

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

DEFESA DE TESE

**COMPACTAÇÃO DO SOLO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS
FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM NEOSSOLO FLÚVICO**

ELIANE FERREIRA VIANA

VIRTUS IMPAVIDA

UFPE

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL

Dezembro – 2004

ELIANE FERREIRA VIANA

**COMPACTAÇÃO DO SOLO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS
FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM NEOSSOLO FLÚVICO**

Defesa de Tese submetida ao curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos.

ORIENTADOR: WALDECIRO COLAÇO

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL

Dezembro – 2004

Viana, Eliane Ferreira

Compactação do solo : alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos de um neossolo flúvico / Eliane Ferreira Viana. – Recife : O Autor, 2004.
viii, 100 folhas: il., fig., tab., fotos.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Energia Nuclear, 2004.

Inclui bibliografia e apêndices.

1. Energia nuclear - Radiogramia. 2. Compactação do solo – Variação da densidade, liberação CO₂. 3. Matéria orgânica – Melhoramento de atributos do solo e parâmetros da planta. 4. Radiação Gama – Planta do feijão-caupi. 5. Resistência do solo – Aumento da impedância mecânica. I. Título.

621.039.8
621.4837

CDU (2.ed.)
CDD (22.ed.)

UFPE
BC2005-061

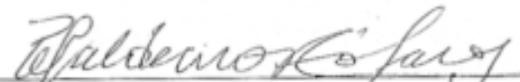
**COMPACTAÇÃO DO SOLO: ALTERAÇÕES NOS
ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE
UM NEOSSOLO FLÚVICO**

Eliane Ferreira Viana

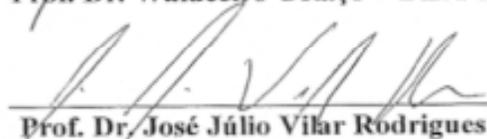
APROVADA EM: 20.12.2004

ORIENTADOR: Prof. Dr. Waldecir Colaço

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Waldecir Colaço - DEN/UFPE



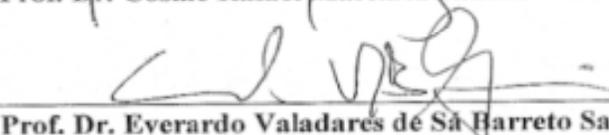
Prof. Dr. José Júlio Vilar Rodrigues - DA/UFRPE



Prof. Dr. Clemente José Gusmão Carneiro da Silva - DEN/UFMG



Prof. Dr. Cosme Rafael Martinez Salinas - LIKA/UFPE



Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio - DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Aos meus pais

Dorgival e Arlinda

Minha homenagem e minha gratidão

A **Aelson**, pela compreensão e incentivo

Rafael e Mateus, meus filhos...

Bons motivos para não desistir nunca.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que me cinge de força e segue aperfeiçoando meu caminho.

À Universidade Federal de Pernambuco, e em especial, ao Departamento de Energia Nuclear – DEN, pela infra-estrutura, formação profissional e excelente acolhida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudo concedida.

Ao Prof. Dr. Waldecir Colaço, pela orientação, estímulo, paciência e amizade.

Ao Comitê de Acompanhamento formado pelos professores Dr Mário Alves Lima Junior, Dr. Everardo de Sá Valadares Barreto Sampaio e Dr Antonio Celso Dantas Antonino pelas sugestões sempre oportunas, as quais contribuíram para o aprimoramento do trabalho.

Ao Professor Dr. Antonio Celso Dantas Antonino, por colocar a disposição a estrutura do Laboratório de Física do Solo, inclusive com apoio computacional e ao professor Dr. Clovis A. Hazin, pela ajuda financeira concedida na sua gestão na Coordenação do PROTEN.

Em especial, ao técnico João Batista, do Laboratório de Microbiologia do Solo presente em todas as etapas do desenvolvimento da pesquisa.

Ao pessoal do Laboratório de Física do solo do Departamento de Energia Nuclear (DEN). Aos técnicos, Vigberto, Ricardo e Antonio.

Aos Doutores Edvane Borges e Cosme Rafael pelas valiosas discussões, sugestões e paciência na leitura do trabalho.

Aos Laboratórios de Estrutura e Física do solo do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Pernambuco, pelas análises e testes realizados. Especialmente, ao Professor Dr. Amaro Henrique Pessoa Lins por ter acreditado no tema e disponibilizado o Laboratório de Estrutura (LE). Aos técnicos Francisco (Chico), Ezequiel e Cazuzza pelo interesse e ajuda durante a realização dos testes de compactação.

Aos amigos de jornada Palmira, Ariosto, Kátia, Mônica, Tabosa, Roberto, Helena, Fabiana, Sergio, Audrin, Ioneide, Williams, Romualdo, Jorge, Eduardo e Viviane.
Às amigas de sempre Edvane Borges e Ana Lucia.

**COMPACTAÇÃO DO SOLO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS
FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM NEOSSOLO FLÚVICO**

SUMÁRIO

	Pagina
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO.....	vi
SUMMARY.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 A agricultura moderna e a compactação do solo.....	3
2.2 O processo de compactação do solo.....	5
2.3 Fatores responsáveis pela compactação.....	9
2.3.1 Uso de máquinas agrícolas.....	10
2.3.2 Implementos de preparo do solo.....	11
2.4 A compactação e o sistema solo-planta.....	13
2.4.1 A compactação e características hidrodinâmica e mecânicas do solo..	15
2.4.1.1 Curva característica da água no solo.....	15
2.4.1.2 Densidade do solo.....	16
2.4.1.3 Resistência do solo à penetração.....	17

2.4.1.4	Porosidade.....	18
2.5	A compactação e as relações biodinâmicas entre o solo e a planta.....	20
2.5.1	Aeração do Solo.....	20
2.5.2	Conteúdo de água.....	21
2.5.3	Matéria Orgânica.....	22
2.5.4	Sistema Radicular.....	23
3	MATERIAL E METODOS.....	26
3.1	<i>EXPERIMENTOS EM CONDIÇÃO DE LABORATÓRIO.....</i>	26
3.1.1	Solo.....	26
3.1.2	Material Adicionado.....	27
3.1.3	Medidas da Liberação de Dióxido de Carbono.....	29
3.1.4	Determinação de índices físicos do solo.....	30
3.1.5	Delineamento Experimental.....	31
3.2	<i>EXPERIMENTO EM CONDIÇÃO DE CASA DE VEGETAÇÃO.....</i>	33
3.2.1	Experimento I.....	33
3.2.1.2	Sistema de compactação.....	33
3.2.1.3	Dispositivo Experimental.....	34
3.2.1.4	Material Adicionado.....	34
3.2.1.5	Determinação de Índices da Planta.....	36

3.2.1.6	Determinação de índices físicos do solo.....	37
3.2.1.7	Delineamento Experimental.....	38
3.2.2	Experimento II.....	38
3.2.1.3	Sistema de compactação.....	38
3.2.2.4	Dispositivo Experimental.....	39
3.2.2.5	Determinação de Índices da planta.....	40
3.2.2.6	Determinação de índices físicos do solo.....	41
3.2.2.7	Delineamento Experimental.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	APÊNDICES.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pagina
01	Curva típica da densidade x umidade para um solo de textura média, indicando a máxima densidade obtida a partir de ensaios realizados em laboratório, chamado de ensaio Proctor normal. Adaptado de HILLEL (1980).....	8
02	Compactação do solo versus propriedades (Adaptado de SEIXAS, 2000).....	13
03	Sistema fechado de incubação para medida do CO ₂ liberado determinado por volumetria de neutralização. Adaptado de FERREIRA (1997).....	28
04	Foto ilustrativa do sistema de compactação hidromecânica de solo desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear.....	33
05	Tubos de PVC utilizados na montagem do experimento em casa de vegetação. As amostras de solo contidas nos tubos foram assim preparadas compactadas artificialmente.....	34
06	Vista lateral do Sistema de Compactação desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear.....	39
07	Latões de chapa de ferro sendo preparados para utilização em casa de vegetação.....	39
08	Comparação entre os dados de deformação das amostras de solo obtidos com o Sistema de Compactação Hidromecânica de solo do Departamento de Energia Nuclear (DEN) e a Prensa Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil (DEC). As amostras de 1 a 4 e de 5 a 8 foram compactadas com 1 e 2 toneladas, respectivamente.	44
09	Curva de compactação de um solo Neossolo flúvico, obtida pelo método de Proctor Normal.....	45

- 10 Influência dos diferentes modos de aplicação da borra de café e de algas marinhas na liberação do C-CO₂ do Neossolo flúvico, em um mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹) e densidade global (1,53 Mg.m⁻³). 47
- 11 Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvico, em resposta a adição de matéria orgânica (borra de café e de Algas marinhas) e modos de aplicação (superfície, incorporado e localizado). Letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente, comparam tipo de matéria orgânica e modos de aplicação. Médias com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (1%)..... 49
- 12 Mineralização (na base de C aplicado) da matéria orgânica (borra de café e de Algas marinhas) em um Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta aos modos de aplicação (incorporado, superfície e localizado). Letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente, comparam tipo de matéria orgânica e modos de aplicação. Médias com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (1%)..... 50
- 13 Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta a tipos (borra de café e algas marinhas) e modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes densidades do solo (1,30; 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³). Letras maiúsculas comparam modos de aplicação dentro do mesmo resíduo, para a mesma densidade do solo. Letras minúsculas comparam tratamentos com o mesmo resíduo para cada nível de densidade do solo, pelo Teste de Tukey (1%)..... 52
- 14 Mineralização da matéria orgânica do Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta a tipos (borra de café e algas marinhas) e modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes densidades do solo (1,30; 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³). Letras maiúsculas comparam modos de aplicação dentro do mesmo resíduo, para a mesma densidade do solo. Letras minúsculas comparam tratamentos com o mesmo resíduo para cada nível de densidade do solo, pelo Teste de Tukey (1%)..... 53

- 15 Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta: a) tipos (borra de café e de algas marinhas) e b) modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes conteúdos de água do solo (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg⁻¹). Letra maiúscula compara tratamentos dentro de cada nível de conteúdo de água do solo. Letra minúscula compara modos de aplicação (tipo de matéria orgânica) em diferentes níveis de conteúdo de água no solo. Ambos pelo Teste de Tukey (p<0.01)..... 57
- 16 Mineralização da matéria orgânica no Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta: a) tipos (borra de café e algas marinhas) e b) modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes conteúdos de água do solo (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg⁻¹). Letra maiúscula compara tratamentos dentro de cada nível de conteúdo de água do solo. Letra minúscula compara modos de aplicação (tipo de matéria orgânica) em diferentes níveis de conteúdo de água no solo. Ambos pelo Teste de Tukey (p<0.01)..... 58
- 17 Altura de planta (a), massa seca da parte aérea (b) e massa seca de nódulos (d) do feijão caupi - IPA 206, aos 60 dias de cultivo em um Neossolo flúvico (SNC -solo não compactado; SC - solo compactado)..... 61
- 18 Efeito da adubação em um Neossolo flúvico cultivado com feijão caupi - IPA 206. Altura de planta (a), massa seca dos nódulos (b) e massa seca parte aérea (c). Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)..... 63
- 19 Efeito da adição de organomineral 2, organomineral 1, esterco e NPK, em solo Neossolo flúvico, compactado (SC - 1,60 Mg.m⁻³) e não compactado (SNC - 1,30 Mg.m⁻³), sob o comprimento de raízes do feijão caupi. Letras maiúsculas comparam materiais adicionados para uma mesma densidade. Letras minúsculas comparam as densidades para um mesmo adubo. Ambos pelo teste de Tukey a (5%)..... 64
- 20 Curvas de retenção de água do solo Neossolo flúvico, solo não compactado (SNC - 1,30 Mg.m⁻³), solo compactado (SC - 1,60 Mg.m⁻³) sem material e solo compactado com adição isolada dos materiais: organomineral 2, organomineral 1, esterco e NPK 65

LISTA DE TABELAS

	Pagina
01 Principais características físicas e químicas do solo em estudo.....	26
02 Fontes e doses de adubos utilizados na cultura de feijão caupi.....	35
03 Resultado das análises químicas dos fertilizantes organominerais 1 e 2 adicionados ao solo.....	36
04 Matéria seca da parte aérea e diâmetro de caule e do feijão do caupi, em diferentes doses de irradiação gama, cultivado em um Neossolo flúvico, na presença e ausência de compactação.....	69

COMPACTAÇÃO DO SOLO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DE UM NEOSSOLO FLÚVICO

AUTORA: ELIANE FERREIRA VIANA

ORIENTADOR: Prof. Dr. WALDECIRO COLAÇO

RESUMO

O manejo eficiente do solo propõe a utilização correta de práticas agrícolas no sentido de minimizar a desestruturação, a compactação e a perda de nutrientes do solo, principais causadores de sua degradação. A preocupação reside no fato de que os impactos causados pela compactação podem estar relacionados também com a capacidade do solo em perder C tendo esse efeito forte influência na emissão de CO₂ para a atmosfera. Por outro lado, a indução a mutação, ferramenta valiosa no desenvolvimento de materiais genéticos tolerantes ou resistentes a adversidades ambientais, pode ser bastante útil no desenvolvimento de culturas em solos compactados. Considerando esses aspectos objetivou-se, investigar o efeito da compactação, conteúdos de água e modos de aplicação de materiais orgânicos, na liberação do CO₂ do solo. Procurou-se, ainda, avaliar o desenvolvimento do feijão caupi [*Vigna unguiculata*, (L.) Walp], variedade IPA 206, em um Neossolo flúvico artificialmente compactado, adicionado de diferentes materiais (esterco, NPK, organomineral-I e organomineral-II). Avaliou-se também o desenvolvimento caupi quando suas sementes foram submetidas à irradiação- γ (⁶⁰Co) e cultivadas em solo compactado e não compactado, em casa de vegetação, por 60 dias. A adição isolada de borra de café e algas marinhas, ao solo, influenciou a liberação do CO₂ do solo, refletindo variações na dinâmica da microbiota heterotrófica do solo. A velocidade de liberação de CO₂ diminuiu com o aumento na densidade global do solo, evidenciando reduções na aeração. A altura de planta, produção de matéria seca da parte aérea, comprimento da raiz e matéria seca dos nódulos do caupi, foram diminuídos pelo aumento da densidade do solo. A incorporação de

materiais organominerais ao solo artificialmente compactado, resultou em aumento na altura de planta, produção de matéria seca da parte aérea e comprimento da raiz, sugerindo atuação benéfica desses materiais no desenvolvimento do caupi, possivelmente em função de uma melhora na estrutura do solo e na absorção dos nutrientes pelas plantas. Entretanto, não foi observado aumento na capacidade de retenção de água pelo solo, em função da adição dos materiais. Houve redução significativa na altura de planta e na produção de matéria seca da parte aérea, em resposta ao aumento da densidade do solo ($1,30 \text{ Mg. m}^{-3}$ solo não compactado e $1,70 \text{ Mg. m}^{-3}$ - solo compactado) e às doses crescentes de radiação- γ (0; 100; 200 e 300 Gy). O diâmetro do caule apresentou redução significativa, em resposta ao aumento da densidade do solo, entretanto isto não ocorreu em relação à irradiação. O aumento da densidade do solo ocasionou aumento da resistência à penetração de raízes no solo, sendo os valores encontrados respectivamente 0,32 e 1,2 MPa para o solo não compactado e compactado. A resistência de 1,2 MPa é considerada restritiva mas não impeditiva ao crescimento radicular. Verificou-se, também, que a capacidade de retenção de água pelo solo foi reduzida em resposta ao aumento da densidade do solo.

