em sódio(ARGNa), silte, grau de floculação(GRAUFLOC), areia muito grossa (AREMG), areia grossa (AREG), areia média (AREM) e areia fina (AREFINA) de amostras deformadas de um Latossolo Vermelho-Escuro umedecido com 70% da CC, após o cultivo da soja e submetidas a diferentes densidades do solo no anel central do vaso, induzidas pela compactação

F. DE VARIAÇÃO	G.L	QM							
		ARGH ₂ O	ARGNa	GRAUFLOC	SILT	AREMG	AREGR	AREMD	AREFINA
Blocos	3	0,085	1,374*	13,393	1,488	0,087	4,457	4,751	0,250
Gesso+MSC	(3)	1,077**	6,095**	43,444**	10,535**	0,153	2,503	1,782	1,243
Efeito Linear	1	2,034**	15,746**	63,914**	30,248**	0,077	4,027	0,324	0,007
Efeito Quadr.	1	0,693*	2,483*	33,559*	1,354	0,070	2,875	4,432	0,003
Ind. da regr.	1	0,502	0,055	32,860	0,002	0,314	0,608	60,590	3,718
Densidade(Ds)	(3)	0,834**	0,612	73,642**	4,830*	0,068	0,226	2,604	1,471
Efeito Linear	1	0,483	1,106	47,605*	11,580*	0,037	0,399	1,932	1,423
Efeito Quadr.	1	1,833**	0,718	159,940*	0,573	0,003	0,021	1,697	2,644
Ind. da regr.	1	0,186	0,013	13,382	2,336	0,165	0,257	4,182	0,347
Gesso+MSC X Ds	9	0,211	2,401	19,282	1,603	0,104	0,737	0,686	1,407
RESIDUO	45	0,129	0,408	11,098	0,054	0,982	0,113	1,511	0,981
C.V %		29,04	15,63	3,73	15,66	14,92	0,36	2,49	8,37

** , * Significativos a 1 e 5 %.

Esta tabela indica ausência de significância tanto para as doses da mistura gesso+MSC como para os níveis de compactação nos diversos intervalos de tamanho da fração granulométrica acima de 0,053mm e de areia total.

Para os vários modelos estatísticos testados, as regressões não foram significativas, indicando que para todas as combinações de tratamentos não existe diferenças. Isto é, $\hat{Y} = \bar{Y} = 2,25$ % na fração areia muito grossa; $\hat{Y} = \bar{Y} = 17,96$ % na areia grossa; $\hat{Y} = \bar{Y} = 49,35$ % na areia média; $\hat{Y} = \bar{Y} = 11,83$ % na areia fina e $\hat{Y} = \bar{Y} = 83,46$ % na areia total.

Por tratar-se de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, caracterizado por elevado grau de intemperismo, pequena interação eletrostática da fração coloidal e baixo teor original de matéria orgânica (Tabela 1), este resultado encontra-se dentro do esperado.

Pode-se inferir, que os tratamentos metodológicos para quantificação foram eficientes para adequada separação das frações mais grosseira da terra fina.

4.3.2. Fração silte

Os dados relativos à variação dos teores de silte, em relação aos tratamentos de doses da mistura gesso+MSC e níveis de compactação, foram submetidos a análise de variância (Tabela 23) e de regressão. Foi constatada ausência de significância para a

interação dos tratamentos principais, evidenciando não haver dependência entre os efeitos dos fatores. Isto é, o efeito das doses de gesso+MSC não depende da densidade do solo e vice-versa. Assim, cada efeito principal foi estudado mediante regressão com a média de 16 observações.

Com coeficiente de regressão de **0,98**** e coeficiente angular significativo, a regressão linear $\hat{Y} = 5,98 + 0,189X$, onde \hat{Y} = percentagem de silte e X doses da mistura gesso+MSC em t/ha, possibilita observar que os teores de silte foram sempre crescentes com as doses da mistura gesso+MSC, dentro do intervalo estudado.

Esta constatação permite algumas inferências: a metodologia de dispersão utilizada (EMBRAPA/SNLCS, 1979) pode não ter sido eficiente em provocar a dispersão total, permanecendo agregados de argila com tamanho do silte; pode ter acontecido, ainda, que o tempo de repouso foi suficientemente longo para permitir uma nova aproximação das partículas de argila com sua conseqüente floculação em agregados do tamanho de silte; contudo, não deve ser descartada a possibilidade de que o gesso+MSC, realmente fornece o eletrólito ao meio, favorecendo a floculação de partículas coloidais.

Considerando que o gesso+MSC fornece dois íons que contribuem para aumentar a atividade iônica do meio e, conseqüentemente, propiciam a supressão da dupla camada difusa; e que, ao contrário do calcário, o gesso pode não ter o mesmo

efeito na precipitação de Fe^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} (PAVAN et al. 1984), tidos como agentes de floculação e de estabilização dos agregados do solo, é possível sugerir o seu poder floculador sobre partículas colóidais do solo.

Algo a ser estudado, juntamente com melhoristas de plantas, é a possibilidade de substituição total, ou mesmo parcial do calcário pelo gesso. Em solos pobres em cálcio, ricos em alumínio e bem estruturados como os de cerrado, alguns estudos têm mostrado que a calagem, em excesso, pode estar tendo efeito dispersante, levando à formação de uma camada subsuperficial compactada.

Nesse contexto, JUCKSCH (1987) observou que para um tempo de incubação solo/calcário acima de 8 semanas os teores de argila tendem a ser crescentes com o aumento de calcário, enquanto a estabilidade dos agregados diminui.

A análise textural, em solos que receberam ou estão recebendo contínuas e pesadas doses de gesso, a exemplo do que já é recomendado para solos calcários, há necessidade de ajuste na metodologia.

4.3.3. Efeito das doses de gesso+MSC sobre os teores de argila dispersa em água

A constatação de que os teores de argila dispersa em água decresceram linearmente com as doses da mistura gesso+MSC e

o fato de não ter ocorrido significância na percentagem de areia total (Tabela 23), pode indicar que as doses de gesso+MSC foram efetivas em provocar a floculação das partículas coloidais, superestimando, assim, a percentagem de silte.

Os valores obtidos para argila dispersa em água (Tabela 22) evidenciam que, tanto as doses da mistura gesso+MSC como os níveis de compactação tiveram efeito significativo. Ausência de significância para a interação gesso+MSC x densidade (Tabela 23) indica que cada fator teve o mesmo comportamento dentro dos níveis do outro fator.

Observa-se, pela análise de variância da regressão (Tabela 23), que as doses da mistura gesso+MSC(X), em t/ha, induziram comportamento quadrático para percentagem de argila dispersa em água (Y). A derivada primeira da equação $\hat{Y} = 1,53 - 0,1453X + 0,01X^2$ ($r = 0,92^{**}$) indica que o teor de argila dispersa em água foi mínimo quando a dose de gesso+MSC foi de 7,25 t/ha. Desse modo, fica evidente o efeito benéfico da mistura gesso+MSC em reduzir os teores de argila dispersa em água.

Estudos do gesso+MSC como melhorador das propriedades físicas do solo são escassos e complexos. Os processos de floculação e dispersão de argila no solo são dependentes de diversas variáveis.

A dupla camada difusa proposta por MITCHELL (1976) como $L = \frac{K}{v} \sqrt{\frac{D}{No}}$ onde: L = espessura da dupla camada difusa, K = uma constante que inclui a temperatura, constante de Boltzmann e

carga elétrica unitária; V = valência do íon; D = constante dielétrica do meio e N_o = concentração ou atividade iônica da solução, por exemplo, é uma das variáveis que tem grande influência sobre o fenômeno da floculação/dispersão de argila. Com base nesta equação, pode ser observado que a adição de gesso+MSC até 7,25 t/ha deve ter contribuído para redução da espessura (L), na medida em que esta adição introduziu íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} no meio. A presença desses dois íons contribuiu para aumentar a atividade iônica da solução, sem contudo aumentar o pH do meio e precipitar ferro e alumínio. A elevação do pH do meio, como ocorre quando se faz a calagem, contribui para aumentar a quantidade de cargas negativas dos colóides, as quais, sem a neutralização pelos cátions do meio, irão favorecer a dispersão.

JUCKSCH (1987) utilizando carbonato de cálcio como fonte de cálcio, em quatro níveis de calagem e quatro tempos de incubação, encontrou pontos de máxima dispersão de argila quando os níveis de calagem foram de 2,69; 2,15 e 1,48 vezes a necessidade de calagem do solo conforme CFSEMG (1978), para os tempos de incubação de 4, 8 e 16 semanas, respectivamente. Contudo, ocorria floculação de argila quando a quantidade de gesso+MSC correspondia a quatro vezes a necessidade de calagem.

O efeito depressivo da calagem na floculação de argila, contrário ao observado neste estudo com gesso, deve-se ao produto final da reação do calcário. A reação de substituição do Al^{3+} trivalente do complexo de troca pelo Ca^{2+} divalente e sua posterior

precipitação como $\text{Al}(\text{OH})_3$ poderá provocar redução da atividade iônica da solução, a qual tem relação direta com a espessura da dupla camada difusa.

No caso da adição de gesso, poderá não ocorrer precipitação do alumínio trivalente (PAVAN et al. 1984), mas sim a adição dos íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} ao meio, considerados dois bons agentes flocculantes de colóides.

A importância da concentração e da valência do íon, no processo da floculação, é evidenciada na fórmula proposta por MITCHELL (1976) que descreve a dupla camada difusa. No fenômeno, da floculação o poder flocculante dos cátions aumenta de acordo com a seqüência mono-di-trivalente conforme referenciado por KOENIGS (1961).

Desse modo, para se ter um mesmo efeito flocculante nesta ordem dos íons, a concentração destes cátions deve guardar as seguintes relações de concentração: [1000mono]:[15,62di]:[1,37trivalente]. Esta relação indica a necessidade de aproximadamente 11,4 vezes a concentração de um divalente para compensar à ação flocculante do trivalente.

É provável que a aplicação da mistura gesso+MSC de 7,25 t/ha tenha provocado efeito flocculante aditivo a ação do alumínio, o qual possivelmente seja menos precipitado pelo gesso+MSC (Tabela 23). Valores acima de 7,25 t/ha, pode ter sido suficiente para iniciar o processo de precipitação do alumínio ou

para retirar do meio íons que contribuem para aumentar a atividade iônica e reduzir a espessura da dupla camada difusa.

FASSBENDER (1984) afirma que a floculação de argila depende da suscetibilidade do complexo de troca, das características da dupla camada difusa e dos íons adsorvidos nos coloides presentes na solução.

A comprovação do efeito depressivo da calagem, tanto no processo de floculação como na estabilidade dos agregados; a constatação de que o gesso, além de fornecer Ca^{2+} e SO_4^{2-} , promove melhoria nas propriedades físicas do solo; a necessidade relativamente alta de cálcio pelas plantas; a pobreza dos solos de cerrados nesse elemento; e, ainda, a observação de que, havendo cálcio no meio, o efeito do alumínio na toxidez de plantas é muito menor (NEVES, 1983), abre uma perspectiva muito grande para o uso do gesso+MSC nos solos ácidos e pobres de cerrados, principalmente naqueles onde o uso intensivo da mecanização, calagem e adubação podem ter provocado considerável dispersão de argila com formação de camada compactada subsuperficialmente.

Esta observação pode ser fundamentada pelo trabalho de MILLER & SCIFRES (1988), os quais observaram que a aplicação de 2 t/ha de gesso+MSC no sulco de plantio foram suficientes para prevenir a formação de encrostamento sobre a semente, melhorando sua germinação e desenvolvimento inicial.

Quanto ao estabelecimento da regressão para avaliar o efeito dos níveis de compactação, expressos pela densidade do solo sobre os teores de argila dispersa em água (Tabela 22), percebe-se que o ajuste da curva com comportamento quadrático, $\hat{Y} = 18,18 - 22,72X + 7,52X^2$, com $0,93^{**}$ de coeficiente de regressão, apresenta como ponto de mínima dispersão de argila a densidade $1,51 \text{ g/cm}^3$. Possivelmente, a compactação até esse valor de densidade reduz a argila dispersa em água devido a uma aproximação mecânica das partículas, fazendo com que seja vencida a força de repulsão que surge quando predominam cargas de sinais iguais entre partículas vizinhas. Dispersão crescente para valores de densidade acima de $1,51 \text{ g/cm}^3$ pode estar relacionada à criação de ambiente de redução, provocado tanto pelo aumento do conteúdo volumétrico de água como pela redução dos poros livres de água (Tabela 4).

Este estado redutor diminui a atividade agregadora dos microorganismos, além de possibilitar a presença constante de filmes de água entre as partículas de argila que, ao afastá-las, torna mais fácil a dispersão. Nesta investigação, não deve ser descartada a hipótese de que o estabelecimento de ambiente redutor, provocado pelos níveis mais altos de compactação, tenha provocado aumento do pH. Este por sua vez, induz redução na atividade iônica da solução e, com isto, aumento na espessura da dupla camada difusa.

4.3.4. Efeito dos tratamentos na fração argila dispersa em solução de hidróxido de sódio 0,1N

O relacionamento da percentagem de argila dispersa em hidróxido de sódio 0,1N, com doses de gesso+MSC e níveis de compactação é mostrado na (Tabela 22).

Percebe-se pela análise de variância que tanto as doses de gesso+MSC quanto os níveis de compactação tiveram efeito significativo, mas de maneira independente, sobre a percentagem de argila dispersa em solução de hidróxido de sódio (Tabela 23).

A equação de regressão $\hat{Y} = 12,566 - 0,303X + 0,02X^2$ é a que melhor descreve o efeito das doses da mistura gesso+MSC (X) sobre a percentagem de argila dispersa em hidróxido de sódio (Y). Este comportamento quadrático, com coeficiente de regressão de 0,99^{**}, mostra que há redução dos teores de argila dispersa para doses crescentes de gesso+MSC até 7,58 t/ha. Confrontando estes resultados com os de teores de silte, percebe-se que, se ocorreu a dispersão total dos agregados do tamanho de silte por processo químico ou agitação mecânica, houve então, formação de pseudo-silte a partir da argila dispersa, durante o tempo de repouso para a pipetagem. A observação acima pode ser melhor evidenciada pela presença de coeficiente angular negativo na equação proposta para explicar a redução dos teores de argila dispersa em água.

Diferentemente ao observado para as doses de gesso+MSC, os níveis de compactação não tiveram efeito significativo sobre

os teores de argila dispersa em hidróxido de sódio (Tabelas 22 e 23). Em todos os níveis de compactação não houve diferença nos teores de argila dispersa em hidróxido de sódio, ou seja, $\hat{Y} = Y = 11,68 \%$.

Esta constatação evidencia que, uma vez desfeito o tratamento da compactação e passado o material de solo por uma peneira de 2mm de abertura, a metodologia de determinação granulométrica proposta pela EMBRAPA/SNLCS (1979) foi adequada para quantificar os diversos intervalos de tamanho das frações da terra fina.

Estes resultados deixam claro que, ao contrário do observado para os teores de argila dispersa em água (Tabelas 22 e 23), onde a compactação até a densidade de $1,51 \text{ g/cm}^3$ provocou a menor dispersão de argila, esta determinação não é influenciada pela compactação.

4.3.5. Efeito dos tratamentos doses de gesso+MSC e da compactação no grau de floculação.

A análise de variância (Tabela 23) permite afirmar que tanto as doses de gesso+MSC como os níveis de compactação tiveram efeito significativo, mas de maneira independentes, no grau de floculação do solo.

Entre os modelos polinomiais testados para estudar o efeito das doses de gesso+MSC, o linear $\hat{Y} = 88,005 + 0,275X$, foi

o que melhor se ajustou aos dados. Embora com um baixo coeficiente de regressão ($r = 0,84^{**}$), o coeficiente angular da reta é altamente significativo, indicando assim, que o grau de floculação cresce com as doses de gesso+MSC (Tabela 22).

Considerando que o grau de floculação é função da argila dispersa em água e em hidróxido de sódio, os resultados encontrados podem ser justificados de maneira idêntica ao proposto para os teores de argila dispersa em água e em hidróxido de sódio. Ou seja, com a adição de gesso+MSC, na medida que este não precipita o alumínio e o ferro, nem eleva o pH e, ainda, adiciona os íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , haverá aumento na atividade iônica da solução que, por sua vez, irá atuar na supressão da dupla camada difusa, responsável pelo processo de floculação de argila.

SUMNER (1992) revisando alguns trabalhos de pesquisa utilizando tratamentos com doses de gesso e calcário, encontrou que o gesso era muito mais eficiente do que o calcário em promover a estabilidade dos agregados em diversos solos ácidos após ciclos de congelamento e descongelamento.

Trabalhando somente com doses de calcário, JUCKSCH (1987) encontrou redução no grau de floculação de argila, menor estabilidade dos agregados formados pedogeneticamente e, ainda, alta correlação negativa entre estes parâmetros e pH, ΔpH , teores de Fe^{2+} , Al^{3+} e Mg^{2+} , com doses crescentes de calcário.

Com relação ao grau de dispersão de argila frente às doses de gesso+MSC e níveis de compactação (Tabela 22),

verificou-se um comportamento semelhante ao observado quanto ao grau de floculação, contudo, com sinal e magnitudes inversos. Ou seja, enquanto doses crescentes da mistura gesso+MSC aumentaram linearmente a floculação, o grau de dispersão foi reduzido linearmente na mesma proporção. A equação que melhor descreve a dispersão é a linear: $\hat{Y} = 11,99 - 0,275X$, ($r = 0,84^{**}$).

Quanto ao efeito significativo dos níveis de compactação, tanto no grau de floculação como no grau de dispersão (Tabelas 22 e 23), possivelmente a causa esteja diretamente correlacionada com a influência da compactação nos teores de argila dispersa em água e na percentagem de silte (Tabela 22). Conforme relatado anteriormente, à medida que a compactação altera a relação ar/água do solo, o estado de redução é favorecido, proporcionando alterações nos valores de pH, nas formas e disponibilidade de ferro, de alumínio e na atividade de microorganismo. Estas alterações agem diretamente na floculação da fração argila e na estabilidade dos agregados.

A constatação de que a compactação influenciou significativamente os teores de argila dispersa em água e não provocou alterações nos teores de argila dispersa em solução de hidróxido de sódio 0,1N, permite supor a importância do aumento do pH do meio pela presença do hidróxido de sódio, no processo da dispersão e manutenção dessa dispersão durante o período de repouso para a pipetagem. Os modelos matemáticos que melhor explicam o comportamento do grau de floculação e de dispersão,

influenciados pelos níveis de compactação, são os seguintes:

$$\hat{Y}(\text{floculação}) = 68,44 + 211,959X - 70,259X^2, \quad r = 0,98^{**} \text{ e,}$$

$$\hat{Y}(\text{dispersão}) = 166,45 - 209,357X + 64,437X^2, \quad r = 0,98^{**}.$$

Derivando estas duas equações, encontra-se como ponto de máximo, a densidade de $1,51 \text{ g/cm}^3$ para a equação da floculação e, como ponto de mínimo, $1,62 \text{ g/cm}^3$ para a dispersão. Para valores abaixo desses pontos, condições de oxi-redução, mais adequadas, favoreceram tanto a atividade de organismos, como também, outros fatores que influenciam na floculação.

Para valores acima dos pontos de máximo e mínimo, respectivamente, as condições de elevada redução possivelmente alteraram não só a atividade de microorganismo, mas também todo um complexo de reações do solo e a atividade iônica da solução, as quais poderão ter influenciado na dispersão do solo. GRABLE (1966) cita que o estado de aeração é muito importante para o desenvolvimento de microorganismos, e de vegetais, os quais desempenham papéis essenciais na floculação e agregação do solo.