SOIL COMPACTION: ALTERATIONS IN PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATRIBUTES IN A FLUVIC NEOSOIL

AUTHORESS: ELIANE FERREIRA VIANA

ADVISER: Prof. Dr. WALDECIRO COLAÇO

SUMMARY

The efficient management of soil proposes the correct utilization of agricultural practices to minimize the loss of structure, compaction, and nutrient losses in the soil, which are the main causes of its degradation. Such concerns reside in the fact that the impact from compaction can also be related to the soil capacity for losing carbon. This effect has strong influence on CO₂ emissions to the atmosphere. On the other hand, induced mutation, a valuable tool for the development of genetic materials, that is tolerant to environmental adversities, can be helpful in the adaptation of crops in compacted soils. This study was conducted to evaluate isolated and combined effects of compaction, water content and organic amendments in soil respiration. Also it investigates the development of cowpea (*V. unguiculata*, L. Walp] var. IPA 206, in a Fluvic Neosol, artificially compacted, with different fertilizer materials added (cowdung, NPK, organomineral I, and organomineral II). Also it evaluates the development of cowpea when the seeds were submitted to gamma irradiation (⁶⁰Co) and cultivated in compacted and non-compacted soil, under greenhouse conditions, for 60 days. The isolated addition of spent coffee powder and marine algae to the soil increased the CO₂ evolution from soil, reflecting variations in dynamics of the heterotrophic soil microbiota. CO₂ evolution decreased with the increase in soil density, showing reductions in aeration. The values presented were found to be low in the

treatment without addition of these materials (control) and showed them to be significantly increased in the treatments that received such residues, all over the incubation period. Plant height, root length, shoot dry matter production and dry matter of nodules diminished with the increase in soil density. The incorporation of the organomineral mixtures I and II to the artificially compacted soil, showed an increase in plant height, and root length, suggesting the beneficial action of these materials in the development of cowpea, possibly due to an improvement in soil structure and, consequently, in the absorption of nutrients by plants. However no increase in the water holding capacity of the soil was observed, in function of the added materials. There was a significant reduction in plant height and in the shoot dry matter production in reply to the increase in soil density (1.30 Mg.m^3 – compacted soil and 1.70 Mg.m^3 – non-compacted soil) and to the increase in dose of γ -radiation (0, 100, 200 and 300Gy). The diameter of the stem was significantly reduced with the increase in soil density, however the increase in stem diameter did not occur in relation to the irradiation. The increase in soil density caused an increase in the resistance to root penetration in soil, the values found being respectively 0.32 and 1.2MPa to the non-compacted and compacted soil. The resistance of 1.2 MPa is considered restrictive but not impedimental to root growth. Also, it was verified that the water holding capacity of the soil was reduced in response to the increase in soil density.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a preocupação com o uso e com a qualidade dos solos intensificou-se, devido ao rápido avanço dos processos de degradação das terras sob domínio agrícola. Parte dessa preocupação decorre de mudanças estruturais que ocorrem no solo, induzidas pela compactação artificial, as quais estão relacionadas com importantes atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Essas mudanças dizem respeito à estrutura, à capacidade do solo em conduzir água e ar, à resistência a penetração das raízes e à respiração microbiana, promovendo, em muitas regiões, efeitos indesejáveis que se refletem no desenvolvimento, na produtividade das culturas e, por extensão, no meio ambiente. Neste contexto, o fenômeno da compactação, por originar e/ou acelerar esses processos, está sendo considerado, hoje, como um dos maiores entraves à agricultura moderna no mundo. Segundo FLOWERS; LAL (1998), a degradação do solo induzida pela compactação atinge cerca de 68 milhões de hectares das terras do globo terrestre.

A compactação, reconhecida como uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo, é resultante da ação dos implementos de seu preparo, da pressão exercida pelas rodas dos tratores e de máquinas agrícolas e, também do pisoteio de animais (MEREDITH; PATRICK JR., 1961; SHIERLAW; ASTON, 1984). Os impactos causados pela conversão de áreas de vegetação natural em sistemas manejados e a exploração intensa do solo associada a práticas inadequadas de cultivo e manejo são apontados como causas das mudanças na estrutura e no funcionamento dessas áreas, com vistas à produtividade agrícola.

Em muitos solos a limitação hora imposta pela compactação, apresenta-se como mais um desafio, diante da demanda igualmente prioritária, mas antagônica, entre a produção agrícola, às voltas com a necessidade urgente em aumentar a oferta de alimentos devido às altas taxas de crescimento populacional, e a preservação ambiental.

No Brasil, vários trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos sobre este tema. Entretanto, em sua grande maioria, o enfoque tem sido predominantemente no aspecto físico da questão. Isto é compreensível, pois, apesar da conceituação comum do ponto de vista físico, como se apresenta em estudos da mecânica do solo, o efeito da compactação se torna muito mais complexo quando se considera a fertilidade do solo, pelo fato de envolver aspectos físicos e biológicos, somados aos fatores climáticos e sobretudo de manejo, formando assim uma teia complexa de difícil aplicação metodológica e, conseqüentemente, de difícil interpretação de resultados.

Neste aspecto, há necessidade de uma melhor caracterização dos efeitos da compactação em função das mudanças estruturais que porventura possam surgir no solo, e por extensão, as ocorrendo na atmosfera ligadas e em decorrência das atividades de manejo. A preocupação reside no fato de que os impactos causados pelo efeito da compactação podem estar relacionados também com a capacidade do solo em perder Carbono (C) tendo esse efeito forte influência sobre a emissão de CO₂ para a atmosfera.

Considerando esses aspectos, os objetivos da presente pesquisa foram estimar, sob o ponto de vista das interações entre as propriedades do solo alteradas no processo de compactação do solo (e por conseguinte na aeração do solo), as perdas de C do solo. Para tal, foram investigados os efeitos isolados e combinados de densidades globais, conteúdos de água e modos de aplicação de materiais orgânicos, na liberação do CO₂ do solo. Também, avaliou-se o desenvolvimento do feijão caupi [*Vigna unguiculada*, (L.) Walp], variedade IPA 206, em um Neossolo flúvico artificialmente compactado, adicionado de diferentes materiais (esterco, NPK, organomineral-I e organomineral-II). Ainda, avaliou-se o desenvolvimento do feijão caupi, quando suas sementes foram submetidas à radiação- γ (⁶⁰Co) e cultivadas em um Neossolo flúvico compactado e não compactado, em casa de vegetação, por 60 dias.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A AGRICULTURA MODERNA E A COMPACTAÇÃO DO SOLO

A concentração de esforços para modernizar a agricultura, com a utilização de operações mecanizadas, tornou-se realidade em meados do século XX na Europa. O incremento da demanda de alimentos pelos povos e o grande desenvolvimento industrial contribuíram para essa modernização, ocasionando mudança radical no sistema agrário, passando do uso da tração animal e humana para o uso de maquinaria, no preparo do solo, plantio, adubação e colheita (McKIBBEN, 1971; VAZ, CRESTANA; REICHARDT, 1992).

De acordo com GAMEDA et al. (1985), “entre 1948 e 1968 houve, um aumento médio de 2,7 para 4,5t na massa de tratores e, na década de 80, a média se estabeleceu em torno de 6,8t, com alguns modelos alcançando 22,4t”. Esse elevado nível de mecanização agrícola e a tendência para aplicações cada vez maiores de cargas e/ou pressões no solo, juntamente com o preparo do solo realizado em condições de umidades inadequadas têm ocasionado a sua compactação, isto é, alterações no arranjo das partículas do solo, tornando-o mais denso.

Em função da importância do solo como fator essencial para a produção de alimento e matéria-prima, a preocupação com os efeitos causados com sua degradação se justifica, principalmente, devido à perspectiva, que se apresenta em escala mundial, da necessidade de que seja duplicada a oferta de alimentos, a cada 50 anos, em função das altas taxas de crescimento populacional. Um ponto importante é que não existe terra suficiente para isso. Pelo contrário, terras antes produtivas passam agora por processos de degradação que se refletem na fertilidade do solo e conseqüentemente na produtividade das culturas (REICHARDT, 1975).

Segundo LAL (1995), somente 22% (3,26 bilhões de ha) da área total do globo são adequados para o cultivo e só 3% (450 milhões de ha) possuem uma capacidade de produção elevada, razão pela qual a manutenção de sua qualidade tem adquirido grande relevância nas últimas décadas. Nesse contexto, a compactação está sendo considerada hoje como um dos

maiores entraves à agricultura moderna, justamente por se apresentar como mais um fator que reduz a fertilidade do solo.

De acordo com SOANE; VAN OUWERKERK (1995), hoje os problemas decorrentes da compactação dos solos podem ser encontrados em várias partes do mundo, em função da expansão das áreas cultivadas. Essas áreas assumem importância por se apresentarem adequadas à utilização de atividades mecanizadas. Em estudos realizados em Córdoba, na Espanha, foram encontradas limitações no comprimento das raízes de algodão, em função da presença de camadas compactadas (COELHO et al., 2000). No Paquistão, mas precisamente em Punjab, verificou-se redução na produção do sorgo ocasionada pelo aumento da resistência do solo ao crescimento das raízes (ISHAQ et al., 2001). Na Noruega, a compactação do solo provocada pelo tráfego de tratores ocasionou diminuição da difusividade gasosa e essa diminuição pode ter contribuído para o aumento da emissão de N_2O para a atmosfera. Na região Pampeana da Argentina, a ocorrência da compactação trouxe conseqüente degradação do solo pelo uso de máquinas agrícolas (QUIROGA et al., 1999). A compactação causada pelo tráfego intenso é reconhecida como um dos grandes problemas atualmente presentes em solos Australianos, afetando o desenvolvimento das culturas (RADFORD et al., 2001).

Em regiões agrícolas de clima tropical, como é o caso do Brasil, observou-se, principalmente nas últimas décadas, com a expansão das fronteiras agrícolas, um aumento na utilização de máquinas agrícolas e implementos, desde o preparo do solo até a colheita, o que tem contribuído para o aumento das áreas que apresentam o problema de compactação (ALVARENGA et al., 1996).

De acordo com as estimativas da ANFAVEA (Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Agrícolas), houve um aumento do índice de mecanização de tratores de rodas, no Brasil, que passou de $410ha.trator^{-1}$, em 1960, para $116ha.trator^{-1}$, em 1980. Estes números refletem a realidade de algumas regiões, onde a exploração de grandes áreas requer uma alta capacidade efetiva de trabalho dos equipamentos agrícolas.

Devido à importância do tema, vários trabalhos têm sido desenvolvidos com ênfase ao processo da compactação do solo (LARSON et al. 1980; GUPTA; ALLMARAS 1987; BAKKEN

et al., 1987; HÅKANSSON et al. 1988; ALVARENGA et al. 1996; MAZIERO et al. 1997; DIAS JUNIOR; PIERCE 1996 e KONDO; DIAS JUNIOR 1999ab) têm se dedicado aos estudos dos processos de compactação do solo. Entretanto, em sua grande maioria, a abordagem tem sido predominantemente centrada no aspecto físico da questão.

Alguns trabalhos, entre eles os desenvolvidos por NEILSON; PEPPER (1990); HÅKANSSON; OUWERKERK (1995); FERREIRA; COLAÇO (2000); SITAULA et al. (2000) e MIELNICZUCK et al. (2001), começam a dar importância às interações entre os aspectos físicos e biológicos do solo, ressaltando, sobretudo a interdependência entre fertilidade e conservação solo.

2.2 O PROCESSO DA COMPRESSÃO DO SOLO

Para compreender melhor o processo de compressão, são necessárias algumas considerações gerais sobre o sistema solo. O termo solo refere-se à camada particulada da superfície terrestre sujeita às intempéries. É formado, inicialmente, pela desintegração e decomposição de rochas, através de processos químicos e físicos, e é influenciado pela atividade e acumulação de resíduos de inúmeras espécies de animais e plantas, de dimensões microscópicas a macroscópicas.

O solo pode, então, ser genericamente definido como mineral e matéria orgânica não solidificados na superfície da terra, capaz de sustentar o desenvolvimento de plantas. Esta definição, segundo NAIME (2001), está de acordo com uma definição simples utilizada na agricultura que descreve o solo como “*a coisa onde a planta cresce*”. Tais definições são suficientes para muitos propósitos práticos, mas o cientista da Ciência de Solo precisa de uma definição mais detalhada.

As atuais definições de solo tiveram origem nos trabalhos de DOKUCHAEV (1846-1903). DOKUCHAEV foi quem primeiro definiu o solo como um corpo natural independente, em 1880. Em descrição mais recente, Sposito; Reginato (1992) definiram: “*O solo é um meio*

poroso estruturado, biologicamente ativo, que se desenvolveu na superfície do nosso planeta. Este material, suporte da vida, foi criado e continua a evoluir através de processos atmosféricos de desagregação causados por influências biológicas, climáticas, geológicas e topográficas. Apesar da variabilidade espacial e temporal, os solos, possuem uma característica que é única: é uma seqüência vertical e sistemática de camadas pela ação combinada dos organismos vivos e da percolação das águas”.

Como se pode observar, o conceito atual do solo o coloca como um sistema dinâmico e complexo, sendo necessário conhecer plenamente os aspectos envolvidos na sua utilização. Na engenharia civil, a aplicabilidade dos conceitos da dinâmica do solo referente às deformações sofridas pelo solo (compactação) em função de uma força externa, já estão bastante consolidados. Na agricultura, entretanto, os conceitos precisam ser mais bem entendidos do ponto de vista da biologia e da fertilidade do solo.

As mudanças que ocorrem no solo devido ao fenômeno da compactação são o resultado de variações no seu volume quando esse é submetido a uma força de compressão e isso ocorre, principalmente, devido à reorganização das partículas do solo, que, segundo ¹LAMBE, citado por BACHHI (1976), lhe confere um comportamento plástico. Essa plasticidade realmente se deve à reorganização das partículas do solo, pois as demais alterações que ocorrem no solo durante a compressão são reversíveis. A compressão das micelas coloidais, a compressão e a movimentação dos gases e líquidos na matriz do solo participam apenas das mudanças temporárias do estado de compactação. Após, cessada a força, ocorre expansão das micelas e dos gases e o líquido retorna aos espaços entre as partículas.

Quando o solo se encontra totalmente seco, sua compressão faz com que as partículas se reorientem e assumam um novo arranjo por redução da fração de volume de ar da amostra. No caso oposto, com um solo saturado, qualquer decréscimo da porosidade tem necessariamente que ser levado às custas da diminuição da fração de volume da água do solo. A diferença entre esses processos está, naturalmente, na viscosidade da água que é 50-100 vezes

¹ LAMBE, W. T. The engineering behavior of compacted clay. J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE, 1-34, 1958

maior que a do ar. A expulsão do ar é rápida, quase que instantânea, enquanto que a expulsão da água é geralmente um processo mais lento (HILLEL, 1980). A aplicação de uma pressão em um solo no estado intermediário entre seco e saturado resultará, primeiramente em expulsão do ar e somente após todo o ar ser expulso do solo, novamente sendo aplicada uma compressão resultará na remoção da água. Por convenção, a distinção entre esses dois processos é feita através de diferentes nomes. Tradicionalmente, o termo compactação é aplicado para a compressão em amostra de solo não saturada resultando em redução da sua fração de volume de ar. O termo consolidação é usado quando o processo de compressão se dá em condições de saturação (HILLEL, 1980).

O início da técnica de compactação é creditado ao engenheiro norte-americano PROCTOR que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando que, aplicando-se uma certa energia de compactação, a massa específica resultante é função da umidade que o solo contiver. A energia de compactação utilizada é equivalente a um rolo tipo “pé de carneiro” leve (5 a 7t), passando cerca de 12 vezes sobre uma camada de solo com 30cm de espessura (VARGAS, 1977). Já na agricultura, a energia de compactação representa aproximadamente 15 passadas de um trator com 0,727t na roda (pressão de 140kPa) em solo franco-arenoso (RAGHAVAN al., 1976).

Em outras palavras, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a umidade. A dependência funcional entre esses dois parâmetros do solo, densidade e umidade, é ilustrada na Figura 1. Essa dependência indica que, estando o solo inicialmente seco, a densidade aumenta com o aumento da umidade do solo, até alcançar um pico chamado densidade máxima, que corresponde a um valor de umidade chamado “ótimo de umidade”, além do qual a densidade decresce (HILLEL, 1980; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999ab).

Esse comportamento pode ser explicado qualitativamente. Tipicamente, um solo seco resiste à compactação por causa da sua matriz rígida e do alto grau de vínculo entre as partículas, entrosamento, e ou resistência à fricção e à deformação. Com o aumento da umidade do solo, os filmes de água atenuam o contato entre as partículas, causando inchaço e redução da fricção interna, por funcionar, como “lubrificante” das partículas; conseqüentemente, o solo

diminui a resistência e sofre compactação. Com a umidade do solo perto da saturação, entretanto, o volume de ar expulso é reduzido e o solo não pode mais ser compactado pela mesma carga de pressão aplicada anteriormente. Finalmente, na saturação, nenhuma pressão pode causar qualquer aumento na densidade do solo, sem que a água seja expelida. Para situações de altos valores de umidade, a água funciona como impedimento, tapando os poros da matriz do solo (HILLEL, 1980).