BORGES (1986) trabalhando com solo compactado observou que, enquanto na camada superior não compactada os teores de alumínio cresciam de $0,33$ para $0,51 \text{ meq/100 cm}^3$, o pH reduzia de $5,46$ para $5,22$. Na camada subsuperficial, submetida a níveis de compactação, na medida em que ocorria aumento no conteúdo volumétrico de água e redução no espaço de aeração, os teores de alumínio trocáveis reduziam de $0,18 \text{ meq/100 cm}^3$ para $0,0$ e o pH aumentava de $5,22$ para $6,06$.

Quando a cultura era o eucalipto, o comportamento era o mesmo, mas de magnitudes mais expressivas. Conforme trabalho de JUCKSCH (1987), estas observações permitem supor que o processo da compactação, na medida que reduz os teores de Al^{3+} e eleva o pH da camada compactada, favorece a dispersão de argila.

4.4. Efeito dos tratamentos com gesso+MSC e de níveis de compactação na condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado foi significativamente alterada pela aplicação de níveis crescentes de compactação e doses da mistura gesso+MSC (Tabelas 24 e 25). A interação significativa entre compactação e doses de gesso+MSC possibilita estudar cada fator dentro dos níveis do outro.

4.4.1. Efeito dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC

O ajuste de equações de regressão com seus respectivos pontos de máximos e mínimos estimados encontra-se na Tabela 26.

Observa-se que a condutividade hidráulica do solo saturado, em função dos níveis de compactação dentro das doses de gesso+MSC 0,00 e 3,25 t/ha apresentou pontos de mínimo, enquanto que dentro das doses 6,50 e 9,75 t/ha pontos de máximo. Contudo, em todos os casos, esses pontos, estimados pela derivada primeira das respectivas equações ajustadas, situam-se fora do intervalo de estudo, optando assim pelas equações lineares.

Tabela 24 - Valores de infiltração de água e condutividade hidráulica do solo saturado, em amostras deformadas de Latossolo Vermelho-Escuro textura média, incubadas com doses de gesso+MSC e submetidas a diferentes níveis de compactações, avaliadas após o cultivo da soja

Gesso ¹	N.C. ²	DsCALC ³	DsRGAN ⁴	DsRGAP ⁵	K _{SOLO}
t/ha		g/cm ³			-cm/s-
0,00	0	1,32	1,31	1,31	5,60
	1	1,47	1,46	1,43	3,13
	2	1,62	1,64	1,61	0,90
	3	1,77	1,75	1,63	0,50
3,25	0	1,32	1,30	1,26	5,22
	1	1,47	1,45	1,41	3,42
	2	1,62	1,65	1,58	1,05
	3	1,77	1,74	1,62	0,53
6,50	0	1,32	1,33	1,25	3,89
	1	1,47	1,49	1,40	3,99
	2	1,62	1,65	1,51	1,21
	3	1,77	1,73	1,59	0,53
9,75	0	1,32	1,33	1,22	3,38
	1	1,47	1,46	1,44	3,35
	2	1,62	1,62	1,54	1,04
	3	1,77	1,73	1,53	0,51

¹Dose de gesso misturada à matéria seca de crotalária em quantidade equivalente a 15 t/ha

²Níveis de compactação efetuado no material de solo do anel central do vaso

³Relação entre massa de solo e volume fixo do anel central

^{4, 5}Densidade do solo no anel central lida no aparelho de raios gama antes e após o cultivo de soja

Tabela 25 - Resumo das análises de variância da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{solo}), produção de matéria seca da parte aérea (PMSPA) e de raízes nos anéis superiores (PRAIZ1) e inferiores (PRAIZ3) do vaso de plantas de soja, submetida a diferentes níveis de compactação no anel central do vaso e doses de gesso+MSC na camada superficial

FONTE DE. VARIAÇÃO	G.L.	K_{SOLO}	PMSPA	PRAIZA1	PRAIZA3
Blocos	3	0,01163	0,88583	0,07586**	0,04830**
Gesso+MSC X Ds	9	1,42942**	4,83155*	0,09640	0,07693**
Gesso+MSC	(3)	0,80073**	5,50566*	0,03084*	0,08510**
Efeito Linear	1	-	0,71060**	0,2279**	-
Efeito Quadr.	1	-	0,02640	0,0272	-
Ind. da regressão	1	-	0,18810	0,0002	-
Gesso+MSC d/Ds 1,32	(3)	4,47793**	0,88900	-	-
Efeito Linear	1	12,78000**	2,30860	-	-
Efeito Quadr.	1	0,02100	0,35100	-	-
Ind. da regressão	1	0,63280*	0,00740	-	-
Gesso+MSC d/Ds 1,47	(3)	0,54406**	0,34400	-	-
Efeito Linear	1	0,30360**	0,16930	-	-
Efeito Quadr.	1	0,88270**	0,47610	-	-
Ind. da regressão	1	0,44610**	3,38660	-	-
Gesso+MSC d/Ds 1,62	(3)	0,06583	13,62886**	-	-
Efeito Linear	1	0,07210	26,85400**	-	-
Efeito Quadr.	1	0,10380	13,05010*	-	-
Ind. da regressão	1	0,02150	0,98250	-	-
Gesso+MSC d/Ds 1,77	(3)	0,00120	4,16843*	-	-
Efeito Linear	1	0,00050	9,60500*	-	-
Efeito Quadr.	1	0,00314	1,69000	-	-
Ind. da regressão	1	0,00006	1,21030	-	-
Densidade (Ds)	3	58,75923*	162,05070**	0,832266**	3,07973**
Ds d/gesso+MSC 0	(3)	22,08306	24,99263**	-	-
Efeito Linear	1	61,47250**	69,78850**	-	-
Efeito Quadr.	1	4,26940**	2,95840	-	-
Ind. da regressão	1	0,50740**	2,23110	-	-

Tabela 25 (Cont.)

Ds d/Gesso+MSC 3,25	(3)	19,01726	34,69713**	-	-
Efeito Linear	1	54,14180**	93,11770**	-	-
Efeito Quadr.	1	1,6378	10,87350*	-	-
Ind. da regressão	1	1,2722	0,10010	-	-
Ds d/Gesso+MSC 6,50	(3)	12,88566	36,50240**	-	-
Efeito Linear	1	33,0810**	108,43820**	-	-
Efeito Quadr.	1	0,6010**	0,00640	-	-
Ind. da regressão	1	4,9760**	1,06260	-	-
Ds d/Gesso+MSC 9,75	(3)	9,0934	80,35320**	-	-
Efeito Linear	1	23,7478**	212,64980**	-	-
Efeito Quadr.	1	0,2558*	0,21860	-	-
Ind. da regressão	1	3,2768**	28,19130*	-	-
RESÍDUO	45	0,02827	1,82617	0,051140	0,01555
C.V %		7,02	9,12	10,21	19,15

** , * Significativos a 1 e 5 %.

Como a compactação, efetuada para obter as densidades crescentes até $1,77 \text{ g/cm}^3$, diminuiu, de imediato, a quantidade de poros grandes, possivelmente teve influência na transmissão de água no solo saturado, justificando, desse modo, a queda de condutividade média de $4,52 \text{ cm/s}$, observada na densidade de $1,32 \text{ g/cm}^3$ para $0,52 \text{ cm/s}$, na densidade de $1,77 \text{ g/cm}^3$ (Tabela 24). GHIEDYAL & SATYANARAYANA (1965) também relatam que a condutividade hidráulica do solo saturado está relacionada com tamanho dos poros.

A existência de coeficientes de regressão lineares altamente significativos, e coeficientes de regressão superiores a 88% (Tabela 26), permite afirmar que a redução na condutividade hidráulica do solo saturado, pelo efeito da compactação, ocorreu de maneira linear.

CAMARGO (1983) relata que o volume de água que flui por um tubo capilar, na unidade de tempo, é proporcional à quarta potência do raio. Se o diâmetro de um tubo diminui para $1/3$ do original, o volume de fluxo diminuirá para $1/81$ do original.

MOURA FILHO & BUOL (1972) compararam os efeitos de 15 anos de cultivos anuais em um Latossolo Roxo e observaram que as taxas de infiltração diminuíram de 82 para 12 cm/h com a prática do cultivo intensivo.

Tabela 26 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, entre os valores de condutividade hidráulica do solo saturado, medidos após o cultivo da soja(Y), em função da densidade do solo do anel central do vaso(X), em g/cm³

Gesso+MSC	Equações	r	Ponto de Inflexão
t/ha			g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = 74,75 - 82,63X + 22,96X^2$ $\hat{Y} = 20,59 - 11,69X$	0,99** 0,96**	1,79(-) ¹ -
3,25	$\hat{Y} = 53,05 - 54,91X + 14,22X^2$ $\hat{Y} = 19,51 - 10,97X$	0,99** 0,98**	1,93(-) -
6,50	$\hat{Y} = -4,81 + 18,24X - 8,68X^2$ $\hat{Y} = 15,66 + 8,57X$	0,96** 0,96**	1,05(+) ¹ -
9,75	$\hat{Y} = 0,04 + 10,10X - 5,62X^2$ $\hat{Y} = 13,30 - 7,26X$	0,96** 0,96**	0,89(+) -

** Significativo a 1%.

1 (+), (-) Pontos de máximo e de mínimo respectivamente

A diminuição da infiltração, segundo estes pesquisadores pode estar associada a uma grande redução dos poros maiores que 0,05mm de diâmetro, tanto no horizonte A como no B. KOHNKE (1968), MILLER (1969) HILLEL (1970) afirmam que a velocidade de infiltração da água no solo, e conseqüentemente sua condutividade hidráulica é influenciada por propriedades físicas como a textura, a estrutura, a densidade do solo, o nível de compactação, o gradiente de umidade, e a distribuição dos poros.

4.4.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação

As doses da mistura gesso+MSC induziram na condutividade hidráulica do solo, um comportamento diferenciado dentro de cada nível de compactação (Tabelas 24, 25 e 27).