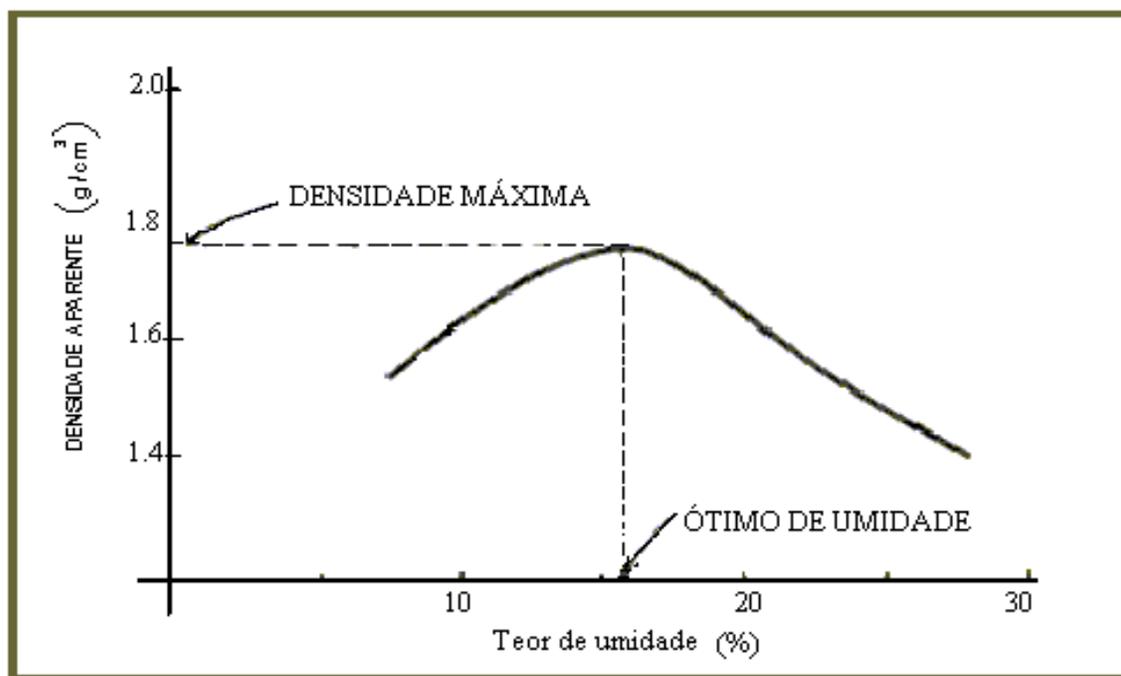


Figura 1 - Curva típica da densidade x umidade para um solo de textura média, indicando a máxima densidade obtida a partir de ensaios realizados em laboratório, chamado de ensaio Proctor normal. Adaptado de HILLEL (1980).

Dos trabalhos de Proctor surgiu o Ensaio de Compactação, universalmente padronizado, com pequenas variações, que é mais conhecido como Ensaio de Proctor normal. Na engenharia civil, os resultados desse ensaio já estão bastantes definidos e aplicados, entretanto, para fins agrícolas, ainda carecem de mais estudos e aplicabilidade.

Em recente estudo sobre o problema, RAGHAVAN; ALVO; MCKYES (1990) observaram, por meio do ensaio, que a umidade ótima de compactação dá idéia de quando o

trator começa a derrapar, o que contribuiu significativamente para o aumento da compactação do solo. Para compensar a alta percentagem de patinagem do trator, e para que este possa desenvolver uma velocidade operacional adequada, tratores de grande potência e peso são cada vez mais utilizados.

2.3 FATORES RESPONSÁVEIS PELA COMPACTAÇÃO

O preparo mecânico do solo para fins agrícolas tem trazido inúmeros benefícios ao agricultor. Em contra partida, o elevado nível de mecanização das lavouras tem afetado a camada superficial do solo, em decorrência tanto da pressão direta exercida pelas rodas dos pneus, como também pelo peso das máquinas, e pela ação dos implementos agrícolas e pisoteio de animais (DEXTER, 1988). Ocorre que na camada superficial do solo, há uma modificação profunda nas características físicas do solo, de tal modo que o movimento de água, ar e o desenvolvimento das raízes são afetados, havendo, por conseguinte, menor crescimento das plantas (MERIDITH; PATRICK JR, 1961).

De acordo com MANTOVANI (1987), o acréscimo indiscriminado do peso e potência dos tratores utilizados e reconheceu a falta de critério no dimensionamento e na seleção dos implementos e tratores por parte dos agricultores. Segundo o autor, tais situações têm contribuído para um aumento de áreas com problemas de compactação.

Vários trabalhos confirmam a relação entre o uso de máquinas agrícolas e de equipamentos de preparo e o cultivo e as alterações nas propriedades físicas do solo (CINTRA; MIELNICZUK, 1983; HÅKANSSON et al., 1988; BALASTREIRE, 1990; MAZIERO et al., 1997; ALAKUKKU, 1998 e JORAJURIA; GRAGHI, 2000). Embora outros fatores também contribuam para tornar os solos compactados, como o ciclo de secagem e molhamento, serão revisados aqui somente os processos artificiais, cujas causas referem-se apenas à aplicação de forças mecânicas durante o preparo do solo e para o cultivo.

2. 3. 1 USO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Indiscutivelmente, o tráfego de veículos sobre a superfície do solo constitui um dos fatores, se não o mais importante, que determina a compactação do solo. Segundo GILL; REAVES (1956), a compactação resulta das forças horizontais causadas pelo deslocamento lateral do solo, bem como das forças verticais produzidas pela carga. A forma e a extensão dessas deformações dependem sobretudo das propriedades físicas do solo, uma vez que a profundidade de penetração dos pneus, bem como a dos seus efeitos no solo, aumentam com a umidade e com o estado de compactação inicial do solo (JAMISSON et al., 1951).

GENT et al. (1984) estudaram o impacto das operações de preparo de um solo em uma área florestal da Carolina do Norte (E.U.A), totalmente mecanizada e plantada com *Pinus taeda* L. Os autores detectaram alterações marcantes nas propriedades físicas do solo como resultado principalmente do tráfego excessivo de máquinas pesadas. Na ocasião do preparo, o solo estava com conteúdo de água acima da capacidade de campo, o que pode ter contribuído.

De acordo com SOANE (1975) e BACHHI (1976), a compactação ocasionada pelas passagens dos veículos nas áreas de cultivo é dependente do peso do veículo, que determina a quantidade de pressão exercida, da distribuição da força dentro da área de contato, do conteúdo de água e da densidade do solo.

As pressões geradas na subsuperfície do solo são chamadas de contato, que é a carga total aplicada à superfície do solo distribuída na área de contato com o solo. No caso dos tratores, estas áreas de contato com o solo são as rodas e, no caso dos implementos, como o arado e as grades, o disco. Por este motivo é que as grades pesadas são agentes causadores de compactação, pois o peso total do equipamento é distribuído numa área pequena do disco. O volume de poros destruídos no solo por um equipamento agrícola, devido à compactação é igual ao volume do sulco produzido pelo equipamento (MANTOVANI, 1987).

Outro problema é a patinagem. Segundo RAGHAVAN; ALVO; MCKYES (1990), no mínimo 50% da compactação da camada superficial do solo pode ser atribuída ao

deslizamento das rodas dos veículos agrícolas. Os autores consideram que a patinação tem efeito significativo sobre a compactação na medida em que dificulta os trabalhos de preparo do solo pela baixa eficiência de tração dos tratores, e conseqüentemente, tratores de grande potência e peso são cada vez mais solicitados.

Segundo MANTOVANI (1987), grande parte dessa potência está sendo desperdiçada na roda pela patinação e o aumento de peso tem contribuído para a depreciação do solo. Esta situação tem sido uma preocupação por parte dos agricultores e, coincidentemente, começa a chamar atenção nas áreas onde a prioridade dos trabalhos com máquinas e implementos se restringem somente ao rendimento operacional, e a qualidade do trabalho com o solo, ou seja, o manejo adequado, tem sido considerado secundário.

2.3.2 IMPLEMENTOS DE PREPARO DE SOLO

O preparo do solo é um processo mecânico que pode resultar no corte, revolvimento e inversão da camada do solo pela ação dos órgãos ativos dos implementos, com o objetivo de proporcionar boas condições para o desenvolvimento das culturas. Para a cultura, essa prática deverá fornecer as condições necessárias, até uma certa profundidade, que favoreça o desenvolvimento do sistema radicular para obtenção de uma estrutura que seja benéfica ao desenvolvimento das plantas, além de prevenir perdas de água por evaporação levando, conseqüentemente, a uma produção máxima de grãos dentro das condições de clima e nutrição da planta (THUNG; OLIVEIRA, 1998).

Em determinados tipos de solos, entretanto, principalmente os argilosos, as ferramentas podem dar origem às chamadas “soleiras”, como mostram os resultados obtidos por TROUSE; BAVER (1965) testando vários implementos agrícolas. Essas superfícies ou camadas compactadas surgem pela ação de compressão das ferramentas, acompanhada pelo atrito das mesmas com as partículas de argila, que forma uma fina camada na superfície superior do solo. Essas camadas reduzem a permeabilidade do solo à água e restringem o desenvolvimento radicular às profundidades de ação das ferramentas, podendo inclusive, após vários anos de

cultivo, anular os efeitos benéficos iniciais das operações (BELTRAME et al., 1981).

Tradicionalmente, tanto a aração quanto a gradagem são realizadas a uma mesma profundidade (20 e 40 cm). O objetivo da aração é melhorar a porosidade, facilitando a germinação das sementes e o desenvolvimento do sistema radicular. A grade niveladora exerce papel importante na correção de solos mal preparados, que apresentam ondulações irregulares e torrões volumosos, no caso de solo muito seco ou com excesso de umidade (THUNG; OLIVEIRA, 1998).

Arações consecutivas, em solos secos, podem pulverizar a estrutura do solo, criando condições para a compactação superficial das áreas agrícolas quando a água deixa de ser absorvida, ocorrendo lavagem da terra ou carreamento durante o período chuvoso. Com o agravamento do problema da compactação é necessário quebrar aquela camada compacta que se forma, utilizando-se de ferramenta de ação mais profunda, como os subsoladores (THUNG; OLIVEIRA, 1998).

O subsolador destaca-se entre os vários implementos do preparo mecanizado do solo, por ser bastante utilizado no cultivo mínimo, principalmente do setor florestal, acumulando a função de sulcar, com as devidas adaptações mecânicas. Originalmente, os subsoladores foram concebidos para promover a desagregação das camadas sob a superfície, a fim de facilitar a penetração das raízes e retenção de umidade (BALASTREIRE, 1990).

De acordo com THUNG; OLIVEIRA (1998), o mesmo efeito de deformação de soleira ocorre com os subsoladores, de modo que a sua utilização apenas significa a transferência do problema para uma superfície mais profunda. Dessa forma, tem-se usado variar periodicamente os tipos de implementos, para evitar a formação de pé-de-grade devido ao uso constante de um mesmo implemento

2.4 A COMPACTAÇÃO E O SISTEMA SOLO-PLANTA

O manejo eficiente do solo propõe a correta utilização de práticas agrícolas orientadas no sentido de promover as melhores condições de cultivo e plantio, de forma a minimizar a desestruturação do solo, a compactação e a perda de nutrientes, considerados hoje os principais causadores da sua degradação.

PHILLIPS; KIRKHAM (1962) admitiram que é difícil se chegar a uma conclusão sobre os fatores que afetam o crescimento das plantas, uma vez que a compactação influencia várias propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

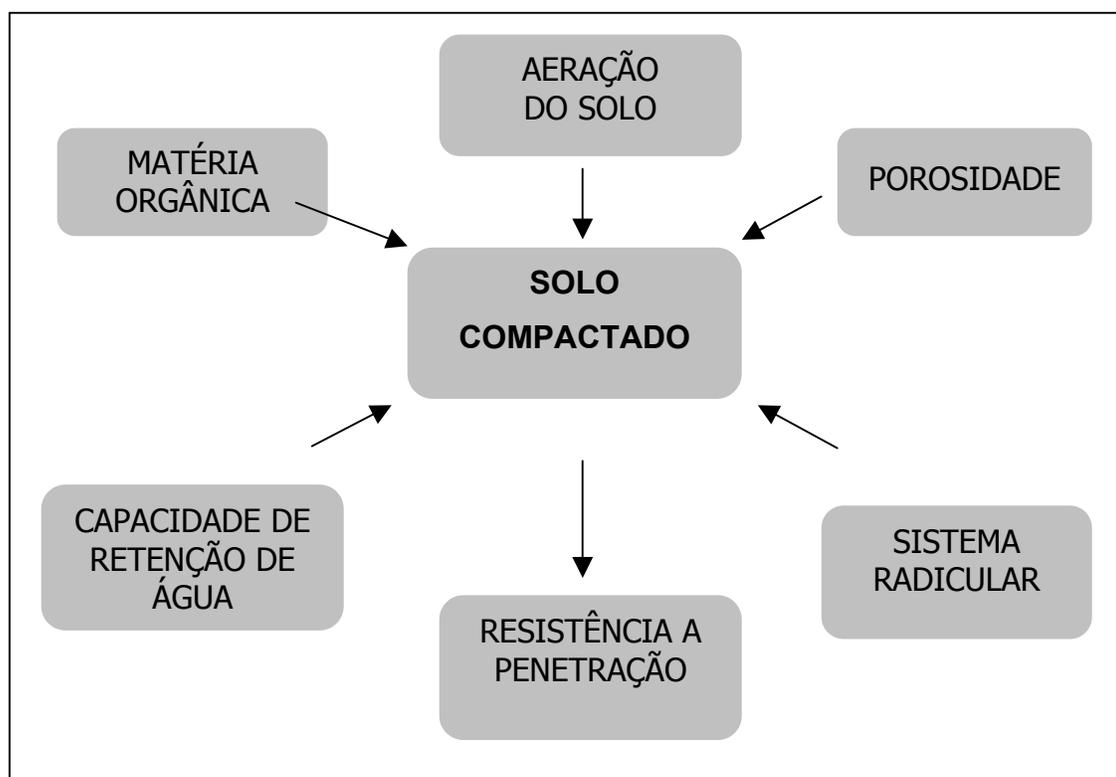


FIGURA 2 – Compactação do solo versus propriedades (Adaptado de SEIXAS, 2000).

UNGER (1994) e SEIXAS (2000) avaliaram as propriedades do solo modificadas pelo processo da compactação e verificaram que essas propriedades são profundamente inter-relacionadas, a modificação de uma afeta, freqüentemente, as demais. A

figura 2 é uma representação do comportamento hora cooperativo e hora conflitante entre algumas propriedades do solo e a compactação.

Há um conflito entre o preparo mecanizado do solo e os aspectos positivos dos restos culturais, tão necessários para impedir a compactação. A maioria dos autores sugere que o melhor uso para os resíduos culturais parece ser deixá-los sobre o solo ou incorporá-los. Em sistemas agrícolas, a presença pós-colheita de tocos, ramos e raízes na superfície do solo dificulta a penetração dos órgãos ativos dos implementos, e servem como atenuantes aos efeitos prejudiciais do tráfego de veículos.

Sabe-se que a incorporação dos restos culturais ao solo melhora sua porosidade total e a retenção de água no solo (MOTTA NETO, 1996). De acordo com STONE; EKWUE (1993), o aumento na quantidade de matéria orgânica no solo reduz os efeitos da compactação por reter parte do teor de água do solo. Entretanto, a incorporação pode ser desfavorável, pois, a superfície do solo sem os restos culturais fica vulnerável à erosão devido aos impactos das gotas de chuva.

O impacto das gotas de chuva sobre o solo desnudo e já em parte desestruturado pela excessiva pulverização da camada superficial, resulta em selamento superficial do solo, impedindo a penetração de água e a saída de ar dos poros, provocando um déficit na aeração do solo. Nessas condições, a eficiência na absorção de nutrientes na maioria das culturas diminui (SILVA; KATO, 1997; MANTOVANI, 1998).

Dependendo do objetivo de utilização do solo, a compactação pode ser uma solução, como por exemplo, na operação de semeadura em solos arenosos que retém menos umidades que os solos argilosos. Nos solos arenosos, a compactação diminui as perdas de umidade presente porque reduz os macroporos (BALASTREIRE, 1990).

SHIERLAW; ALSTON (1984) verificaram que a compactação do solo diminuiu o número de poros grandes, similares em tamanho e diâmetro às raízes das plantas e, desse modo, as raízes não puderam penetrar em poros de diâmetro menores que os seus. No caso do tráfego de veículos sobre a superfície cultivada, há um benefício pelo aumento da

compactação por melhorar a capacidade de tração dos veículos, enquanto o desenvolvimento das raízes das plantas ocorre com dificuldade, devido ao aumento da resistência à penetração do solo (SOUZA et al., 1987).

Com relação ao sistema radicular, alguns trabalhos têm mostrado que a respiração e o crescimento das raízes são diretamente afetados pela elevada concentração de CO_2 e que os solos compactados podem intensificar esse efeito (TACKETT; PEARSON, 1964; CONLIN; VAN DEN DRIESSCHE, 1996).