Observa-se que, quando o material de solo foi compactado para obtenção das densidades de 1,47 g/cm³ e 1,62 g/cm³, a aplicação da mistura gesso+MSC induziu comportamento quadrático. Para a densidade de 1,77 g/cm³, conquanto não seja possível ajustar equações significativas, as médias das quatro repetições (Tabela 24) mostra uma tendência de aumento da condutividade hidráulica com as doses de gesso+MSC.

Tabela 27 - Equações de regressão ajustadas dentro das densidades do solo estudadas, entre os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Y), medida após o cultivo da soja, em função de doses da mistura gesso+MSC (X), aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha

Densidades	Equações	r	Ponto de Inflexão
g/cm ³			t/ha
1,32	$\hat{Y} = 5,73 - 0,25X$	0,99**	-
1,47	$\hat{Y} = 3,06 + 0,26X - 0,02X^2$	0,92**	6,37(-) ¹
1,62	$\hat{Y} = 0,89 + 0,093X - 0,02X^2$	0,83*	2,32(+) ¹
1,77	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,522 \text{ cm/s}$	-	-

** Significativo a 1%.

¹ (+), (-) Pontos de máximo e de mínimo respectivamente

A derivada primeira das duas equações quadráticas ajustada, indica que a máxima condutividade será obtida quando a dose de gesso+MSC for de 5,72 t/ha e 6,02 t/ha, respectivamente, para as densidades de 1,47 e 1,62 g/cm³ (Tabela 27). O aumento da condutividade hidráulica do solo saturado, com a aplicação de gesso+MSC, está relacionado à diminuição da densidade do solo e ao aumento da porosidade total, como observado em 4.2.1 e 4.2.3.

Resultados semelhantes a estes foram encontrados por alguns pesquisadores citados por SUMNER (1992). A aplicação de gesso na superfície aumentou a taxa final de infiltração de água, possivelmente devido a uma maior floculação e agregação das partículas do solo. Trabalho conduzido por MILLER (1987), aplicando 2 t/ha de gesso no sulco de plantio, possibilitou observar que tanto a emergência como o desenvolvimento de plantas de algodão foi melhor onde se aplicou gesso. O pesquisador atribuiu o fato à melhor infiltração de água e a ausência de crosta compactada.

Na densidade de 1,32 g/cm³, a relação entre condutividade hidráulica do solo saturado e doses de gesso+MSC foi linearmente decrescente, ou seja, a presença do gesso+MSC reduziu a taxa de infiltração (Tabela 27).

Este resultado difere dos demais encontrados para os outros níveis de compactação. Possivelmente, uma leve compactação, provocada pelo próprio desenvolvimento do sistema

radicular da planta e as irrigações tenha compensado a compactação mecânica.

Não deve ser desconsiderado o fato de que, com o adequado desenvolvimento radicular em todo perfil da coluna de material de solo, ocorrido neste valor de densidade, parte do gesso tenha sido absorvido, reduzindo seu efeito flocculante, ou mesmo provocando maior atividade de microorganismos, os quais tiveram maiores efeitos do que o tratamento com gesso+MSC.

Outra possibilidade para tal fato é a ocorrência de maior interação entre as camadas ao longo de todo vaso, mascarando o efeito das doses de gesso+MSC.

SUMNER (1992) revisando alguns trabalhos sobre este assunto, encontrou que em 2 oxissolos brasileiros com pH inicial 4,0, a aplicação de gesso reduziu os teores de alumínio trocável e aumentou o pH. Essas alterações químicas induziram um aumento nos teores de argila dispersa em água, obstruindo os poros de infiltração de água. A redução na velocidade de infiltração com as doses de gesso foi atribuída à maior dispersão de argila, devido ao aumento das cargas negativas ou à reversão de cargas provocadas pela reação do calcário com o solo.

4.5. Efeito dos tratamentos na produção de matéria seca da parte aérea

Os dados constantes na Tabela 28 e a respectiva análise estatística (Tabela 25) possibilitam observar que, além dos

efeitos significativos de gesso+MSC e da compactação, houve efeito significativo da interação desses dois fatores, permitindo que cada tratamento fosse estudado dentro dos níveis do outro.

4.5.1. Efeito da compactação dentro das doses de gesso+MSC

Observando as Tabelas 28 e 29, percebe-se que o relacionamento, entre produção de matéria seca da parte aérea (PMSPA) e os níveis de compactação do solo, seguiu um comportamento linear altamente significativo dentro das doses gesso+MSC 0,0; 6,50 e 9,75 t/ha e quadrático na dose 3,25 t/ha.

A presença de coeficientes angulares negativos para as regressões lineares indica que a compactação induziu reduções de maneira constante na produção da parte aérea, em todos os seus níveis. Observando o coeficiente angular de cada regressão linear (Tabela 29), percebe-se que esses coeficientes crescem negativamente com as doses de gesso+MSC. Estas equações permitem estabelecer que o efeito da compactação é tanto mais prejudicial à produção de matéria seca da parte aérea quanto maior for a dose de gesso+MSC utilizada. Possível explicação para tal comportamento pode ser a de que, nos níveis de compactação mais elevados, doses excessivamente grandes de gesso+MSC, como as de 6,50 e 9,75 t/ha, podem provocar grande lixiviação de nutrientes para fora da camada superficial, local onde ficou concentrado o sistema radicular das plantas quando a compactação subsuperficial impedia o aprofundamento deste.

Tabela 28 - Produção de matéria seca da parte aérea (PMSPA) e de raízes nos anéis superficial (PRAIZ1) e inferior (PRAIZ3) do vaso da soja, submetidas a diferentes níveis de compactação do solo no anel central e doses de gesso+MSC no anel superficial do vaso

N.C. ¹	DsCALC. ²	GESSO ³	PMSPA	PRAIZA1	PRAIZA3
	g/cm ³	t/ha	-----g/vaso-----		
0	1,32	0,00	17,20	2,53	0,99
		3,25	17,80	2,35	0,94
		6,50	18,19	2,34	0,69
		9,75	18,20	2,26	0,90
		Média	17,85	2,37A	0,88AB
1	1,47	0,00	16,86	2,61	0,99
		3,25	17,43	2,37	0,82
		6,50	16,29	2,45	0,96
		9,75	17,55	2,34	1,00
		Média	17,03	2,44A	0,94A
2	1,62	0,00	13,99	2,49	1,03
		3,25	15,06	2,16	0,88
		6,50	13,27	1,98	0,77
		9,75	10,73	2,72	0,48
		Média	13,26	2,08 B	0,79 B
3	1,77	0,00	11,93	1,97	0,00
		3,25	11,40	1,81	0,00
		6,50	11,44	2,10	0,00
		9,75	09,61	1,97	0,00
		Média	11,10	1,96 B	0,00 C

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

¹Compactação efetuada no solo do anel central do vaso, formado pela sobreposição de três anéis de PVC

²Densidade do solo no anel central, lida no aparelho raios gama

³Dose de gesso misturada ao equivalente de 15t/ha de matéria seca de crotalária

Tabela 29 - Equações de regressão ajustadas dentro de doses de gesso+MSC estudadas, entre produção de matéria seca da parte aérea da soja(Y), em g, em função da densidade do material de solo do anel central do vaso(X), em g/cm³

Gesso+MSC	Equações	r	P. de máximo
t/ha			g/cm ³
0,00	$\hat{Y} = -34,238 - 12,453X$	0,96**	-
3,25	$\hat{Y} = -48,780 + 98,829X - 36,639X^2$	0,99*	1,35
6,50	$\hat{Y} = 38,783 - 15,523X$	0,99**	-
9,75	$\hat{Y} = -47,607 - 21,738X$	0,98**	-

** , * Significativos a 1 e 5 %.

Com a dose de gesso+MSC de 3,25 t/ha foi possível ajustar uma equação de regressão quadrática para produção de matéria seca da parte aérea, em função de níveis de compactação. A derivada primeira permite estabelecer, como ponto de máxima produção de matéria seca da parte aérea, a densidade de 1,35 g/cm³ (Tabela 29). Este valor possibilita mostrar que uma leve compactação pode melhorar o crescimento da parte aérea, quando a dose de gesso+MSC não foi excessivamente alta.

Efeito da compactação na produção vegetal é também relatado por diversos pesquisadores, contudo, de maneira não conclusiva. Alguns têm observado que uma leve compactação pode provocar aumento de crescimento na parte aérea. Outros, no

entanto, têm encontrado que o efeito da compactação na parte aérea é depressivo em todos os seus níveis, a partir da condição natural.

BORGES (1986) e BORGES et al. (1987), trabalhando com cinco variedades de soja e três espécie de eucalipto, encontraram que o efeito da compactação na produção de matéria seca da parte aérea podia variar com a espécie vegetal. Estes verificaram que as variedades de soja IAC-8, Bossier e Cristalina apresentavam comportamento quadrático para a produção de matéria seca da parte aérea, quando o solo era compactado. Entretanto, as variedades Tropical e Doko tiveram produção sempre decrescente a partir do nível zero de compactação.

Conclusões semelhantes a esta foram observadas por ROSEMBERG (1964) após estudar o efeito da compactação no rendimento das culturas de milho, tomate, batata, beterraba e algodão. Este autor observou que, enquanto a beterraba e algumas variedades de batata apresentavam redução linear na produção, o milho, o tomate e o algodão apresentavam comportamento quadrático com pontos de máximo para uma leve compactação. Esse pesquisador atribuiu tal comportamento ao tipo de sistema radicular. Se a planta possui um sistema radicular pivotante, o crescimento das raízes em solo compactado torna-se mais difícil por possuir quase sempre diâmetro maior do que os poros do solo. O mesmo não acontece com as raízes tipo fasciculada que são geralmente mais finas. Como a soja possui raízes pivotantes, é possível que as

densidades de 1,62 e 1,77 g/cm³ (níveis de compactação 2 e 3) reduziram o diâmetro dos poros para um tamanho menor do que os das raízes.