2.4.1 A COMPACTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS HÍDRODINÂMICAS E MECÂNICAS DO SOLO

2.4.1.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

A curva de retenção da água no solo representa a relação entre o potencial matricial (ψ_m) e a umidade do solo (θ). Em laboratório, a medida do potencial pode ser feita com o funil de placa porosa, e por meio da câmara de pressão de RICHARDS. Esses equipamentos permitem a aplicação de uma pressão em amostra previamente saturada. Quanto maior for o valor da pressão aplicada maior será a quantidade de água retirada da amostra. Quando cessa a drenagem da água fora da câmara de pressão, a pressão é numericamente igual à tensão com que a água está retida nos poros.

Como a retenção de água no solo é função do tamanho e do volume dos poros que a contém, a umidade está intimamente relacionada com o potencial matricial. Uma questão importante para o entendimento da relação entre umidade e o potencial matricial é relaciona-la com a textura do solo. Em um solo muito arenoso, predominam os poros grandes, o que faz com que o decréscimo da umidade devido ao incremento da pressão seja abrupto. Isso explica o pequeno armazenamento desses solos mesmo a baixas pressões. Já para

um solo argiloso, as curvas de retenção mostram uma diminuição gradual da umidade devido à presença de um grande número de poros com pequenas dimensões.

Relações empíricas têm sido propostas para representar a curva característica da água no solo com base no ajuste de resultados experimentais (HILLEL, 1980 e VAN GENUCHTEN, 1980). Devido à complexidade das interações de água no solo, é difícil identificar, de modo unívoco, os parâmetros a serem considerados para o ajuste. A importância da textura e da matéria orgânica no processo da retenção de água no solo conduziu vários autores a utilizá-las como parâmetros para estimar a curva característica.

2.4.1.2 DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo é um parâmetro importante na sua caracterização, fornecendo informação indireta sobre a estrutura, porosidade, armazenamento e condução de água (REICHARDT, 1978).

Segundo ARCHER; SMITH (1972), variações na densidade do solo afetam a disponibilidade de água, a capacidade de aeração e a drenagem. As massas específicas mais conhecidas como densidades são determinadas normalmente na análise de perfis de solos, e segundo REICHARDT (1985), têm a seguinte definição:

Densidade de partículas “ d_p ” (também chamada densidade real do solo):

$$d_p = m_s / v_s \quad (1)$$

Onde:

d_p = densidade de partícula ($Mg.m^{-3}$)

m_s = massa das partículas sólidas (Mg)

v_s = volume ocupado pelas partículas sólidas (m^3)

Densidade global “ d_g ” (também chamada densidade aparente):

$$d_g = m_s / v_T \quad (2)$$

Onde:

d_g = densidade global ($Mg.m^{-3}$)

m_s = massa das partículas sólidas (Mg)

v_T = volume total da amostra de solo (m^3)

Ao se compactar a amostra, a massa das partículas sólidas permanece constante, e o volume total diminui; por conseguinte, a densidade global aumenta. A densidade global é, portanto, um índice do grau de compactação de um solo (REICHARDT, 1978).

2.4.1.3 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

Resistência mecânica do solo é o termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. Essa resistência geralmente aumenta com a compactação e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Valores de resistência mecânica do solo entre 2 MPa e 3 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular para várias culturas anuais, como milho, trigo e algodão (GUPTA; ALLMARES, 1987).

LETEY (1985), MATERECHERA et al. (1992) e KLEIN et al. (1998) utilizaram a resistência do solo à penetração, para avaliar os efeitos decorrentes dos

sistemas de manejo do solo sobre o ambiente. Segundo os autores, a resistência do solo à penetração das raízes é um dos atributos físicos que influenciam diretamente o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

Como a compactação cria um ambiente desfavorável para o crescimento das plantas, vários estudos ressaltam a importância de se avaliar as propriedades alteradas no processo, uma vez que as raízes das plantas que crescem sob condições de estresse parecem ser capazes de identificar essas condições e de enviar sinais para a parte aérea, que controlam a expansão foliar (DAVIES; ZHANG, 1991). Em solos compactados e sob secamento, esses sinais de inibição ocorrem em associação com o aumento da resistência do solo à penetração das raízes (PASSIOURA, 1991).

BRADFORD (1986) definiu a resistência à penetração utilizada para medir a compactação do solo como “índice de cone” que seria a relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo (penetrômetro) e sua área basal. Entretanto, a dependência dos resultados em relação ao conteúdo de água e à densidade do solo dificulta a interpretação. A resistência à penetração é altamente afetada pela textura do solo, sendo a utilidade de suas medidas somente comparadas se feitas no mesmo solo e no mesmo conteúdo de água.

Quanto à determinação da resistência à penetração, BENGHOUGH; MULLINS (1990) e WHITELEY; DEXTER (1982) assinalaram que os penetrômetros fornecem boas estimativas da resistência mecânica do solo. Apesar das diferenças óbvias entre uma raiz e um cone metálico, o método é considerado apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo.

2.4.1.4 POROSIDADE DO SOLO

Na agricultura, a porosidade regula as relações entre as fases sólida, líquida e gasosa dos solos (KIEHL, 1979). TOGNON (1991) afirma que a porosidade do solo é

uma propriedade que interfere na aeração, condução e retenção de água, capacidade de penetração e ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis.

O volume e a natureza da porosidade de um solo estão correlacionados com outras propriedades, como textura, estrutura, densidade aparente, umidade e matéria orgânica, todas do próprio solo (BRADY, 1989). Desde que o movimento de gases através do solo ocorre quase que exclusivamente no espaço poroso do solo, a medida da porosidade é vital para compreender tal movimento. A porosidade de aeração do solo (def.) é freqüentemente usada como indicador do estado de aeração do solo e da habilidade para conduzir e armazenar gases.

A porosidade de aeração do solo depende da textura do solo. Em solos arenosos é da ordem de 25% ou mais, em solos siltosos é geralmente entre 15 e 20%, e em solos argilosos, com tendência para reter mais água, talvez diminua abaixo de 10% do volume total do solo. Segundo GROHMANN (1960), um solo ideal seria aquele que tivesse seu espaço poroso dividido de maneira semelhante entre macro e microporos, garantindo boas condições de aeração, permeabilidade e retenção de água.

VOMOCIL; FLOCKER (1961), resumiram os resultados de diversos pesquisadores, concluindo haver apreciável redução no crescimento das plantas se o volume de poros do solo for menor que 10-15% do volume total, dependendo da cultura e de outros fatores. Se houver déficit nas trocas de oxigênio e gás carbônico, as raízes das plantas serão atingidas imediatamente devido às interferências nos processos metabólicos. Quanto maior as trocas de gases, mais intensos os processos biológicos. Há casos em que as plantas se adaptam ao déficit de ar, como o arroz, devido aos grandes espaços porosos internos que possuem (KLAR, 1984).

2. 5 COMPACTAÇÃO E RELAÇÕES BIODINÂMICAS ENTRE O SOLO E A PLANTA

2. 5. 1 AERAÇÃO DO SOLO

A aeração refere-se ao transporte de gases através do espaço poroso do solo, simbolizando as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Essas trocas representam um dos processos mais importantes para o desenvolvimento das plantas e dos microrganismos do solo, condicionando diretamente a vida nesse ambiente, pela falta de oxigênio e ou excesso de gás carbônico e, indiretamente, pela diminuição da atividade microbiana e a conseqüente disponibilidade de nutrientes (GRABLE, 1966; CAMARGO, 1975).

O teor e a composição do ar do solo são determinados, em grande parte, pelas relações solo-água, assumindo uma natureza dinâmica. Devido à natureza dinâmica do ar do solo, a tendência para variações rápidas no seu teor e na sua composição implica em repercussões profundas, nas plantas e nos microrganismos do solo (STOLZKY, 1965; GRABLE, 1966; REICHARDT, 1975).

Segundo VAN BAVEL (1965), a respiração das raízes é o mais sensível aspecto da planta com relação à aeração do solo e que a redução na atividade respiratória pode ser considerada como o principal ponto dentro dos efeitos limitantes do crescimento, devido à aeração deficiente. Neste contexto, publicações recentes têm mostrado que a respiração das raízes e o crescimento das plantas são diretamente afetados pela elevada concentração de CO₂ e que solos compactados podem intensificar esse efeito (WHALLEY et al., 1995; CONLIN; VAN DEN DRIESSCHE, 1996).

A respeito da influência da aeração sobre o crescimento das plantas, sabe-se que as raízes das plantas absorvem oxigênio (O₂) e liberam gás carbônico (CO₂) nos processos de respiração (HILLEL, 1980). ZOBEL (1992) comentou que os efeitos do CO₂ do solo sobre o crescimento das plantas variam de acordo com as condições ambientais do solo e fisiológicas das plantas. De modo que, se houver déficit nas trocas de oxigênio e gás carbônico,

as raízes das plantas serão atingidas imediatamente devido às interferências nos processos metabólicos, sugerindo que, quanto maior às trocas gasosas, mais intensos serão os processos biológicos.

Embora a compactação provoque grandes restrições às trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, que podem causar, em curtos períodos, danos irreparáveis ao sistema radicular de muitas plantas, muitos trabalhos de campo demonstram que, sob determinadas condições, a compactação não chega a modificar sensivelmente a composição do ar do solo (PHILLIPS; KIRKHAM, 1962). Essas condições se referem àquelas que promovem aumentos no gradiente de pressão, responsáveis pela movimentação dos gases.

2. 5. 2 CONTEÚDO DE ÁGUA

O conteúdo de água do solo influencia um dos componentes essenciais ao crescimento das plantas: o *ar do solo*. Quando o conteúdo de água é excessivamente elevado, deixando espaço insuficiente ou nenhum para os gases, poderá resultar em aeração deficiente (BRADY, 1989). Esta deficiência afeta grandemente os rendimentos das culturas ao reduzir a taxa de oxigênio, cujo nível crítico varia com as espécies (MILLAR, 1978).

O conteúdo de água do solo é um parâmetro que varia extremamente, principalmente com o tempo. Com a chuva ou irrigação ele aumenta e com a drenagem e evaporação, diminui. Os extremos de sua variação são a umidade do solo seco em estufa a 105°C, apesar de haver ainda água de cristalização e o solo saturado. O valor desses extremos varia de solo para solo.

LINN; DORAN (1984) citando DORAN; POWER², comentam que os principais fatores responsáveis pela condição menos aeróbia em solos não cultivados são a alta umidade e/ou densidade que resulta em alto grau de saturação, e baixa porosidade, em comparação com solos cultivados.

² DORAN, J. W.; POWER, J. F. The effects of tillage of nitrogen cycle in corn and wheat production. Univ. Ga Coll Agric. Spec. Pub. no 23 p. 441-455.

O excesso de umidade é encontrado com freqüência em solos com insuficiência de drenagem e com textura fina que possuem um mínimo de macroporos, através dos quais a água poderia mover-se com rapidez. Ocorre também em solos normalmente bem drenados se o ritmo de suprimento de água na superfície é demasiadamente rápido ou se o solo tiver sido compactado (KLAR, 1984).

2. 5. 2 A MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica é a grande responsável pelo estabelecimento de uma estrutura adequada do solo para uma melhor circulação de ar e água. Ela compreende resíduos vegetais (raízes e partes aérea) e animais (incluindo excrementos), em variados graus de decomposição, ocorrendo no solo em íntima relação com os constituintes minerais (MOTTA NETO, 1996).

Por ser pouco densa em relação aos minerais do solo e por favorecer a formação de grânulos, a matéria orgânica reduz a densidade aparente do solo (MELO et al., 1984). A diminuição da densidade e da compactação possibilita a infiltração, melhorando a drenagem dos solos, permitindo maior penetração do sistema radicular que coloca à disposição da planta maior volume de água disponível. Com a capacidade de infiltração de um solo aumentada, há, conseqüentemente, um menor escoamento superficial, protegendo-o da erosão.

GENTOS; LELLIS (1997) em estudos no campo e em laboratório observou que a densidade do solo é largamente dependente do conteúdo de matéria orgânica, com a qual apresenta uma forte correlação negativa. O autor também descreveu alguns efeitos positivos da matéria orgânica em termos de resistência à compactação, sugerindo haver relação linear entre o conteúdo de matéria orgânica e a porosidade após a compactação.

BORGES et al. (1997) estudando os efeitos da aplicação de matéria orgânica em propriedades físicas de um solo em condições de casa-de-vegetação, verificaram que

a adição reduziu linearmente a densidade do solo, aumentando a porosidade total e proporcionando melhor relação água/poro, na camada compactada.

Estudando os efeitos da aplicação de material orgânico (excrementos de aves) em solos antes da compactação, durante um ano, MONTAVALLI et al. (2003), observaram diminuição na resistência à penetração e redução nas diferenças entre os conteúdos de água de solos compactados e não compactados. Entretanto, os efeitos da aplicação do material nas propriedades físicas do solo não continuaram no ano seguinte, possivelmente devido à rápida decomposição do material adicionado.

2.5.3 SISTEMA RADICULAR

A presença de camadas compactadas é apontada como um fator limitante à produção agrícola, por restringir o crescimento radicular das plantas (CONLIN; DRIESSCHE, 2000). Essa restrição deriva das alterações sofridas em algumas propriedades físicas do solo que atingem a zona das raízes das plantas. Assim, o solo passa a oferecer resistência direta ao crescimento radicular e à penetração das raízes e indireta sobre a aeração e o conteúdo de água (KRAMER; BOYER, 1983).

BAVER et al. (1972) e BRADY (1979) relataram ocorrência de camadas compactadas no fundo da camada arável, em vários tipos de solo, devido ao cultivo. Nesse caso, a compactação do solo pode impor limitações ao crescimento das plantas.

Segundo GILL; BOLT (1955), o crescimento das raízes em solos compactados deve-se ao balanço entre a pressão externa, oferecida pelo solo, e a interna exercida pela raiz, sendo a taxa de crescimento das raízes condicionada, mais propriamente, pela menor pressão oferecida pelo solo do que pela maior pressão exercida pelas raízes. Para os autores, a rigidez dos poros limita o crescimento radicular havendo necessidade da raiz forçar sua penetração no solo e isso só é possível quando o nível de impedimento físico permite tal comportamento.

Segundo MATERECHERA (1992), normalmente a resistência mecânica do solo causa um aumento do diâmetro das raízes, resultando em aumento na pressão de crescimento, propiciando penetração na camada compactada. É que, ao crescer, a raiz exerce uma pressão contra as partículas do solo, afastando-as para permitir seu alongamento.

De acordo com CAMARGO (1975), o aspecto morfológico do sistema radicular varia com a intensidade de oxigenação. O sistema radicular de plantas arejadas é mais longo e mais ramificado do que o de plantas que se desenvolvem em meio com aeração deficiente. Em solos adensados ou compactados, as raízes se mostram curtas e grossas, com elevada massa e com parede celular grossa, sugerindo maior taxa de respiração e maior resistência estrutural, ou seja, menor maleabilidade para se desviarem daqueles pontos de maior resistência no solo (ALVARENGA et al., 1996). Para promover o melhoramento de solos compactados, é necessário que as raízes vençam essas altas resistências que dificultam seu crescimento.

O comportamento do sistema radicular em solos compactados parece variar também com a espécie vegetal. CINTRA; MIELNICZUK (1983) observaram o potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos compactados e concluíram ser a colza (*Brassica napus oleifera*) e o tremoço (*Lupinus albus*) espécies promissoras para a recuperação de solos com problema de compactação, por apresentarem maior capacidade de penetração da raiz.

ALVARENGA et al. (1999), avaliando a aptidão das raízes de leguminosas crotalaria júncea (*Canavalia ensiformes*), guandu (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformes*), feijão-bravo-do-ceará (*Canavalia brasiliensis*) e mata-pasto (*Senna occidentalis*) em penetrar camadas de solo com diferentes níveis de compactação encontraram reduções significativas da densidade do sistema radicular, com exceção do mata-pasto, dentro da camada compactada e acima dela. Esses resultados confirmam aqueles obtidos por SHIELAW; ALSTON (1984) e BORGES et al. (1988) que observaram acúmulo de raízes das plantas na superfície das amostras à medida que se elevou o nível de compactação do solo.

SAMPAIO et al. (1995), utilizaram o feijão caupi (*Vigna unguiculada*) e o milho (*Zea mays*) como plantas indicadoras dos efeitos da subsolagem mecânica (aração convencional e profundidade de subsolagem) e biológica (guandu - *Cajanus cajan* e mucuma - *Stilozobium aterrimum*) adotadas como técnicas agrícolas capazes de melhorar a estrutura de solos coesos. Os resultados das avaliações confirmaram que o milho mostrou-se sensível ao adensamento do solo, afetando a parte aérea e o rendimento dos grãos e espigas, enquanto que o feijão se mostrou indiferente ao adensamento do solo, tendo efeito apenas sobre o crescimento da parte aérea e das raízes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

3.1.1 SOLO

O solo utilizado foi coletado da localidade do Curado, situada na Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco, onde está localizado o Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco, cuja área experimental é anexa ao mesmo. O solo foi classificado como Neossolo flúvico, de textura franco-arenosa. As amostras foram coletadas a 0-20 cm de profundidade, compostas, bem misturadas, secas ao ar e peneiradas (4,00 mm). As análises físicas e químicas do solo estudado estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Principais características físicas e químicas do solo em estudo

pH	Na	K	Ca	Mg	H	Al	N _{total}	C _{total}
-----cmol _c .dm ⁻³ -----							--- g.kg ⁻¹ ----	
6,1	0,17	0,08	2,0	1,4	2,38	0,10	0,11	0,56
Densidade	Composição Granulométrica			Umidade Gravimétrica				
d _p	Areia	Silte	Argila	33,5 kPa		1515 kPa		
--Mg.m ⁻³ --	-----	--g.kg ⁻¹ -	-----	-----kg.kg ⁻¹ -----				
2,58	600	280	120	0,16		0,05		

Análises realizadas nos laboratórios de química e física do solo da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), seguindo metodologia da EMBRAPA (1979).

3.1.2 MATERIAL ADICIONADO

Dois tipos de resíduos vegetais foram utilizados nos experimentos: borra de café e algas marinhas. A borra de café foi coletada de máquinas de processamento de café expresso, seca ao ar, peneirada e conservada em local seco. As algas foram coletadas em uma praia do litoral Norte de Pernambuco (Itamaracá) e após sua coleta foram lavadas, secas em estufa a 60°C, trituradas em moinho Wiley (malha 4) e conservadas em local seco.

O percentual do material adicionado foi de 2% em relação à massa da amostra de solo (250 g) conforme FERREIRA et al. (1993) e ALBUQUERQUE et al. (1995), o que correspondeu a 5 g de cada resíduo (algas marinhas – 4,49 mg C e borra de café - 10,61 mg C) aplicados de forma isolada e conforme os diferentes modos de aplicação propostos, ou seja: em superfície, incorporado e localizado. O modo de aplicação em superfície correspondeu à adição do material sobre a superfície da amostra de solo, após o mesmo ter sido compactado em recipiente de alumínio. Para a situação de incorporação, foi realizada uma mistura do material (resíduo) com o solo o qual foi acondicionado em recipientes de alumínio, onde se realizou a compactação. Para a condição localizado, o solo foi acondicionado nos recipientes de alumínio, seguindo sua compactação, após a qual foram feitos três pequenos orifícios na amostra de solo compactada, com auxílio de um tubo de metal vazado, onde foram adicionados os resíduos,

3.1.3 SISTEMA DE INCUBAÇÃO

O sistema de incubação (Figura 3) empregado foi semelhante ao desenvolvido por FERREIRA (1997), consistindo de frascos de vidro de aproximadamente 1670 cm³, nos quais foram colocados recipientes de alumínio, com altura de 6,0 cm e diâmetro de 7,0 cm, que repousavam em suportes de metal sob os quais (no fundo do frasco de incubação) foram distribuídos 50 cm³ de água deionizada, para manter o ambiente úmido. Nestes recipientes foram colocados 250g de solo seco ao ar, trazidos a diferentes densidades globais e conteúdos de água variados, de acordo com os tratamentos especificados. Para obtenção das densidades globais

desejadas, as amostras de solo, nos recipientes, foram préumidecidas a 30% da capacidade de campo e compactadas com o auxílio de uma prensa hidráulica.

Após a compactação, o conteúdo de água do solo foi ajustado para os valores de umidade pretendidos, de modo a proporcionar, juntamente com as densidades globais predeterminadas, amostras numa faixa de saturação que incluiu o ótimo de 60% de capacidade de retenção de água, informado por LINN; DORAN (1984). A administração dos substratos às amostras compactadas foi realizada como anteriormente descrito. A seguir completou-se o conteúdo de água do solo para os níveis de umidades pretendidos.

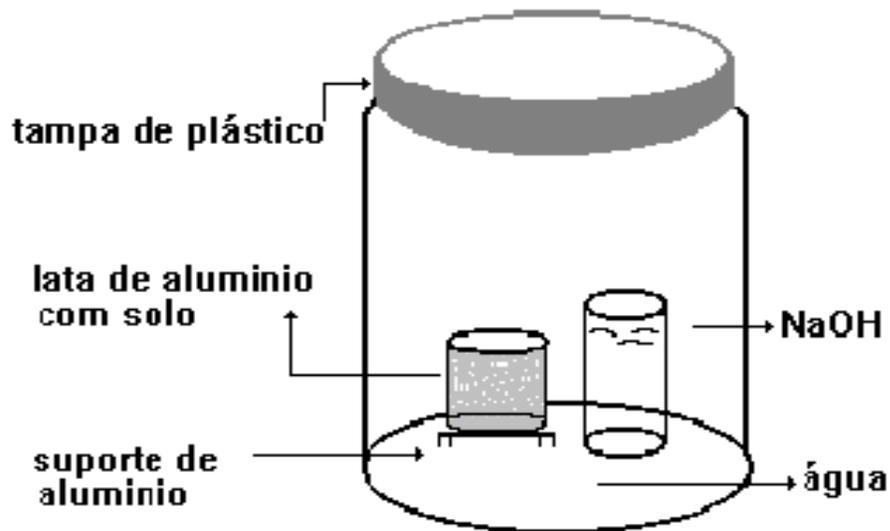


Figura 3 - Sistema fechado de incubação para medida do CO₂ liberado determinado por volumetria de neutralização. Adaptado de FERREIRA, (1997).

Os frascos de vidro (Figura 3) receberam béqueres contendo 20 ml de uma solução de NaOH 5N, para absorção do CO₂ liberado do solo, sendo imediatamente fechados. Para melhor vedação do sistema, os frascos tiveram suas bordas exteriormente envoltas com fitas de

politetrafluoetileno-PTFE (“vedarosca”), sendo as tampas protegidas em toda sua extensão (interna e externamente) por uma camada de silicone selante. Foram incluídos, frascos com branco (preparados de modo idêntico, mas não contendo amostras de solo).

Os frascos de vidro, assim preparados, foram incubados em laboratório a uma temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, por um período de 22 dias. As medidas foram iniciadas 24 horas após o fechamento (tempo 0) dos mesmos. As determinações do CO_2 liberado do solo foram realizadas 1, 3, 7, 10, 13, 16, 19 e 22 dias, após o início das incubações. Após cada período de amostragem, os frascos foram abertos, retirando-se os béqueres com álcali e substituindo-os por outros com nova solução; os frascos foram novamente fechados, prosseguindo-se, assim, a incubação das amostras.

3.1.4 MEDIDAS DA LIBERAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

As determinações do CO_2 liberado do solo foram feitas por volumetria de neutralização. As análises volumétricas foram realizadas no final de cada período de amostragem. Para isto, a solução de NaOH 5N contida nos béqueres foi completada para 50 cm^3 , com água destilada, e o volume de álcali usado determinado por cuidadosa titulação. Assim, alíquotas (10 cm^3) da solução foram trazidas a pH 10, pela adição lenta de HCl 1N e, posteriormente, a pH 8,3, pela adição cuidadosa de HCl 0,05 N, sob agitação magnética. A solução foi então titulada (por duplicado, em titulador automático) com HCl 0,05 N para pH 3,7. A quantidade de C- CO_2 liberada, durante o período de incubação avaliado, foi calculada do volume de ácido necessário para diminuir o pH da solução de 8,3 a 3,7, descontando-se o volume de ácido requerido para o tratamento - branco, conforme PARKINSON; COUPS (1963).

Conforme BERNAL (1982) e THURIÈS et al (2001), a liberação basal do C- CO_2 do tratamento controle foi subtraída da respiração bruta do C- CO_2 dos tratamentos em teste, para estimar a respiração líquida associada à mineralização da matéria orgânica adicionada (Equação 3). A quantidade total respirada de C- CO_2 liberado foi obtida pela soma do C - CO_2 respirado ao longo das amostragens (Equação 4),. O percentual de mineralização da matéria orgânica

adicionada, foi obtido pelo quociente entre o C-CO₂ acumulado aos 22 dias de incubação e o C aplicado na forma de matéria orgânica (Equação 5). Para os dados do C-CO₂ acumulado foi feito um ajuste quadrático. Pela derivação da quadrática, foi estimada a velocidade de liberação máxima do C-CO₂ em cada tratamento adotado.

$$C_i = C_i^{\text{trat.}} - C_i^{\text{controle}} \quad (3)$$

$$C_{\text{acumulado}} = \sum_i^n C_i \quad (4)$$

$$\text{MOM} = \frac{C_{\text{acumulado}}}{C - \text{MOA}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

C_i = mg C-CO₂, quantidade liberada no instante t derivado da matéria orgânica adicionada;

C_i^{trat} = mg C-CO₂, quantidade liberada no instante t do tratamento em teste;

C_i^{controle} = mg C-CO₂, quantidade liberada no instante t do tratamento controle;

$C_{\text{acumulado}}$ = mg C-CO₂, quantidade liberada acumulada derivado da MO aplicada;

MOM = Percentual de mineralização acumulada, na base de C - MO aplicada.

3. 1. 5 DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

POROSIDADE DO SOLO

A porosidade é um índice do volume relativo dos poros existentes no solo. Pode ser obtida com base na seguinte equação proposta por VOMOCIL (1967):

$$P = \left(1 - \frac{d_g}{d_p}\right) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

P = porosidade do solo (%)

d_g = densidade global do solo (Mg.m^{-3})

d_p = densidade de partículas (Mg.m^{-3})

GRAU DE SATURAÇÃO (GS)

O grau de saturação é um índice que expressa o volume de água em relação ao volume de poros. De forma prática pode ser determinado utilizando-se a seguinte equação:

$$GS = \left(\frac{\theta}{P}\right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

GS = grau de saturação (%)

θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 . \text{m}^{-3}$)

P = porosidade do solo ($\text{m}^3 . \text{m}^{-3}$)

3.1.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Experimentos de incubação foram desenvolvidos para investigar o efeito isolado e combinado de densidades globais, conteúdos de água e diferentes modos de aplicação de material vegetal (borra de café, algas marinhas) na aeração do solo, utilizando a liberação do CO_2 como um índice de respiração do solo.

Experimento 1 – O experimento consistiu de um fatorial 2x3, inteiramente ao acaso, com três repetições, comparando a adição dos resíduos (algas marinhas – 4,49 g C. kg de solo⁻¹ – e borra de café – 10,61 g C kg de solo⁻¹) e as modalidades de aplicação dos resíduos orgânicos (superfície, incorporado e localizado). Foi incluído ainda, um tratamento controle (solo sem resíduos orgânicos). As amostras do solo foram compactadas para uma mesma densidade global (1,53 Mg.m⁻³) e mantidas em mesmo nível conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹).

Experimento 2 – O experimento consistiu de um fatorial 2x3x3, inteiramente ao acaso, com três repetições, comparando a adição dos resíduos orgânicos (algas marinhas – 4,49 g C. kg de solo⁻¹ – e borra de café – 10,61 g C kg de solo⁻¹), modalidades de aplicação dos resíduos orgânicos (superfície, incorporado e localizado) e densidades globais (1,30; 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³). Foram incluídos ainda, tratamentos controles (solo sem adição dos resíduos orgânicos) para a cada densidade global avaliada. Os tratamentos foram mantidos em um mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹).

Experimento 3 - O experimento consistiu de um fatorial 2x3x3, inteiramente ao acaso, com três repetições, comparando a adição dos resíduos orgânicos (algas marinhas – 4,49 g C. kg de solo⁻¹ – e borra de café – 10,61 g C kg de solo⁻¹), modalidades de aplicação dos resíduos orgânicos (superfície, incorporado e localizado) e conteúdos de água (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg⁻¹). Foi incluído ainda, tratamento controle (solo sem adição dos resíduos orgânicos) para cada conteúdo de água no solo avaliado. Os tratamentos foram mantidos em uma mesma densidade global (1,53Mg.m⁻³).

Análises dos dados -. Os dados de velocidade de liberação do C-CO₂ e do percentual de mineralização (na base de C-aplicado) foram submetidos à análise de variância com o auxílio do programa STATISTICA 5.0 (statSoft. Inc., Tulsa). Os efeitos dos tratamentos foram avaliados pelo teste F e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, HSD.

3.2 EXPERIMENTO EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO

3.2.1 EXPERIMENTO I

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, localizada no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco. O solo utilizado foi o mesmo do experimento anterior.

3.2.2 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO

Um sistema de compactação foi desenvolvido e montado para estabelecer as densidades globais a serem empregadas no presente estudo, simulando as frequentemente encontradas em sistemas de manejo convencional e não-cultivado. O sistema (Figura 4), que consiste em uma variação da prensa hidráulica utilizada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC), teve seus resultados comparados com os obtidos por essa prensa; podendo ser montado dentro da casa de vegetação ou do laboratório, facilitando o preparo e manuseio das amostras compactadas.



Figura 4 – Foto ilustrativa do Sistema de Compactação Hidromecânico de solo desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear.

3.2.3 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Um dispositivo experimental para preparo de amostras compactadas utilizando tubos de PVC de aproximadamente 25 cm de altura e 10 cm de diâmetro foi desenvolvido. Os tubos de PVC eram seccionados longitudinalmente (Figura 5a), e após os cortes as duas metades (calhas) eram justapostas e rejuntadas com cola “silicone selante” (Figura 5b). Por volta dos tubos montados eram utilizados cintos de borracha para reforço na junção das calhas. Os tubos foram justapostos, para receber o solo (2 kg) a ser compactado. O sistema de compactação utilizado foi o descrito anteriormente, constando ainda de uma camisa de ferro dentro da qual os tubos eram posicionados para evitar a deformação do tubo de PVC (Figura 5c).



(a)

(b)

(c)

Figura 5- Tubos de PVC (a) utilizados na montagem do experimento em casa de vegetação. As amostras de solo (b) contidas nos tubos foram assim preparadas, colocadas em camisa de ferro (c) e compactadas artificialmente.

3.2.4 MATERIAL ADICIONADO

Foram adicionados ao solo de forma isolada, materiais orgânicos, organominerais e minerais com base na quantidade de solo da unidade experimental (2 kg/tubo), com vistas a que fossem fornecidas as mesmas quantidades para cada uma delas. Os materiais utilizados e as quantidades correspondentemente são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Fontes e doses de adubos utilizados na cultura de feijão caupi

Adubação	Material adicionado	g / tubo
orgânica	esterco de boi	7,25
Orgânica+mineral 1	*Composto	0,880
	Uréia,	0,362
	Superfosfato triplo	0,162
	Cloreto de potássio	0,050
Orgânica+mineral 2	*Composto	1,09
	Uréia,	0,225
	Superfosfato triplo	0,100
	Cloreto de potássio	0,037
mineral	Uréia	0,180
	Superfosfato triplo	0,080
	Cloreto de potássio	0,025

*composto (algas marinhas, borra de café, substrato de coco, composto orgânico da CEASA, palha de cana e esterco de boi).

Os materiais foram incorporação ao solo e após a mistura de acordo com cada tratamento proposto, as amostras foram umedecidas até 80% da capacidade de campo, permanecendo em repouso por 48 horas, para distribuição uniforme da umidade no solo. Logo após seguiu-se a compressão artificial das amostras com auxílio do sistema de compactação descrito acima.

Os resultados das análises químicas dos fertilizantes organomineral 1 e 2 são apresentados na tabela 3. Os valores obtidos para o esterco bovino foram: N (2,29%); P₂O₅ (2,4 %) e K₂O (3,2%).

Tabela 3 - Resultado das análises químicas dos fertilizantes organominerais 1 e 2

Adubos	P (Mg/dm ³)	pH (H ₂ O)	cmolc.dm ⁻³									
			Na	K	Ca	Mg	H	Al	S	CTC	v%	
Organomineral 1	566	5,91	6,50	3,30	53,87	2,63	67,85	1,50	66,3	135,7	48	
Organomineral 2	325	6,11	4,00	2,40	43,37	4,63	41,05	1,20	98,7	96,6	55	

Análise realizada nos laboratórios de química da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), seguindo metodologia da EMBRAPA (1979)

3.2.5 DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DA PLANTA

A cultura utilizada foi o feijão caupi [*Vigna unguiculata*, (L) Walp], variedade IPA-206. As sementes foram obtidas da Empresa de Pesquisa Agropecuária (IPA), Recife-Pernambuco. Foram distribuídas três sementes por tubo. Após 10 dias, fez-se o desbaste, deixando-se uma planta por tubo. A duração do experimento foi de 60 dias. As irrigações foram realizadas a cada dois dias, sendo seu controle feito pelo método gravimétrico, restabelecendo-se o nível de umidade inicial, pela adição de água, quando necessário.