Pesquisadores como BACCHI (1976) e SHIERLAW & ALSTON (1984) não verificaram nem aumentos nem reduções significativas de crescimento aéreos induzidos pela compactação subsuperficial. Com relação ao tipo de solo, ROSEMBERG (1964), afirma que o rendimento das culturas em solos compactados é função da classe de solo, atividade de argila, podendo, no entanto, acrescentar a esse conjunto de variáveis, o efeito da umidade, da fertilidade do solo, do manejo da cultura e do solo.

Tanto os dados de produção de matéria seca da parte aérea como os de produção de raízes (Tabela 28) deixam claro que o uso do gesso em solos compactados deve ser criteriosamente estudado, principalmente no que se refere à quantidade utilizada.

A propriedade do gesso de se movimentar rapidamente no perfil do solo carreando bases para a camada compactada, quando aplicado em grandes quantidades, pode retirar esses nutrientes do alcance do sistema radicular quando o nível de compactação for suficiente para impedir a penetração de raízes.

4.5.2. Efeito das doses de gesso+MSC dentro dos níveis de compactação

Os dados obtidos e a análise estatística (Tabelas 25, 28 e 30) evidenciam que as doses de gesso+MSC não tiveram efeito

significativo dentro das densidades de $1,32 \text{ g/cm}^3$ e $1,47 \text{ g/cm}^3$. Isto é, para essas duas densidades $\hat{Y} = \bar{Y} = 17,85 \text{ g e } 17,03\text{g}$, respectivamente. Para a densidade $1,67 \text{ g/cm}^3$, os dados de produção de matéria seca permitiram ajustar, de modo significativo, uma equação com comportamento quadrático, com ponto de máxima produção aérea quando a dose de gesso+MSC aplicada foi de $2,65 \text{ t/ha}$. No entanto, quando a densidade foi de $1,77 \text{ g/cm}^3$, o relacionamento da produção de matéria seca da parte aérea com as doses de gesso+MSC seguiram um relacionamento linear decrescente.

Análise mais detalhada dessas informações permitem observar que: quando as densidades foram de $1,32 \text{ g/cm}^3$ e $1,47 \text{ g/cm}^3$, a ausência de restrição física ao crescimento radicular em profundidade fez com que as doses de gesso+MSC, mesmo quando elevadas, não tivessem efeito significativo na produção aérea. Para esses valores de densidade, o sistema radicular pode aprofundar até o local onde se concentraram as bases carregadas pelo gesso.

Na densidade $1,67 \text{ g/cm}^3$, o impedimento parcial para o crescimento do sistema radicular na camada compactada fez com que doses de gesso+MSC acima de $2,65 \text{ t/ha}$ provocassem uma lixiviação excessiva dos nutrientes para fora do alcance do sistema radicular.

Tabela 30 - Equações de regressão ajustadas dentro de densidades do material de solo estudadas, entre produção de matéria seca da parte aérea de soja(Y), em g, em função de doses da mistura gesso+MSC(X) aplicadas no anel superficial do vaso, em t/ha.

Densidade	Equações	r	Ponto de máximo
g/cm ³			t/ha
1,32	$\hat{Y} = \bar{Y} = 17,831$	-	-
1,47	$\hat{Y} = \bar{Y} = 17,034$	-	-
1,62	$\hat{Y} = 14,098 + 0,48X - 0,09X^2$	0,99*	2,65
1,77	$\hat{Y} = 12,135 - 0,2132X$	0,94*	-

* Significativo a 5%.

Dentro da densidade 1,77 g/cm³ (nível de compactação 3) o crescimento radicular foi completamente impedido (Tabela 28). Nesta densidade, as doses de gesso+MSC, certamente por remover da camada superficial quantidades substanciais de bases necessárias ao bom desenvolvimento vegetal, induziram efeito depressivo em todos os seus níveis na produção aérea da planta, como atesta o coeficiente linear negativo da regressão (Tabela 30).

O efeito da aplicação de gesso no rendimento das culturas ainda não está bem definido, e menos ainda em solos com camada subsuperficial compactada.

Aumentos na produção agrícola pelo uso do gesso foram encontrados por GUIMARÃES (1986), trabalhando com cafeeiro e utilizando gesso misturado ao esterco; por MORELLI et al. (1992),

em cana de açúcar; por OLIVEIRA et al. (1986) em cultura do feijão e por GUILHERME (1986) na cultura da soja em solos de cerrado associando gesso ao calcário.

Por outro lado, redução na produção ou efeito não significativo do uso de gesso em diversas culturas foi também observado. QUAGGIO et al. (1992) encontraram que o gesso não teve nenhum efeito na produção de soja, mesmo quando associado ao calcário. Estes pesquisadores atribuem o fato às doses excessivas de gesso, as quais podem ter prejudicado a resposta da cultura à calagem.

Trabalhos conduzidos por VASCONCELOS et al. (1990), com as culturas de milho, sorgo e soja, não apresentaram resposta ao uso do gesso, possivelmente devido à alta saturação em cálcio (76 e 52%) e baixa saturação de alumínio (10 e 37 %) nas profundidades de 20-40 cm e 40-60 cm, respectivamente. FURLANI et al. (1991) observou efeito significativo na produção de milho, com o uso de gesso somente em anos que ocorreram forte déficit hídrico. Resultados semelhantes a estes foram também encontrados por CARVALHO et al. (1986) num solo de cerrado do Brasil Central.

Diversas são as propostas para justificar a presença ou a ausência de significância quando se aplica gesso ao solo.

Pesquisadores como SOPRANO (1986) e PAVAN et al. (1984) têm encontrado maior empobrecimento em bases principalmente em magnésio e potássio, na camada superficial do solo quando o gesso é usado em doses elevadas, gerando menor produção vegetal.

Salientam que tal situação pode, no entanto, favorecer maior crescimento radicular em profundidade e com isso aumentar a produção, principalmente em condições de estresse hídrico, quando o solo não apresenta restrição física ao crescimento de raízes.

Não há dúvida de que o gesso, devido à característica de alta mobilidade no perfil do solo, carregando consigo bases de interesse nutricional, pode melhorar o padrão de fertilidade em profundidade, favorecendo o aprofundamento do sistema radicular em busca de água e nutrientes. Contudo, ausência de resposta, ou mesmo respostas negativas às doses gesso+MSC, encontradas nesta pesquisa, provavelmente sejam devidas a remoção das bases da camada superficial para à camada mais compactada, tornando-as inacessíveis ao sistema radicular da soja.

4.6. Efeito dos tratamentos no desenvolvimento radicular da soja

O crescimento de raízes na presença dos diferentes níveis de compactação subsuperficial (12,5 - 17,5 cm de profundidade) e de doses de gesso+MSC aplicadas na camada superficial do vaso, foi estudado coletando-se as raízes do anel superior (2,5-12,5 cm de profundidade) e do anel inferior do vaso situado entre 17,5-22,5 cm (Tabela 28).

Para possibilitar a execução das diversas determinações físicas após a colheita da soja, conforme proposto nesta

pesquisa, as raízes do anel central, onde foram efetuados os diversos níveis de compactação (12,5-17,5 cm), não foram coletadas.

Para inferir sobre a influência da compactação sobre a produção da parte aérea e a restrição à penetração de raízes, utilizou-se das informações obtidas no anel inferior do vaso.

Os dados de massa seca de raízes, tanto da camada superficial como da inferior do vaso, bem como as análises estatísticas encontram-se nas Tabelas 25 e 28. As análises estatísticas permitem constatar efeitos significativos dos tratamentos, não sendo observado, entretanto, efeito de interação dos efeitos principais.

4.6.1. Efeito da compactação na produção de raízes no anel superior

A aplicação do teste de Tukey nas médias de 16 repetições permite observar (Tabela 27) que as densidades do solo de 1,32 e 1,47 g/cm³ não diferiram entre si quanto à produção de raízes na camada superficial do vaso, e foram significativamente superiores às densidades de 1,62 e 1,77 g/cm³ que, por sua vez, também não diferiram entre si. Embora não sendo estatisticamente significativa, pode ser notado que uma leve compactação da camada subsuperficial possibilitou maior crescimento superficial das raízes (Tabela 27). Possivelmente, esse aumento na produção de

raízes, quando o solo da camada central do vaso recebia leve compactação, seja devido à melhor distribuição na relação ar/água e à maior disponibilidade de água e nutrientes próximo ao sistema radicular.

CINTRA & MIELNICZUCK (1983) e BORGES (1986) observaram que o sistema radicular mais superficial da soja respondeu positivamente à compactação, graças ao melhor arranjo das partículas propiciando melhor retenção de água e nutrientes. Contudo, MORAES (1988) observou que a produção de raízes foi sempre decrescente com a compactação, devido à mudança nos parâmetros físicos do solo induzidos pela compactação, os quais alteraram o enraizamento normal das plantas. Estas alterações foram tanto mais acentuadas quanto maior foi a compactação do solo.

Quanto à redução na produção de raízes na camada superficial do vaso, para densidades superiores a $1,47 \text{ g/cm}^3$, as causas não estão bem definidas. Várias podem ter sido as alterações físico-químicas na camada superficial, introduzidas no solo pela compactação subsuperficial, as quais têm consequência direta no crescimento radicular.

A baixíssima condutividade hidráulica do solo saturado observada para densidades superiores a $1,62 \text{ g/cm}^3$ (Tabela 24), pode induzir, por tempo relativamente longo, um ambiente de redução na camada superficial após cada irrigação. Com isso, tanto a disponibilidade como as taxas de renovação do oxigênio

ficaram prejudicadas, interferindo fisiologicamente no crescimento de raízes.

HOPKINS & PATRICK JR. (1970) verificaram que a taxa de difusão de oxigênio no meio aquoso é cerca de 10.000 vezes menor do que no ar. BERTRAND & KOHNKE (1957) e WINTER & SIMONSON (1978) observaram que as culturas possuem exigências diferentes pelo oxigênio, mas, de maneira geral, aceita-se que uma taxa de difusão de oxigênio da ordem de $20 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3/\text{min}$ é suficiente para o desenvolvimento radicular da maioria das culturas. Abaixo desse valor, não ocorre crescimento normal das raízes.

O estabelecimento de ambiente redutor, pode também ter interferido na disponibilidade tanto de elementos tóxicos como naqueles essenciais à nutrição das plantas, presentes na camada superficial, os quais, por sua vez, afetaram o crescimento radicular.

GAVANDE (1972) acredita que a baixa difusão de oxigênio e um conseqüente acúmulo de CO_2 podem reduzir o crescimento radicular, por aumentar a disponibilidade de elementos tóxicos como o Mn^{2+} e o Fe^{2+} e, ainda, transformar um dado nutriente em outra forma ou produto não absorvido pela planta. Este é o caso do fósforo que, quando adicionado como nutriente pode ser transformado em fosfina, produto tóxico às plantas.

A partir dessas constatações, pode-se inferir que a presença de camada compactada subsuperficial, em condições de campo, pode trazer prejuízos ao crescimento radicular tanto nas

condições de deficiência (veranicos) como em casos de excesso de água. Em caso de deficiência, a presença da camada compactada pode impedir o aprofundamento do sistema radicular bem como o movimento ascendente de água das camadas mais profundas para a superficial do solo.

Em condições de excesso de água e de baixas taxas de infiltração, como as observadas (Tabelas 4 e 24) pode formar ambiente redutor na superfície, com alterações físico-químicas quase sempre prejudiciais à planta. Especial atenção deve ser dada ao manejo da água, e mesmo nutricional em áreas onde a compactação esteja instalada, uma vez que o volume de solo explorado pelas raízes é muito menor.

Tomando-se por base dados da Tabela 4, e a observação de TAYLOR et al. (1967), de que o suprimento de oxigênio torna-se crítico quando a concentração de ar no solo está abaixo de 15%, fica claro o fato de não ter sido observado crescimento radicular quando a densidade do material de solo foi de $1,77 \text{ g/cm}^3$ (Tabela 28). Estes pesquisadores afirmam que as raízes em fase de crescimento necessitam de um fornecimento constante de oxigênio. Este, por sua vez, depende da taxa de difusão do ar no solo, a qual ocorre normalmente via macroporos. GRABLE (1966) observou que a difusibilidade do ar no solo (D) aumenta proporcionalmente com a porosidade (P) conforme a expressão $D = P^{3,33}$, no intervalo D = 10 a 40% de poros.

CAMARGO (1983) afirma que a difusão de oxigênio através da solução do solo é cerca de 10.000 vezes menor que através do próprio ar. Assim, condições de elevado conteúdo de água e pequeno espaço de aeração, observado na densidade do solo de 1,77 g/cm³ (Tabela 4), deverá limitar a difusão de oxigênio, podendo causar, em curtos espaços de tempo, danos irreparáveis ao sistema radicular da soja, reduzindo sua taxa de crescimento para esse nível de compactação, conforme observado na Tabela 28.

4.6.2. Efeito da compactação na produção de raízes no anel inferior do vaso

Quanto ao crescimento de raízes na camada inferior do vaso (17,5-22,5 cm de profundidade), ou seja, abaixo da camada compactada, constatou-se (Tabela 28) que as médias de produção de raízes não diferiram entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade até a densidade de 1,62 g/cm³. Portanto, até esse nível de compactação, não houve limitação para que as raízes se desenvolvessem em profundidade.

Na densidade de 1,77 g/cm³, a compactação impediu completamente o desenvolvimento radicular, diferindo estatisticamente das demais. A ausência de raízes nessa camada permite inferir que a resistência mecânica, ou mesmo outros fatores desfavoráveis, provocados pela compactação, impediu o desenvolvimento radicular.

Quando o impedimento é de natureza mecânica, WIERSUM (1957) e SHIERLAW & ALSTON (1984) afirmam que o tamanho do poro é a principal limitação, pois, as raízes só conseguem penetrar poros com diâmetros maiores do que os dela, embora a ponta da raiz seja elástica.

MILLER & MAZURAK (1958) enfatizam que a rigidez do poro é também um fator que governa a penetração radicular em solos compactados. Enquanto as raízes puderem deslocar as partículas do solo, elas serão capazes de crescer e forçar a passagem através dos poros, mesmo que o diâmetros destes sejam menores do que o das raízes.

A Tabela 27 mostra que o valor de densidade para o qual não houve penetração de raízes é bastante elevado. Revisando alguns trabalhos sobre o assunto, é possível perceber que o limite de densidade a partir do qual não ocorre penetração de raízes, é bastante variável e depende de vários fatores como: espécie vegetal, classe de solo, manejo da cultura, da irrigação e do solo. Dados de pesquisa, como os de VEIHMEYER & HENDRICKSON (1948), têm mostrado que a capacidade das raízes penetrarem o solo compactado varia de solo para solo e mesmo de planta para planta. Quase sempre o valor limite situa-se em torno de 1,75 g/cm³ para solos arenosos e 1,45 g/cm³ para solos argilosos.

Quanto à espécie vegetal, BORGES (1986) e BORGES et al. (1988) observaram que, em Latossolo Vermelho-Escuro textura média, não houve crescimento de raízes quando a densidade do solo

era de $1,35 \text{ g/cm}^3$ e $1,25 \text{ g/cm}^3$ para as culturas da soja e do eucalipto, respectivamente. Neste estudo, foi observado para a soja, que a variedade Cristalina apresentou maior capacidade de crescer raízes em solo compactado do que as variedades Doko e Bossier.

GROHMANN & QUEIROZ NETO (1966) observaram que o desenvolvimento das raízes não ocorria quando a densidade do solo era de $1,42 \text{ g/cm}^3$ para o Latossolo Roxo e $1,38 \text{ g/cm}^3$ para o solo Podzólico Vermelho-Amarelo. Estes pesquisadores assinalam ser a rigidez dos poros o principal fator a restringir o crescimento radicular.

5. CONCLUSÕES

A análise e a interpretação dos dados possibilitaram concluir que:

- A aplicação das doses de gesso+MSC promoveram:

a) reduções lineares nos valores de densidade do solo; conteúdos volumétricos de sólidos e de água; argila dispersa em água e em solução de hidróxido de sódio, e grau de flocculação de argila.

b) aumentos nos valores de porosidade total calculada, pseudo-silte, grau de flocculação, conteúdo volumétrico de poros de aeração.

- Ocorreu reduções lineares na produção de matéria seca da parte aérea e de raízes em função dos níveis de compactação da camada subsuperficial(anel central do vaso) .

- O gesso+MSC parece ser uma opção adequada para melhorar a estrutura e outros atributos físicos de solos degradados.

- O uso do gesso+MSC em grandes quantidades, em solos onde a compactação restringe o desenvolvimento radicular em profundidade, poderá reduzir a produção agrícola por elevar demasiadamente a concentração salina na interface solo não compactado/solo compactado ou mesmo por retirar da zona de crescimento radicular bases de interesse nutricional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. & MOORE, B.L. Chemical factors affecting root growth in sub-soil horizons of coastal plain soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **47**: 99-102, 1983.

AHMED, S.; SWINDALE, L.D.; EL-SWAIFY, S.A. Effects of adsorbed cation on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. I. Plastic limit, percentage stable aggregates and hydraulic conductivity. **Journal Soil Science**, Ottawa, **20**: 255-68, 1969.

ALLINSON, F.E. **Soil organic matter and its role in crop production**. New York, Elsevier Scientific, 1973. 637p.

ALVARENGA, C.R. Potencialidade de adubos verdes para conservação e recuperação de solos. Viçosa, Minas Gerais, UFV, Imprensa Universitária, 1993. 112p. (Doutorado - Universidade Federal de Viçosa)

- BACCHI, O.O.S. Efeito da compactação sobre o sistema solo-panta em cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). Piracicaba, 1976. 65p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- BALIGAR, V.C.; NASH, V.E.; HARE, M.L.; PRICE Jr., J.A. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. **Agron. J.**, Madison, **67**:842-4, 1975.
- BALLESTERO, S.D. Efeito da semeadura do milho em quatro níveis de umidade na compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. Piracicaba, 1992. 90p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil Physics**. 4.ed., New York, John Wiley & Sons. 498p, 1972.
- BERTRAND, A.R. & KOHNKE, H. Subsoil conditions and their effects on oxigen supply and the growth of corn roots. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **2**:138-42, 1957.
- BLAKE, G.R. Bulk density. In: BLAKE, C.A. coord. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p. 1344-90 (Agronomy Serie, 9).

- BOGDANOVIC, M.R., DJURICIC, K.V.; MESORINSKI, N. The action of various humates on oats in water cultures. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 8, Bucharest, 1964. **Transactions**. Bucharest, Publ. House of the academy of the socialist Republic of Romenia, 1964. v.4, p.1171-5.
- BORGES, E.N. Resposta da soja e do eucalipto a camadas compactadas de solo. Viçosa, 1986. 74p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).
- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NEVES, J.C.L. Respostas de mudas de eucalipto a camadas compactadas de solo. **Revista Árvore**, Viçosa, **10**(2): 181-95. 1987.
- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B. Respostas de variedades de soja à compactação de camada de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, **35**(202): 553-68, 1988.
- BOUYOUCOS, G.J. The influence of water on soil granulation. **Soil Science**, Baltimore, **18**:103-08, 1924.
- BRADY, N..C. **Nature and properties of soil**. 8.ed. New York, McMillan, 1974. 639p.

CAMARGO, A.O. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas.**

Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.

CARVALHO, L.J.C.B.; GOMIDE, R.L.; LUCHIARI, J.R.; RODRIGUES, G.C.

Estratégias para redução dos efeitos dos veranicos em cultura de milho e soja na região de cerrado. Brasília, EMBRAPA/CPAC, Planaltina, 1985. (Comun. Técnico 42). 24p.

CARVALHO, L.J.C.B.; GOMIDE, R.L.; RODRIGUES, G.C.; SOUZA, D.M.de;

FREITAS, JR. E. de. Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solos de cerrado. In: ANAIS SIMPÓSIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1,. Brasília, EMBRAPA-DDT, 1986. p. 61-83,.