Altura de Planta (AP)- Durante a fase de crescimento da cultura foram feitas medidas da altura de planta, aos 10, 20, 30 e 60 dias após a semeadura - (DAS).

Comprimento radicular (CR) - Ao termino do experimento, as raízes foram separadas do solo, determinando-se o comprimento radicular.

Massa seca da parte aérea (MSPA) –Após a coleta as partes aéreas foram acondicionadas em sacos de papel, etiquetados, o material foi pesado e posto em estufa de circulação de ar, sob temperatura de 65°C por 72 horas. O material foi colocado em dessecador (para esfriar) e novamente pesado.

Massa seca dos nódulos (MSN) - Os sistemas radicais das plantas foram liberados cuidadosamente do excesso de solo que continham, por desagregação manual e lavagem com água sobre uma peneira (1mm). Posteriormente, procedeu-se a seleção e pesagem dos nódulos, em balança de precisão (0,001g), e à sua armazenagem em tubos de vidro fechados, contendo algodão e sílica-gel, como recomendado por DATE & HALLIDAY (1987).

3.2.7 DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

Retenção da água no solo

As curvas características de retenção de água foram obtidas para cada tratamento estabelecido. As amostras foram saturadas por 24 horas e em seguida submetidas a diferentes potenciais mátricos (ψ_m) em mesa de tensão e em panela de pressão de RICHARDS. Os dados experimentais obtidos com as curvas de retenção foram ajustados pela expressão de VAN GENUCHTEN (1980) com a hipótese de BURDINE (1953). Os ajustes foram realizados utilizando-se a equação:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m} \quad (8)$$

Com a hipótese de BURDINE: $m = 1 - 2/n$, Onde:

θ_s - representa a umidade volumétrica na saturação;

θ_r - representa a umidade residual;

α - representa o inverso da pressão de borbulhamento, a partir da qual a água começa a ser drenada do solo previamente saturado;

n - é um parâmetro de distribuição do tamanho dos poros que afeta a forma da curva de retenção;

m e parâmetro de ajuste obtido pelo método dos mínimos quadráticos dos desvios;

h - o potencial matricial.

3.2.8 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento consistiu em um arranjo fatorial 4x2, inteiramente casualizado, com quatro repetições, comparando as combinações entre os quatro materiais adicionados (NPK, esterco bovino, organomineral-1, organomineral -2) e dois níveis de densidade do solo (1,30 Mg.m⁻³ – solo não compactado e 1,60 Mg.m⁻³ - solo compactado). Foi incluído ainda, um tratamento controle (sem adição dos materiais) para as duas densidades.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Os valores encontrados para a massa seca de nódulos, não apresentaram homogeneidade de variância, sendo utilizada uma transformação logarítmica.

3.2.2 EXPERIMENTO II

Um experimento foi conduzido em casa de vegetação, localizada no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco. O solo utilizado foi o mesmo do experimento anterior.

3.2.2.1 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO

Um sistema de compactação foi desenvolvido e montado para estabelecer as densidades globais empregadas no presente estudo, simulando as freqüentemente encontradas em sistemas de manejo convencional e não-cultivado. O sistema, que consiste em uma variação da prensa hidráulica utilizada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC), teve seus resultados comparados com os obtidos por essa prensa e pode ser montado dentro da casa de vegetação ou do laboratório o que, facilita o preparo e manuseio das amostras compactadas (Figura 6).



Figura 6 – Vista lateral do Sistema de Compactação Hidromecânica de solo, desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear.

3.2.2.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

No experimento foram utilizados 20 latões de chapa de ferro comum, com 56 cm de diâmetro por 40 cm de altura. Internamente, os latões, foram impermeabilizados com tinta especial. Em cada latão foi colocada uma camada de 5 cm de brita 19; em seguida a brita foi forrada com bidim (Figura 7a), por sobre o qual foi distribuído o solo (80kg) (Figura 7b). As amostras de solo contidas nos latões foram umedecidas até 80% da capacidade de campo, permanecendo em repouso por 48 horas, para distribuição mais uniforme da umidade no solo.



a)

b)

Figura 7 - Latões de chapa de ferro sendo preparados para utilização em casa de vegetação.

Em cada latão, já preenchido com solo, e com o auxílio do sistema de compactação anteriormente descrito, foram introduzidos tubos de PVC, com o objetivo de retirar uma quantidade de solo, que foi então compactada para a densidade desejada (Figura 7b). Após a compactação as amostras de solo foram novamente colocadas nos latões para então proceder ao cultivo. Desse modo, em cada latão havia três colunas de solo com densidades iguais entre si ($1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$), mas diferentes da densidade do solo ao seu redor ($1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$).

Grupos de sementes (40 sementes /amostra) secas, viáveis, foram mergulhadas, separadamente, numa solução de hipoclorito de sódio a 0,5% por 15 minutos, lavadas cinco vezes uma hora antes de serem irradiadas. As sementes de feijão caupi [*Vigna unguiculata*, (L) Walp] variedade IPA-206, obtidas da Empresa de Pesquisa Agropecuária (IPA), foram expostas aos raios gama de uma fonte de ^{60}Co (Cobalt Irradiator Radionics Laboratory, Scotch Plains, New Jersey, USA; taxa de dose $20,6 \text{ Gy hora}^{-1}$), no Departamento de Energia Nuclear (UFPE). As doses utilizadas foram 100, 200 e 300 Gy, comparadas a um controle (0 Gy) sem irradiação. As sementes (nove) foram distribuídas nos latões, e aos 10 dias após a emergência das plântulas, efetuou-se o desbaste deixando apenas três por latão. As irrigações foram realizadas a cada dois dias, sendo seu controle feito pelo método gravimétrico. O experimento teve a duração de 60 dias.

3.2.2.3 DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DA PLANTA

Altura de Planta (AP) - Durante a fase de crescimento da cultura foram feitas medidas da altura de planta, aos 10, 20, 30 e 60 dias após a semeadura (DAS).

Massa seca da parte aérea (MSPA) –Após a coleta as partes aéreas foram acondicionadas em sacos de papel, etiquetados, o material foi pesado e posto em estufa de circulação de ar, sob temperatura de 65°C por 72 horas. O material foi colocado em dessecador (para esfriar) e novamente pesado.

Diâmetro do Caule (DC) – Realizou-se a medida do diâmetro do caule aos 60 (DAS) sendo para isto, utilizado um paquímetro de marca Vernier Caliper.

3.2.2.4 DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

Retenção de água no solo

Os dados experimentais das curvas de retenção de água no solo foram obtidos e ajustados seguindo a mesma metodologia descrita no item 3.2.7.

Resistência à penetração do solo

A resistência à penetração foi avaliada utilizando um penetrômetro do tipo cônico, modelo SOLOTEST S-210, com ângulo de penetração de 30°C e área basal de 6,33 cm². As medidas de resistência foram realizadas na seqüência dos testes de compactação, onde em cada amostra, foram feitas medições em 3 pontos selecionados acaso.

A resistência à penetração foi obtida pela relação entre a força exercida para fazer penetrar uma haste metálica no solo e sua área basal. Essa relação é expressa como índice de cone (IC), de acordo com BRADFORD (1986).

O princípio de utilização do aparelho é baseado na resistência do solo à penetração de uma haste metálica graduada após o recebimento de uma força vertical em sua extremidade superior. A leitura obtida é então transformada em unidades de resistência do solo (kgf/cm²) de acordo com a equação 9. Para possibilitar a comparação com outros dados disponíveis na literatura, os resultados da resistência do solo, obtidos em kgf/cm², foram convertidos para MPa (STOLF,1990).

$$IC = \text{leitura no manômetro (kgf)} \times 1/\text{área basal do cone (cm}^2\text{)} \quad (9)$$

Índice de qualidade física do solo (S)

Após os dados experimentais obtidos com as curvas de retenção serem ajustados pela expressão de VAN GENUCHTEN (1980), foi determinada a declividade (S), no ponto de inflexão da curva. De acordo com DEXTER (2004), esse parâmetro é uma medida da microestrutura do solo e pode ser usado como índice de qualidade física do solo.

A determinação da posição e da declividade no ponto de inflexão da curva (S) é baseada nas seguintes equações de VAN GENUCHTEN. Os parâmetros já foram identificados no item 3.2.7.

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m} \quad (10)$$

Que pode ser escrita:

$$d\theta_s / d \ln(h) = (d\theta_s / dh) \cdot (dh / d \ln(h)) \quad (11)$$

Onde $\ln(h)$ é o logaritmo natural de h. Entretanto,

$$d\theta_s / d \ln(h) = -mn (\theta_s - \theta_r) \cdot \alpha^n \cdot h^{n-1} [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m-1} \quad (12)$$

No ponto de inflexão:

$$\begin{aligned} d^2 \theta_s / d \ln^2 h^2 &= -mn (\theta_s - \theta_r) \cdot \alpha^n \cdot \{nh^{n-1} [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m-1} + \\ &h^n (-m-1) \alpha^n nh^{n-1} \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m-2}\} \quad h=0 \end{aligned} \quad (13)$$

Entretanto, o modulo do potencial da água no ponto de inflexão é :

$$h_i = 1/h [1/m]^{1/n} \quad (14)$$

A declividade S, no ponto de inflexão é obtida substituindo a equação (14) na equação (12), resultando em:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (1/m)]^{-(1+m)} \quad (15)$$

3.2.2.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento teve como objetivo avaliar os efeitos da radiação gama do ^{60}Co no desenvolvimento do feijão caupi- IPA- 206, em particular na redução de altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC) e matéria seca da parte aérea (MSPA), estando o solo compactado ($1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$), e não compactado ($1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$).

O experimento consistiu num fatorial 4×2 inteiramente casualizado, com três repetições, comparando as combinações entre doses de irradiação (0, 100, 200 e 300Gy) e níveis de densidade do solo ($1,30$ e $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$). A duração do experimento foi de 60 dias.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

SISTEMA DE COMPACTAÇÃO - AJUSTE DE METODOLOGIA NA COMPACTAÇÃO DE AMOSTRAS DO SOLO

As tendências obtidas na comparação da deformação de amostras de solo empregando o sistema de compactação desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear (DEN)/UFPE, com as deformações das amostras de solo compactadas na prensa hidráulica do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia (DEC)/UFPE estão apresentadas na Figura 8.

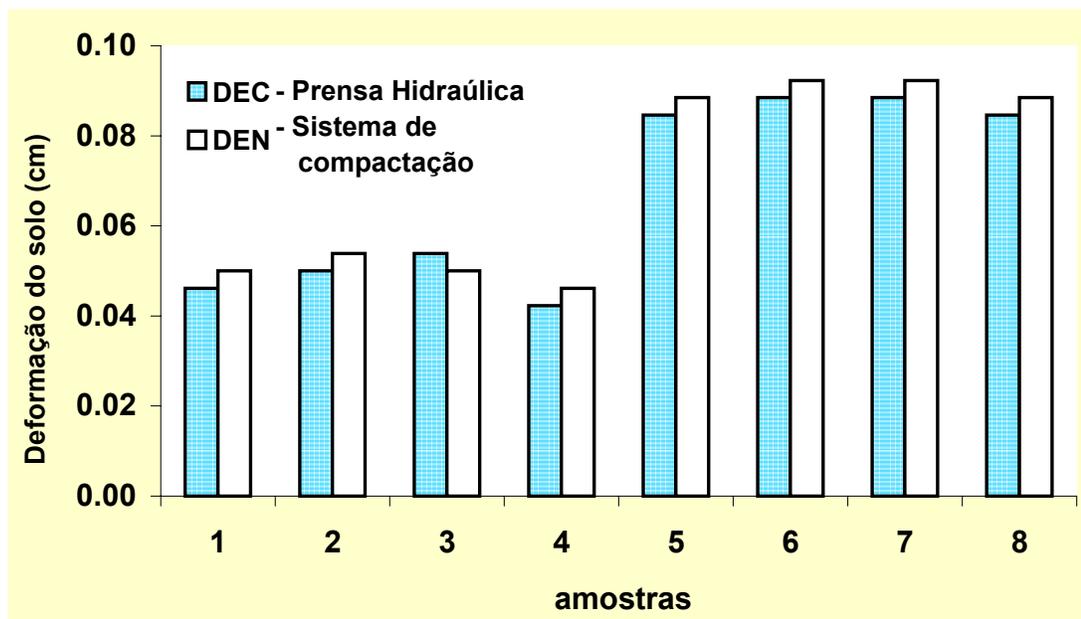


Figura 8 - Comparação entre os dados de deformação das amostras de solo obtidos com o Sistema de Compactação Hidromecânico de solo do Departamento de Energia Nuclear (DEN) e a Prensa Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil (DEC). As amostras de 1 a 4 e de 5 a 8 foram compactadas com 1 e 2 toneladas, respectivamente.

Os resultados desta avaliação mostram-se bastantes próximos entre si, revelando um erro médio em torno de 10%. Os valores encontrados para os sistemas adotados indicaram que o sistema do DEN pode ser utilizado com segurança quanto à obtenção de dados dentro da faixa de pressões utilizadas.

Ainda, no Laboratório de Engenharia Civil foi levantada pelo método de Proctor Normal a Curva de Compactação do solo (Neossolo flúvico) utilizado no presente trabalho, (Figura 9). Com a curva foram identificados o nível ótimo de umidade e a densidade aparente máxima de compactação. A teoria de compactação foi desenvolvida para verificar a influência do conteúdo de água na qualidade final de um solo compactado. PROCTOR, em 1933 desenvolveu um ensaio dinâmico para determinação experimental da curva de compactação mostrando que, com uma certa energia de compactação aplicada, a massa específica ou densidade máxima resultante é função da umidade em que o solo estiver.

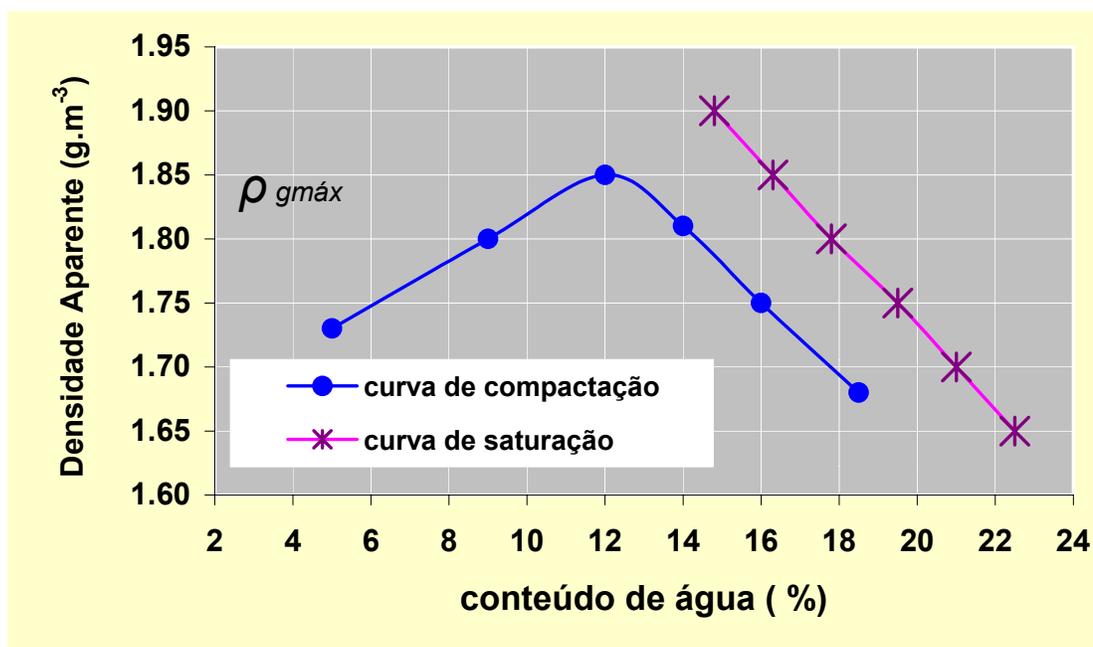


Figura 9 - Curva de compactação de um solo Neossolo flúvico, obtida pelo método de Proctor Normal.