CASSEL, D.K. Effects of plowing depth and deep incorporation of lime and phosphorus upon physical and chemical properties of two Coastal plain soil after 15 years. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **44**: 1116-20, 1980.

CASSEL, D.K.; BOWEN, H.D.; NELSON, L.A. An evolution of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk sand loam. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **42**: 116-120, 1978.

CASTILLO, S.R.; DOWDY, R.H.; BRADFORD, J.M.; LARSON, W.E.

Effects of applied mechanical stress on plant growth and

nutrient uptake. **Agronomy Journal**, Madison, **74**: 526-530, 1982.

CHILDS, E.C. **Soils water phenomena**. 1.ed. New York, John Wiley, 493p, 1969.

CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUCK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista brasileira Ciência do Solo**, Campinas, **7**: 323-7, 1983.

CLARKSON, D.T. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanism for resistance. In: RORISON, I.H., ed. **Ecological aspects of the mineral nutrition of plant**. Blackwell, Oxford and Edinburg, 1969. p.381-397.

COCHARANE, T.T. & AZEVEDO, L.G. As savanas do trópico sul-americano, uma visão geral dos seus recursos de clima e solo para desenvolvimento agrotecnológico baseado no inventário computadorizado do sistema de terra do CIAT/EMBRAPA. In: ANAIS SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, Savanas Alimento e Energia, Brasília, 1982. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1982. P.773-801.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS.

Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas Gerais. 3. Aproximação. Belo Horizonte, EPAMIG, 1978. 80p.

COSTA, L. M.; SEDIYAMA, C.S.; NOVAIS, R.F.; BRUNELI JR., H.C.; FOGLI, M.G.R. Estudo do sistema radicular de cinco variedades de soja em solos com camadas compactadas na Fazenda Itamarati. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE A CULTURA DA SOJA. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. p.113-4.

COSTA, M. P. **Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo.** Piracicaba, 1983, 137p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

CURTIS, R.O. & POST, E.W. Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forrest soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison., **28**:285-96, 1964.

DONG, A.; CHESTERS, G. & SIMSIMAN, G.V. Soil dispersibility. **Soil Science**, Baltimore, 136: 208-12, 1983.

DUCHAUFOR, P.H. & JAQUIN, F. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. Bulletin École **Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries**, Nancy, **8**(1): 1-24, 1966.

EAGLEMAN, J.R. & JAMIESON, V.C. Soil layering and compaction effects on unsaturated moisture movement. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **26**:519-22, 1962.

ELSON, J. & LUTZ, J.F. Factors affecting aggregation of Cecil soil and effect of aggregation on run-off and erosion. **Soil Science**, Baltimore, **50**: 265-75, 1940.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, 1979. n.p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório Técnico anual do centro de pesquisa agropecuária dos cerrados 1976 - 1978.** Brasília, EMBRAPA - CPAC, 1978, 183p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório Técnico anual do centro de pesquisa agropecuária dos cerrados 1979 - 1980.** Brasília, EMBRAPA - CPAC, 1981, 190p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos.** Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. , Rio de Janeiro, 1982, 526p.

FAHAD, A.A.; MILKE, L.N.; FLOWERDAY, A.D.; SWARTZENDRUBER, D. Soil physical properties as affected by soybean and other cropping sequences. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **46**: 377-81, 1982.

FARINA, M.P.W. & CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **52**: 175-180, 1988.

FASSBENDER, H.W. **Química de suelos com ênfasis en suelos de América Latina.** San José, Costa Rica, IICA, 1984. 422p.

FERRAZ, E.S.B. Determinação simulada de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am . Piracicaba, 1974. 120p (Livre docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

- FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W. ed. **The plant root and its environment.** Charlttesville, Universyty Press of Virginia, 1974, p.601-642.
- FREIRE, F.M.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H.V.; MELLES, C.C.A. **Calagem, gessagem e adubação do cafeeiro.** Belo Horizonte, EPAMIG, 1984, 20p. (Boletim Técnico 11).
- FRIED, M.B. & BROESART, H. **The soil-plant systems in relation to inorganic nutrition.** New York, Academic Pres, 1967. 358p.
- FURLANI, P.R; QUAGGIO, J.A.; GALLO, P.B. Differential responses of sorghum to aluminum in nutrient and acid soil. In: WRIGHT et al., Eds. **Proceedings of the Second International Symposium on plant-soil Interaction at low pH.** Kluwer Academic Publishers, London, p. 953-958, 1991.
- GAVANDE, S.A. **Física de suelos.** Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), México, 1972. 315p.
- GHIEDYAL, B.P. & SATYANARAYANA, T. Effects of compaction on the physical properties of four different soils. **Journal. Industrie Society Soil Science, 13:145-9, 1965.**

- GILLMAN, G.P. The influence of net change an water dispersible clay and sorbid sulphate. **Australian Journal of Soil Research**, Melburne, **12**: 173-6, 1974.
- GRABLE, A.R. Soil aeration and plant growth. **Advance in Agronomy**, New York, 18: 57-106, 1966.
- GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do Estado de São Paulo. II - Influência da matéria orgânica, dos óxidos de ferro livres e dos cátions trocáveis na superfície específica total do solo. **Bragantia**, Campinas, **31**: 167-85, 1972.
- GROHMANN, F. & QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, Campinas, **25**:421-31, 1966.
- GROHMANN, F. Compacidade. In: MONIZ, A. C. ed. **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975. p.93-99.
- GUILHERME, M.R. Efeito da aplicação de calcário calcinado, gesso e misturas de calcário dolomítico calcinado e gesso em culturas de interesse econômico. Piracicaba, 1976. 56p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

GUIMARÃES, P.T.C. Gesso agrícola na neutralização do alumínio nas camadas subsuperficiais do solo: Aplicações às culturas anuais e perenes. In: ANAIS SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, Brasília, EMBRAPA-DDT, 1986. p.145-67.

GUMBS, F.A. & WARKENTIN, B.P. The effect of bulk density and initial water on infiltration in clay soil samples. **Soil Science Society America Proceedings**. Madison, **36**: 720-24, 1972.

GUPTA, R.K.; BHUMBLA, D.K.; ABROL, I.P. Effect of sodicity, pH, organic matter and calcium carbonate on the dispersion behavior of soils. **Soil Science**, Baltimore, **137**: 245-51, 1984.

HALLSWORTH, E.G. An examination of some factors affecting the movement of clay in an artificial soil. **Journal of Soil Science**, Ottawa, **14**: 360-71, 1963.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre, UFRGS, 1970. 238p.

HOPKINS, R.M. & PTRICK JR., W.H. Combined effects of oxygen concentration. **Soil Science**, Baltimore, **108**:408-13, 1970.

- HORN, R. & DEXTER, A.R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, **13**:253-66, 1989.
- HOWELL, M. Gypsum use in the wheatbelt. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, **28**: 40-43, 1987.
- HUDSON, N. **Soil Conservation**. 2. ed., New York, Cornell University Press, 1977. 324p.
- HUE, N.V.; ADAMS, P.; EVANS, C.E. Sulfate retention by an acid B horizon of an Ultisol. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **49**: 1196-1200, 1985.
- ISLAM, M.A. & HOSSAIN, M. Aggregation on East Bengal soils in relation to their chemical composition. **Soil Science**, Baltimore, **78**: 429-34, 1954.
- JACKSON, W.A. Physiological effects of soil acidity. In: R.W. PEARSON & ADAMS, F., ed. **Soil acidity and liming**. Madison, Amer. Soc. of Agronomy, 1967. p.43-124.
- JEFFREY, D.W. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. **Journal. Ecol.**, London , **58**:279-89, 1970.

JUCKSCH, I. Calagem e dispersão de argila em amostra de um Latossolo Vermelho-Amarelo. Viçosa, 1987. 37p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba, Ed. Agronômica "Ceres", 1985. 492p.

KLUTE, A. & DIRKSEM, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed) **Methods of soil analysis.**, Soil Sci. Soc. Amer. p.687-734, . Serie agronomy number 9, Madison, 2nd edition, 1986.

KOENIGS, F.F.R. **The mechanical stability of clay soil as influenced by the moisture conditions and some factors.** Wageningen Hol Centrum voor Landbouwpublikaties em Landbouwdocumentatie, 1961. 171p.

KOHNKE, H. **Soil physics**. New Hork, McGraw-Hill,, 1968. 224p.

KONONOVA, M.M. **Soil organic matter**. Oxford, Pergamon Press, 1961. 544p.

LABANAUSKAS, C.K.; STOLLY, L.N.; ZENTMYER, G.A.; SZUSZKIEWICZ, T.E. Influence of soil oxigen and soil water on the

acumulation of nutrients in seedlings (Perseamericana Mill).
Plant and Soil, The Hague, **29**: 391-406, 1968.

LAL, R.L. No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. **Soil Science Society America Journal**, Madison, 40: 762-768, 1976.

LAWS, W.D. & EVANS, D.D. The effects of long-time cultivation on some physical and chemical properties of two rendzina soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **14**:15-19, 1949.

LONGO, J.V. Fracionamento e caracterização de substâncias húmicas em materiais de solo. Viçosa, 1982. 66p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado", Características, propriedades e manejo**. Piracicaba, Instituto Internacional da Potassa, 1984. 162p.

MACHADO, J.A. & BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. **Revista brasileira Ciência do Solo**, Campinas, **2**:81-4, 1978.

- MARTIN, J.P.; MARTIN, W.P.; PAGE, J.B.; RANEY, W.A.; DEMENT, J.D.
Soil aggregation. **Advance in Agronomy**, New York, **7**: 1-37,
1955.
- McCRAy, J. M.; RADCLIFFE, D. E.; SUMNER, M. E. Influence of
solution Ca on water retention and soil strength of Typic
Hapludults. **Soil Sci.**, Baltimore, **151**:312-16, 1991.
- MILLER, D.E. **Flow and retention of water layered soils.**
Washington, USDA, 1969. 28p.
- MILLER, S.A. & MAZURAK, A.P. Relationships of particle and pore
sizes to the growth of sunflowers. **Soil Science Society
American Proceedings**, Madison, **22**:275-8, 1958.
- MILLER, W.P. Infiltration and soil loss of three gypsum-amended
ultisols under simulated rainfall. **Soil Science Society
America Journal**, Madison, **51**: 1314-20, 1987.
- MILLER, W.P. & SCIFRES, J. Effect of sodium nitrate and gypsum
on infiltration and erosion of a highly weathered soil. **Soil
Science**, Baltimore, **145**: 304-09, 1988.