Com a curva (Figura 9) tem-se, no ponto de inflexão, a determinação do conteúdo de água chamado ótimo de umidade ($U_{\text{ótimo}}$). Para o solo trabalhado (Neossolo flúvico) este ótimo corresponde a 12% e significa que, se o solo for compactado com a mesma energia do ensaio, nesse conteúdo de água, ele apresentará a densidade aparente máxima de compactação ($d_{\text{máxima}}$), no caso, correspondendo a $1,85\text{g/cm}^3$. O acréscimo da densidade aparente no ramo ascendente da curva de compactação (ramo seco), pode ser explicado pelo fato da água lubrificar as partículas e facilitar o arranjo delas. No ramo descendente (ramo úmido), a água amortiza a compactação e começa a ter mais água do que sólidos, sendo por essa razão que a densidade aparente decresce. Ainda, no gráfico do ensaio, pode-se traçar a curva de saturação, que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade, estando o solo saturado.

De acordo com SILVA et al. (1986), maiores teores de argila e de matéria orgânica do solo provocam redução na amplitude das curvas de compactação, diminuindo, conseqüentemente, a densidade do solo máxima e aumentando a umidade ótima ou crítica de compactação, pelo fato de a argila e a matéria orgânica influírem no poder de adsorção de água do solo (SILVA et al., 1986).

Por outro lado, PACHECO; DIAS JUNIOR (1990) observaram que a umidade ótima de compactação diminuiu e a densidade máxima correspondente aumentou, à medida que se adicionou areia a um Latossolo Vermelho-Amarelo. Assim sendo, de acordo com RAGHAVAN, ALVO, MCKYES (1990), espera-se que a susceptibilidade do solo à compactação aumente à medida que o teor de areia dos solos também aumente. Isso pode ocorrer devido ao fato de que as partículas dos solos, com predominância da fração areia, se rearrajarem mais acirradamente do que nos solos com predominância da fração argila.

EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

EFEITO DA COMPACTAÇÃO, CONTEÚDOS DE ÁGUA E ADIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM DIFERENTES MODALIDADES DE APLICAÇÃO NA LIBERAÇÃO DE CO₂ DE UM NEOSSOLO FLÚVICO

Experimento 1

A adição isolada dos resíduos orgânicos, borra de café e algas marinhas, ao solo, influenciou a liberação do C-CO₂ do solo (Figura 10). As velocidades do C-CO₂ liberado apresentaram-se significativamente ampliadas nos tratamentos que receberam a adição dos resíduos, ao longo de todo o período de incubação. Vale lembrar, para este experimento, que as amostras de solo empregadas foram submetidas a um mesmo nível de densidade (1,53 Mg.m⁻³) e mantidas num mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹).

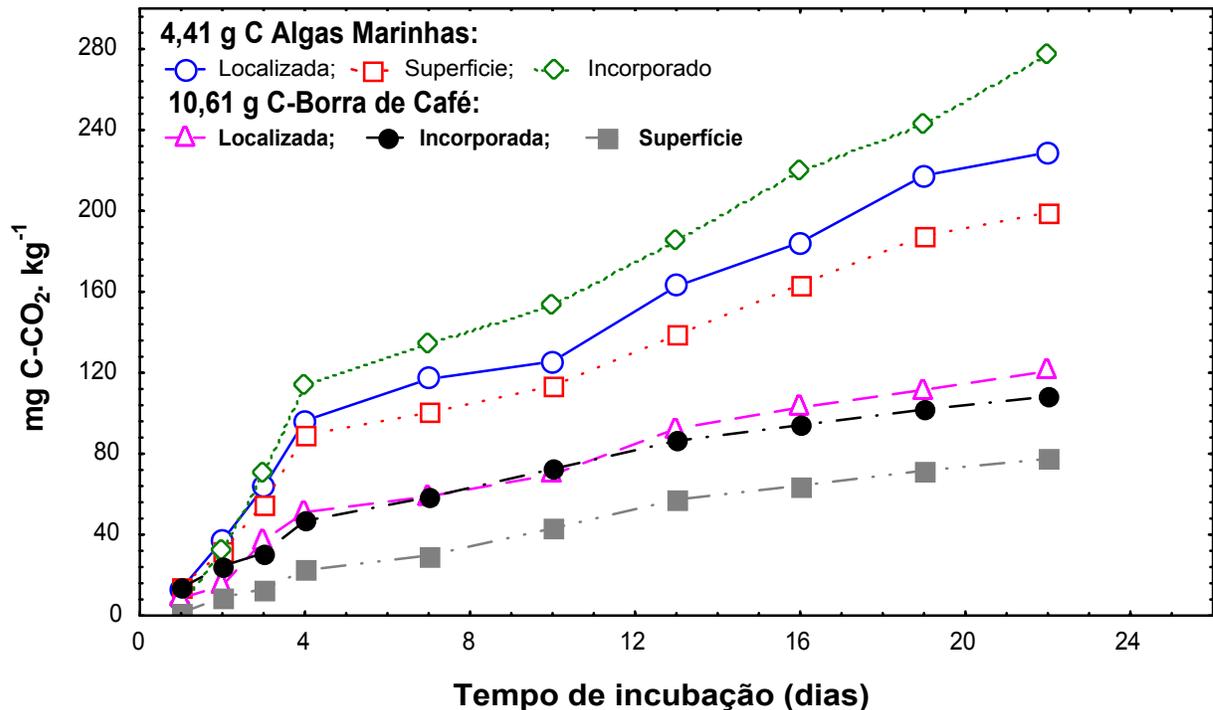


Figura 10– Influência dos diferentes modos de aplicação da borra de café e das algas marinhas na liberação do C-CO₂ do Neossolo flúvico, em um mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹) e densidade global (1,53 Mg.m⁻³).

Estas tendências concordam com as normalmente encontradas na literatura e confirmam ser a produção de CO₂ intensificada pela adição de materiais orgânicos ao solo, evidenciando variações nas taxas de respiração microbiana em resposta à fertilização com diferentes resíduos (NUERNBERG et al., 1984; MINHONI et al., 1995 e ALBUQUERQUE et al., 1995).

Em geral, a atividade microbiana foi mais expressiva nos primeiros dias de incubação, ocorrendo após um decréscimo na liberação de C-CO₂. Este comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de nutrientes, observada logo após a aplicação dos resíduos que pode ter favorecido a respiração microbiana. NETO; SOUZA (2000) observaram que sendo a microbiota importante na reconstrução da fertilidade ela fornece um indicativo precoce de mudança no conteúdo de matéria orgânica. Segundo os autores a estimativa através da liberação de CO₂, mostra-se bastante indicada como ferramenta para avaliar mudanças, pelo seu baixo custo e rapidez.

Como esperado, as quantidades do C-CO₂ liberado do solo em função da adição isolada dos resíduos, indicaram diferenças em resposta aos diferentes modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície), ao longo de todo o período de incubação do solo. A análise de variância para a velocidade máxima da liberação do C-CO₂ e percentagem de mineralização (% com base no C adicionado) para 22 dias da incubação, indicaram que houve efeito significativo para a interação resíduos orgânicos versus modos de aplicação ($p < 0,01$). A velocidade máxima de liberação do C-CO₂ para os tratamentos com adição de algas marinhas mostraram-se significativamente superiores ($p < 0,01$), em relação aos tratamentos que receberam borra de café (Figura 11), em cada modalidade de aplicação.

As diferenças entre as curvas (Figura 10) correlacionaram-se bem com a relação C/N (carbono/nitrogênio) dos resíduos adicionados (20 e 43, para algas marinhas e borra de café, respectivamente). De modo que as algas marinhas com relação C/N mais estreita foram mais rapidamente mineralizadas. A relação C/N (carbono/nitrogênio), dá uma boa base para previsão da taxa de decomposição. Nesta relação quanto maior este valor, maior será o tempo de decomposição. Logo, quanto menor for a quantidade de N no processo, mais lentamente este ocorrerá.

De acordo com BRODER; WAGNER (1988), a qualidade e a localização dos resíduos influencia a sua taxa de decomposição e a composição da comunidade microbiana que atua nesse processo. A matéria orgânica sujeita a decomposição microbiana, como as partes dos vegetais que caem à superfície do solo, e as raízes, passa por distintas e sucessivas fases de decomposição. Entre elas estão as transformações mecânicas que consistem no tritramento e incorporação dos resíduos orgânicos ao solo, que têm como responsável a fauna do solo, e as transformações biológicas operadas por microrganismos, nas quais a decomposição dos resíduos libera carbono para a atmosfera como dióxido de carbono. Neste processo, parte do carbono pode ser utilizada pelos microrganismos para a síntese de células e parte é convertida em húmus estável. Ao mesmo tempo, parte do húmus nativo é mineralizado (mineralização é o termo usado para designar a conversão do complexo orgânico de um elemento para o estado inorgânico) (GRAY; WILLIAMS, 1971).

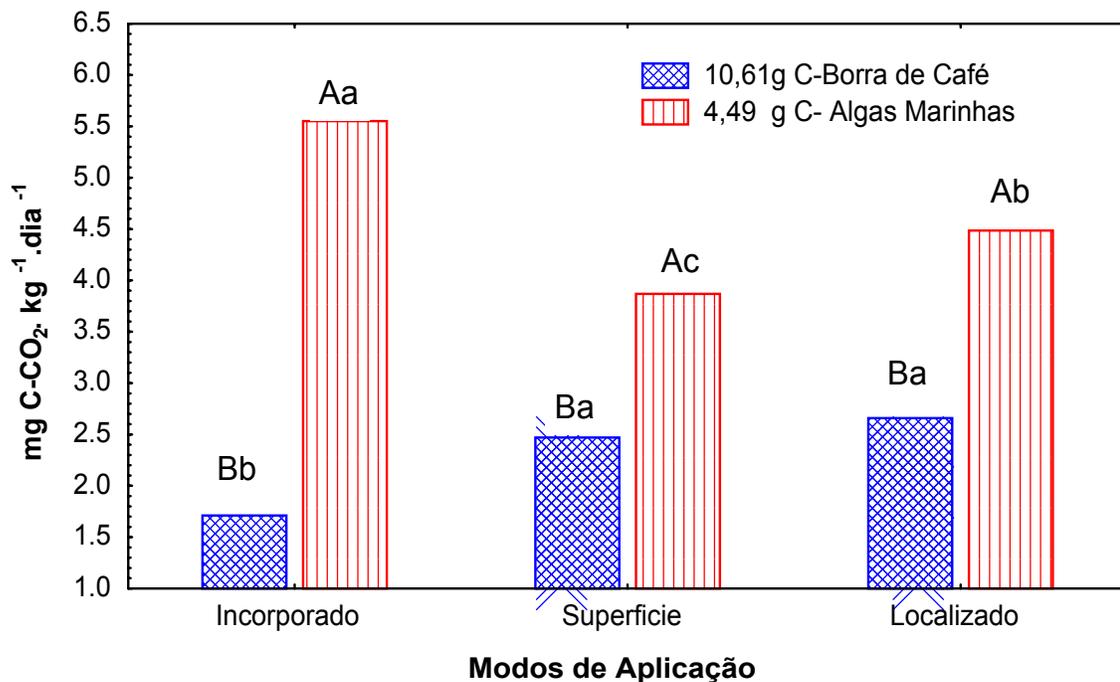


Figura 11– Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvico, em resposta a adição de matéria orgânica (borra de café e de algas marinhas) e modos de aplicação (incorporado, superfície e localizado). Letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente, comparam tipo de matéria orgânica e modos de aplicação. Médias com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (1%).

A velocidade máxima de liberação do CO₂ nos tratamentos com borra de café, nos modos superfície e localizado (2,48 e 2,68 mg C-CO₂. dia⁻¹. kg⁻¹, respectivamente), não diferiram entre si. Entretanto, foram superiores a aplicação em incorporado (1,75 mg C-CO₂ dia⁻¹. kg⁻¹). A aplicação de algas marinhas de modo incorporado (5,58 mg C-CO₂ dia⁻¹. kg⁻¹), induziu velocidades de C-CO₂ superiores aos tratamentos nos modos superfície e localizado (3,87 e 4,51 mg C-CO₂ dia⁻¹. kg⁻¹, respectivamente) (Figura 11). Os percentuais de mineralização da matéria orgânica para os tratamentos com aplicação de borra de café, nos modos superfície e localizado (1,76 e 1,87%, respectivamente), não diferiram entre si. Entretanto, o modo de aplicação localizado diferiu da aplicação em incorporado (1,87 e 1,14 %, respectivamente), e o modo superfície e incorporado (1,76 e 1,14 %, respectivamente) não se apresentaram estatisticamente diferentes (Figura 12). A aplicação de algas marinhas no modo incorporado (9,67 %), revelou percentual de mineralização de C aplicado superior aos encontrados nos tratamentos nos modos superfície e localizado (7,40 e 8,43 %, respectivamente) (Figura 12).

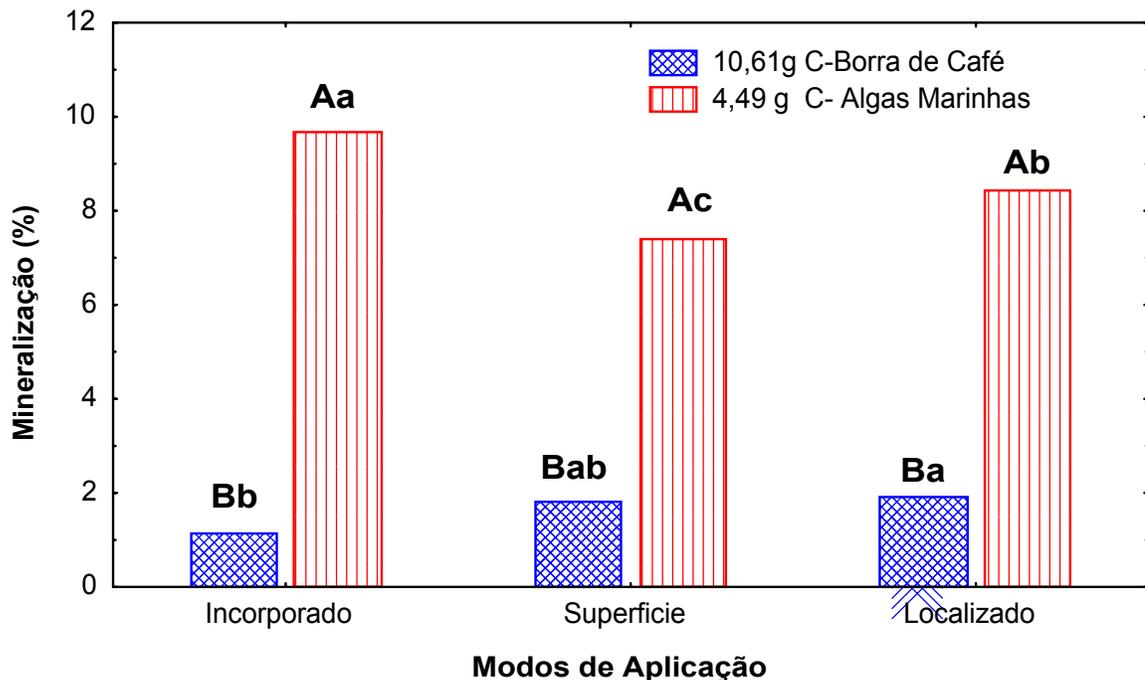


Figura 12– Mineralização (na base de C aplicado) da matéria orgânica (borra de café e de algas marinhas) em um Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta aos modos de aplicação (incorporado, superfície e localizado). Letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente, comparam tipo de matéria orgânica e modos de aplicação. Médias com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (1%).

Experimento 2

Semelhante ao experimento 1, a velocidade máxima de liberação do C-CO₂ foi significativamente influenciada pela adição de algas marinhas e borra de café ao solo. Estando as amostras de solo submetidas a diferentes níveis de densidades globais (1,30; 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³) e mantidas num mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹). A análise de variância indicou que a velocidade de liberação máxima de C-CO₂ e o percentual de mineralização (% com base no C adicionado) apresentaram efeito significativo para a interação modos de aplicação versus matéria orgânica versus densidade global ($p < 0,01$) (Figura 13).

Com relação à velocidade máxima de liberação do C-CO₂, os tratamentos com algas marinhas mostraram-se significativamente ampliados ($p < 0,01$), em relação aos tratamentos que receberam borra de café para todas as densidades testadas (Figura 13). A velocidade de liberação do C-CO₂ do solo adicionado com algas marinhas foi diminuída pelo aumento da densidade global do solo no modo de aplicação em superfície e localizado. O maior valor encontrado (6,47 mg de C-CO₂. dia⁻¹.kg⁻¹) correspondeu à densidade de 1,30 Mg.m⁻³ para a aplicação em superfície. O menor valor observado (4,35. Mg.m⁻³) foi estabelecido na densidade 1,66 Mg.m⁻³ para aplicação localizada. Tendências contrárias foram observadas com relação ao modo de aplicação incorporado, ou seja, a velocidade de liberação de C-CO₂ aumentou conforme o solo foi compactado. A maior velocidade de liberação de C-CO₂ encontrada (7,05 mg de C-CO₂ dia⁻¹.kg⁻¹) correspondeu a densidade 1,66 Mg.m⁻³). Estes resultados provavelmente refletem um maior contato do material com o solo, expondo a matéria orgânica a um ataque microbiano mais efetivo, que causa, como consequência, uma maior atividade dos microrganismos, como observado nos resultados encontrados por RESCK et al. (1991).