- MIRREH, H.F. & KETCHESON, J.W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, **52**:477-483, 1972.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. Berkeley, University of California, John Wiley, Inc., 1976. 422p.
- MIYASAKA, S.; CAMARGO, A.P.; INFORZATO, R. Efeito da cobertura e da incorporação ao solo imediatamente antes do plantio de diferentes formas de matéria orgânica não decomposta, na cultura do feijoeiro. **Bragantia**, Campinas, **24**(32): 349-69, 1966.
- MONTOVANI, E.V. Compactação do solo, máquinas e implementos agrícolas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, **13**(147). Manejo do Solo, Março 1987 p.17-32.
- MORAES, M.H. Efeitos de compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Piracicaba, 1988. 105p. (Mestrado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

- MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um latossolo de textura média álico. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **16**:187-94, 1992.
- MOURA FILHO, W. & BUOL, S.W. Studies of a Latossol Roxo (Eutustox) in Brazil; Clay mineralogy. **Experimentae**, Viçosa, **13**: 218-34, 1972.
- NEVES, J.C.L. Aspectos nutricionais em mudas de Eucaliptus Spp. tolerância ao alumínio e níveis críticos de fósforo no solo. Viçosa, 1983 , 87p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).
- NOBLE, A.D. & SUMNER, M. E. Growth and nutrient content of sobeans in relation to solution calcium and aluminum. **Shout African Journal Plant and Soil**, Pretória, **6**:113-19, 1989.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanism and implications for management. **Plant and Soil**, The Hague, **76**: 319-37, 1984.

OLIVEIRA, I.P.; KLUTHCOUSKI, J.; REYNIER, F.N. Efeito do fosfegesso na produção de feijão e arroz e no comportamento de alguns nutrientes. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1, Brasília. **Anais...** Brasília, EMBRAPA-DDT, 1986. p. 45-59.

PAOLINELLI, M.T.; OLIVEIRA, P.M.; SA SANTOS, P.R.; LEANDRO, V.P.; MORAES, W.V. Aplicação direta do fosfegesso. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1, Brasília, **Anais...** Brasília, EMBRAPA-DDT, 1986. p.197-207.

PAVAN, M.A. **Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais.** Piracicaba, POTAFOS, 1986. s.p. (Informações Agronômicas, 35).

PAVAN, M.A. O cálcio como nutriente para as culturas. In: SILVA, M.C. coord. **P, Ca, Mg, S e micronutrientes. Situação atual e perspectivas na agricultura.** São Paulo, Ed. Manah S/A, 1986. p.82-88.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum application to a brazilian oxisol. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **48**: 33-38, 1984.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **46**: 1201-1207, 1982.

PEELE, T.C.; BEALE, O.W.; LATHAM, E.E. Effect of lime and organic matter on the erodibility of cecil clay. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **3**:289-95, 1938.

PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, A. Mechanical impedance and corn seedling root growth. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **26**: 319-22, 1962.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 8 ed., Piracicaba, Nobel, 1978. 466p.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo, a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo, Nobel, 1984. 549p.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, V.van; GALLO, P.B.; MASCARENHAS, H.A.A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesq. Agrop. Bras**, 1992.

RAIJ, B. VAN Reações de gesso em solos ácidos. IN: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, 1992. Brasília, Ed. Nagy, 1992. p.105-119.

RAIJ, B. VAN. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, Campinas, **28**: 85 - 113, 1969.

REEVE, N.G. & SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochemophysics**, Pretoria, 4: 1-6, 1972.

REICHARDT, K. Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo. Piracicaba, 1965. 34p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

RESENDE, M. **Pedologia**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 100p. (Boletim de extensão 142).

RIOS, M.A. & PEARSON, R.W. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behavior. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **28**: 232-235, 1964.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; COSTA, U.F. Calcium deficiency en clayey B horizons of savannah oxisols. **Soil Science**, Baltimore, **133**: 378-382, 1982a.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; ESPINOZA, W.; LOBATO, E.; DOWN-WORD E. Movement of calcium and the improvement of subsoil rooting in oxissols of Brazil. In: RUSSEL, R.S.; IGUE K.; MEHTO, Y.R. ed. **The Soil/root system in relation to brazilian agriculture**. Londrina, IAPAR, 1982b. p.137-151.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; SOUZA, D.M.G. Lixiviação de cálcio e magnésio em solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15. Acidez e calagem no Brasil. Campinas, Sociedade Brasileira Ciência do Solo, 1983. p.109-125.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, **72**: 40-44, 1980.

ROSA JUNIOR, E.J. Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos de Ponta Grossa. Viçosa, 1984. 89p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

- ROSEMBERG, N.J. Response of plants to physical effects of soil compaction. **Advance. Agronomy**, Ney York, **16**:181-96, 1964.
- ROSEMBERG, N.J. & WILLITS, N.A. Yield and physis logical response of barley and beans grown in artificially compacted soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **26**: 78-82, 1962.
- ROTH, C.H. & PAVAN, M.A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, Amsterdan, **48**: 351-61, 1991.
- ROVIRA, A.D. & GREACEN, E.L. The effect of aggregate disruption on the activity of microorganisms in the soil. **Australian Journal of Soil Research**, Melburne, **8**:659-73, 1957.
- RUSSEL, E.J. & RUSSEL, E.W. **Las condiciones de suelos y el desarrollo de los plantas**. Madrid, Aguilar, 1964. 771p.
- RUSSEL, W.W. Soil structure, **Imp. Bur. Sci. Tech. Commun**, **37**: 1-40, 1938.
- SAINI, G.R. Organic matter as a measure of bulk density of soil. **Nature**, London, 210:1295-6, 1966.

SALOMAN, N. Soil aggregation-organic matter relationships in redtop potato rotations. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, 26: 51-4, 1962.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M.E.; MILLER, W.P.; FARINA, M.P.; PAVAN, M.A.; FEY, M.V. Use gypsum on soils: A review. **Advances in Soil Science**, New York, 9: 101-111, 1989.

SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, Dardrecht, 77:15-28, 1984.

SILVA, A.P. Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum*, L.). Piracicaba, 1984. 75p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

SILVA, J.B.C.; NOVAIS, R.F.; SEDIYAMA, C.S. Identificação de genótipos de sorgos tolerantes a toxidez de alumínio. **Revista brasileira Ciência do Solo**, Campinas, 8: 77-83, 1984.

SOMAPALA, H. & WILLAT, S.T. Effects of plant age on root penetration. In: LAL, R.; GREENLAND, D.J. ed.. **Soil physical conditions and crop production**. London, John Wiley, 1979. p349-62.

SOPRANO, E. Movimentação de íons e crescimento de café em função da aplicação de sais de cálcio em colunas de solo. Viçosa, 1986. 92p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry**. New York, Wiley Interscience publication, 1982. 443p.

STRICKLING, E. The effect of soybean an volume weight and water stability of soil aggregates soil organic matter content, and crop yield. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **50**: 30-4, 1951.

SUMNER, M.E. Uso atual do gesso no mundo em solo ácidos. IN: II SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA,2., Uberaba, 1992. Brasília, Ed. Nagy, 1992. p.7-40.

SUMNER, M.E.; FEY. M.V.; FARINA, M.P. Amelioration of acid subsoils with phosphogypsum. **East African Agricultural and Forestry Journal**, Nairobi, **49**: 18-83, 1986.

SUMNER, M.E.; RADCLIFFE, D.E.; MCCRAY, M.; CARTER, E.; CLARK, R.L. Gypsum as an ameliorant for subsoil hardpan. **Soil Technology**, Crenlinge-Destedt, **3**:253-8, 1990.

- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR., J.J. Cotton seedling root elongation as affected by soil strength changes by surving and water extraction. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, **31**(5): 700-04, 1967.
- VASCONCELOS, C.A.; SANTOS, H.L.; ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, G.E. Avaliação agronômica do gesso nas culturas do milho, sorgo e soja em latossolos vermelho-escuro, distrófico, fase cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 18, Vitória-ES. **Resumos**. Vitória, EMCAPA, 1990, p. 108.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.S. Soil density and root penetration. **Soil Science**, Baltimore, **65**:487-93, 1948.
- VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo que afetam a produtividade agrícola. In: IAPAR, ed. **Manual Agropecuário para o Paraná**. Londrina, **2**: 37-44, 1978.
- VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction of storage and movement of soil air and water. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, **4**: 242-6, 1961.
- VOORHEES, W.B. Soil compaction how it influences moisture temperature, yield, root growth. **Crops and Soil Magazine**, **29**:13-6, 1977.

WARRINGTON, D.; SHAINBERG, I.; AGASSI, M.; MORIN, J. Slope and phosphogypsum effects on runoff and erosion. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **53**: 1201-05, 1989.

WIERSUN, L.K. The relationships of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, **9**: 75-85, 1957.

WILLIAMS, R.J. **Relationships between the composition of soils and physical measurements made on them.** Rep. Rothamsted Exp., Stn, **2**: 5-35, 1970.

WINTER, E. & SIMONSON, R.W. Effects of soil compaction and development and yield of corn (maize). **Soil Science, Baltimore**, **58**:435-43, 1978.

YAACOB, O. & BLAIR, G.J. Effect of legume cropping and organic matter accumulation on the infiltration rate and structural stability of a granite soil under simulated tropical environment. **Plant and Soil**, Dordrecht, **60**: 11-20, 1981.

YONG, R. N. & WARKENTIN, B. P. **Soil properties and behavior.** Amsterdam, Elsevier Scientific, 1975. 353p.