Com relação aos tratamentos com borra de café, no modo de aplicação em superfície, os valores se apresentaram estatisticamente iguais (0,35 mg C-CO₂ dia⁻¹.kg⁻¹) nos três diferentes níveis de densidade do solo. Entretanto, para o modo de aplicação incorporado e localizado, houve decréscimos dos valores em função da compactação do solo. Os maiores valores encontrados foram 3,71 e 1,85 mg C-CO₂ dia⁻¹.kg⁻¹, respectivamente, para as aplicações incorporado e localizado na densidade 1,30 Mg.m⁻³.

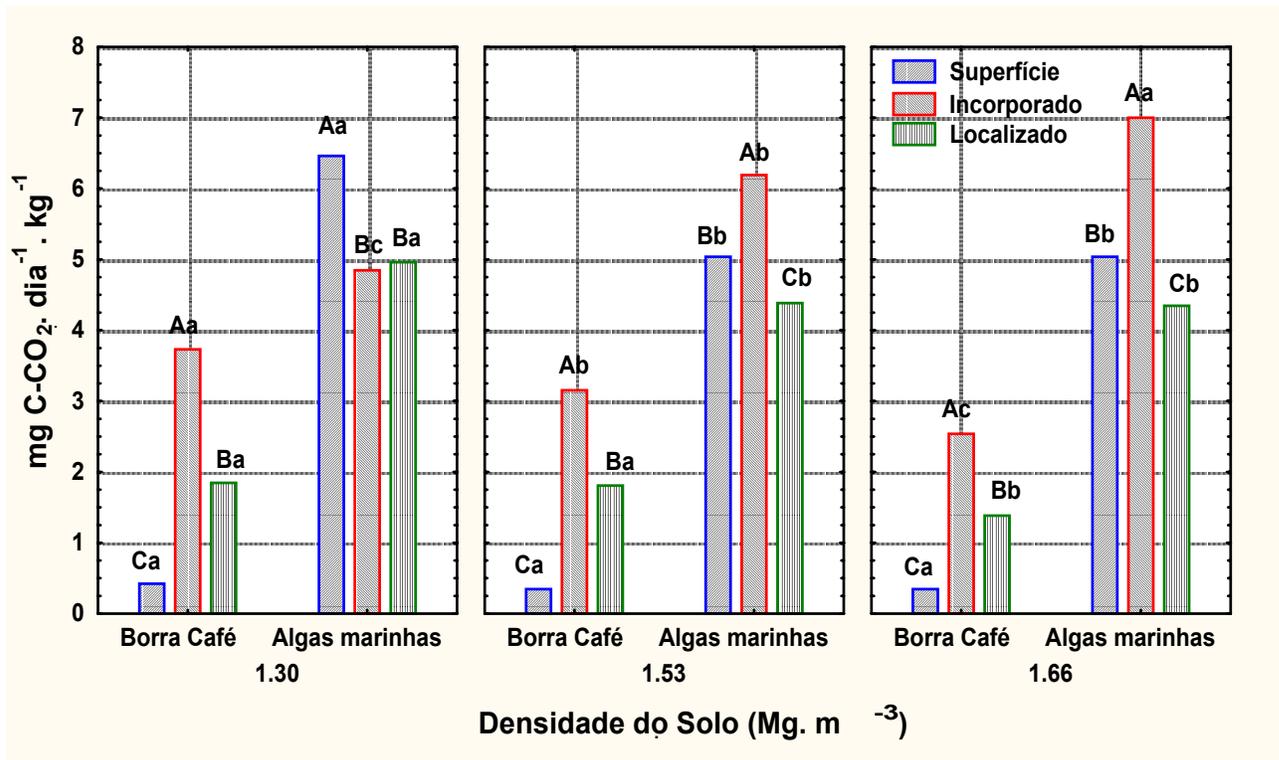


Figura 13-Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvivo (franco-arenoso), em resposta a tipos (borra de café e algas marinhas) e modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes densidades do solo (1,30; 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³). Letras maiúsculas comparam modos de aplicação dentro do mesmo resíduo, para a mesma densidade do solo. Letras minúsculas, comparam tratamentos com o mesmo resíduo para cada nível de densidade do solo, pelo Teste de Tukey (1%).

Segundo TAYLOR (1949), o maior efeito da compactação do solo (reflexo do aumento na densidade) sobre a atividade microbiana resulta da mudança do estado de aeração do solo, por causa da perda de continuidade dos macroporos do solo. O resultado mais evidente de uma aeração deficiente do solo sobre os processos microbiológicos é a diminuição na intensidade da oxidação da matéria orgânica. Este decréscimo parece estar mais associado à falta de O₂ do que ao excesso de CO₂. Sabe-se que todos os organismos aeróbios do solo são incapazes de atuar adequadamente na ausência de O₂. A população microbiana é, portanto, drasticamente influenciada pela aeração do solo. A lenta decomposição dos resíduos em solos alagados constitui um exemplo, um pouco exagerado, do modo pelo qual a falta de oxigênio evita a decomposição rápida da matéria orgânica.

Com relação ao percentual de mineralização do C (Figura 14), os tratamentos com algas marinhas mostraram-se significativamente ampliados ($p < 0,01$), em relação aos tratamentos que receberam borra de café para todas as densidades testadas. A percentagem de C mineralizado no solo adicionado de algas marinhas foi diminuída pelo aumento da densidade global no modo de aplicação em superfície e localizado. O maior valor encontrado (10,29 %) correspondeu a densidade de $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ para a aplicação em superfície e o menor valor observado (7,47 %) foi na densidade $1,66 \text{ Mg.m}^{-3}$ para aplicação localizada. Tendências contrárias foram observadas com relação ao modo de aplicação incorporado, ou seja, o percentual de mineralização C aumentou conforme o solo foi compactado. A maior percentagem de mineralização de algas marinhas observada foi no modo incorporado (10,16 %) para a densidade $1,66 \text{ Mg.m}^{-3}$.

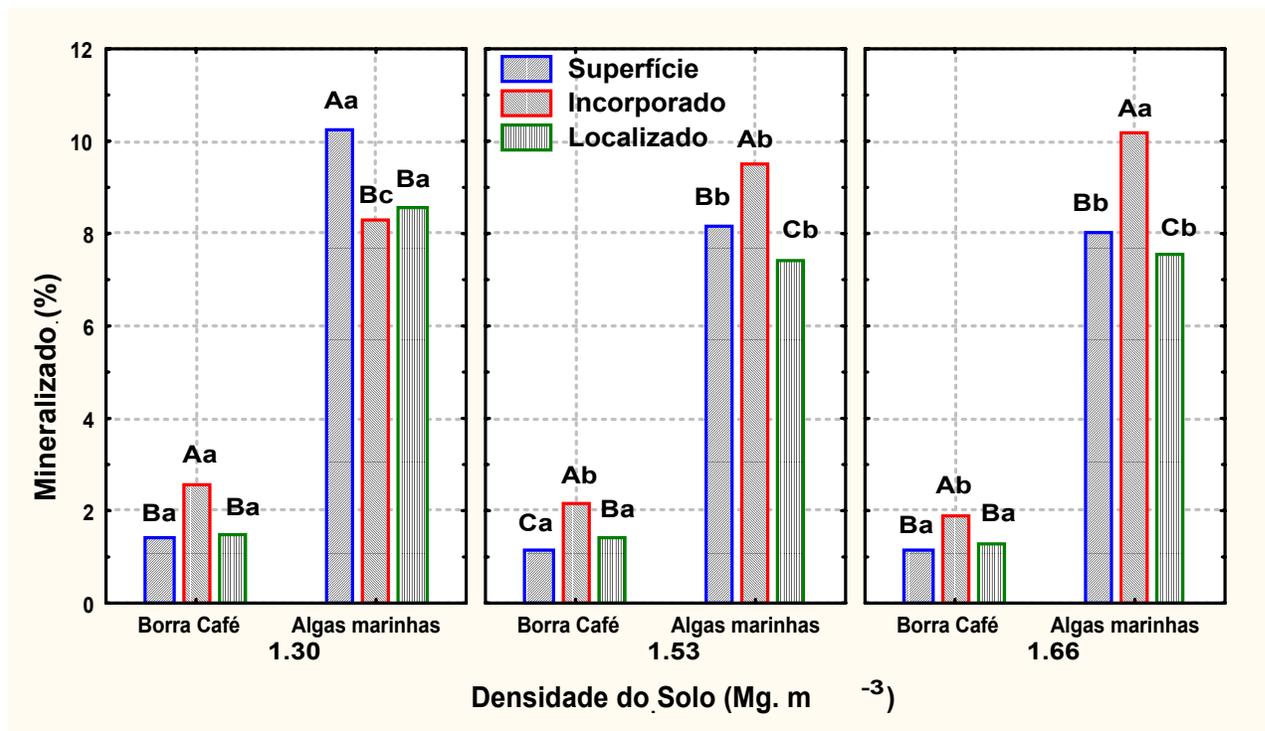


Figura 14- Mineralização da matéria orgânica do Neossolo flúvivo (franco-arenoso), em resposta a tipos (borra de café e algas marinhas) e modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes densidades do solo ($1,30$; $1,53$ e $1,66 \text{ Mg.m}^{-3}$). Letras maiúsculas comparam modos de aplicação dentro do mesmo resíduo, para a mesma densidade do solo. Letras minúsculas, comparam tratamentos com o mesmo resíduo para cada nível de densidade do solo, pelo Teste de Tukey (1%).

Com relação aos tratamentos com borra de café, no modo de aplicação em superfície e localizado, os valores se apresentaram estatisticamente iguais (1,28 - 1,49 %) nos três diferentes níveis de densidade do solo. Entretanto, para o modo de aplicação incorporado, houve decréscimos dos valores em função do aumento da densidade do solo. O maior valor encontrado foi 2,60 % para a aplicação incorporado na densidade $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$. As tendências acima informadas indicando decréscimo nas taxas de decomposição dos resíduos adicionados ao solo em função da compactação do solo, confirmam tendências igualmente encontradas nos trabalhos de NEILSON; PEPPER (1990) e FERREIRA (1997), cujos dados indicam que a respiração do solo foi reduzida em resposta ao aumento da densidade global do solo.

Experimento 3

De modo semelhante aos experimentos 1 e 2, houve aumentos significativos na liberação de C-CO₂, em resposta a adição isolada de algas marinhas e borra de café ao solo. Ressaltando que o solo foi submetido a diferentes conteúdos de água (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg^{-1}), mantido em uma mesma densidade global ($1,53 \text{ Mg.m}^{-3}$) e incubado em sistema fechado por 22 dias.

De modo geral, foi observado que a velocidade máxima de liberação do C-CO₂ do solo e o percentual de mineralização (da aplicação de borra de café e de algas marinhas) mostraram efeitos significativos da interação modos de aplicação versus conteúdos de água e resíduos versus conteúdos de água do solo.

Para a interação modos de aplicação versus conteúdos de água, a velocidade de liberação do C-CO₂ foi diminuída pelo aumento do conteúdo de água do solo nos modos de aplicação incorporado e localizado (Figura 15a). O maior valor encontrado foi estabelecido no conteúdo de água $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$, no modo de aplicação incorporado ($4,94 \text{ mg C-CO}_2 \text{ dia}^{-1}.\text{kg}^{-1}$). No modo de aplicação localizado, tendências semelhantes foram observadas, onde o valor mais elevado foi encontrado no conteúdo de água de $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($4,26 \text{ mg C-CO}_2 \text{ dia}^{-1}.\text{kg}^{-1}$). Para o

modo de aplicação em superfície, os valores encontrados não diferiram estatisticamente entre si ($2,95 - 3,22 \text{ mg C-CO}_2 \text{ dia}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), nos diferentes conteúdos de água estabelecidos (Figura 15a).

Sabe-se que o ambiente deve ter água suficiente para a máxima atividade microbiana. Entretanto, ALEXANDER (1977) comentou que alto conteúdo de água reduz a atividade microbiana, não como resultado da água em si, mas de forma indireta, por impedir o movimento de ar, levando conseqüentemente à redução do suprimento de O_2 . Assim, quando o aumento do conteúdo de água estimular a liberação de CO_2 , a água é limitante, e, se a água adicionada reduzir a taxa de transformação, então, nesse caso, passa a existir deficiência de O_2 . Fato também confirmado por FERREIRA; COLAÇO (1997).

A comparação dos modos de aplicação de matéria orgânica dentro de cada conteúdo de água do solo mostrou que o modo de aplicação incorporado foi significativamente superior ao localizado, quanto a liberação de C-CO_2 , para os níveis de $0,08$ e $0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$. Entretanto, esses tratamentos não se diferenciaram no nível de $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$. A liberação de C-CO_2 do solo associada a aplicação de matéria orgânica na superfície, foi significativamente inferior a liberação de C-CO_2 da aplicação localizada, em todos os conteúdos de água do solo testados.

Para a interação resíduos versus conteúdos de água, observou-se que a velocidade de liberação do C-CO_2 , para o tratamento com algas, foi diminuída pelo aumento do conteúdo de água do solo. O maior valor encontrado foi estabelecido no conteúdo de água de $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($5,77 \text{ mg C-CO}_2 \text{ dia}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) e o menor no conteúdo de água de $0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($5,01 \text{ mg C-CO}_2 \text{ dia}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). Para a borra de café, os valores encontrados não diferiram estatisticamente entre si, nos diferentes conteúdos de água testados (Figura 15b). Os tratamentos com o resíduo algas marinhas mostraram valores de velocidade máxima de liberação do C-CO_2 superiores aos valores encontrados para a borra de café dentro de cada conteúdo de água testados (Figura 15b).

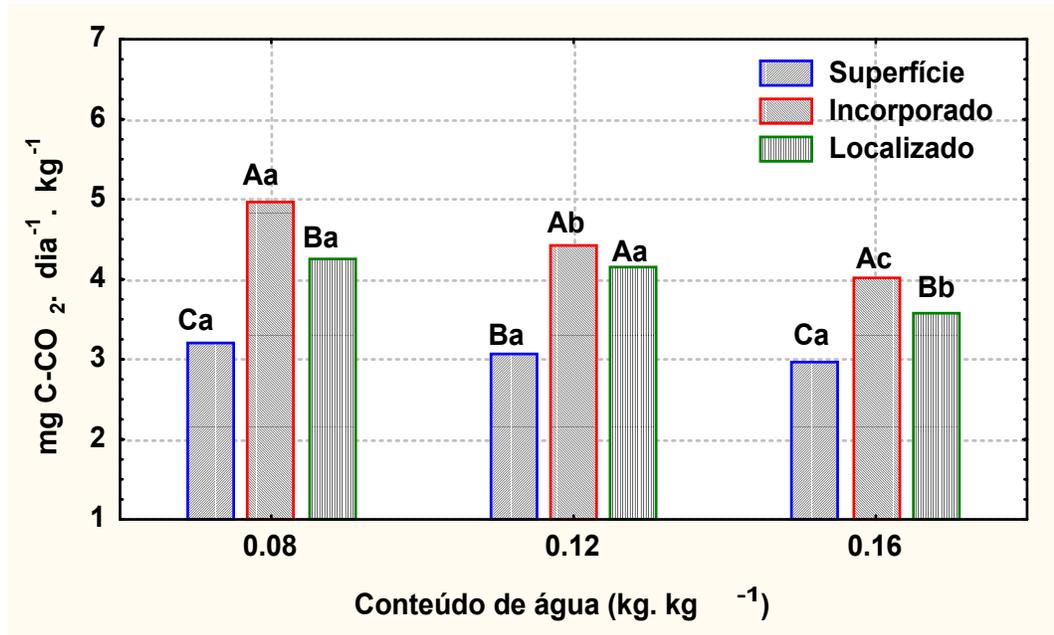
Para a interação modos de aplicação versus conteúdos de água, a percentagem de mineralização do C foi diminuída pelo aumento do conteúdo de água no solo nos modos de aplicação incorporado e superfície (Figura 16a). O maior valor encontrado foi estabelecido no conteúdo de água $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$, no modo de aplicação incorporado ($6,55\%$). No modo de

aplicação de superfície, tendências semelhantes foram observadas, onde o valor mais elevado foi encontrado no conteúdo de água de $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (4,57 %). Para o modo de aplicação localizado tendências opostas foram observadas (Figura 16a).

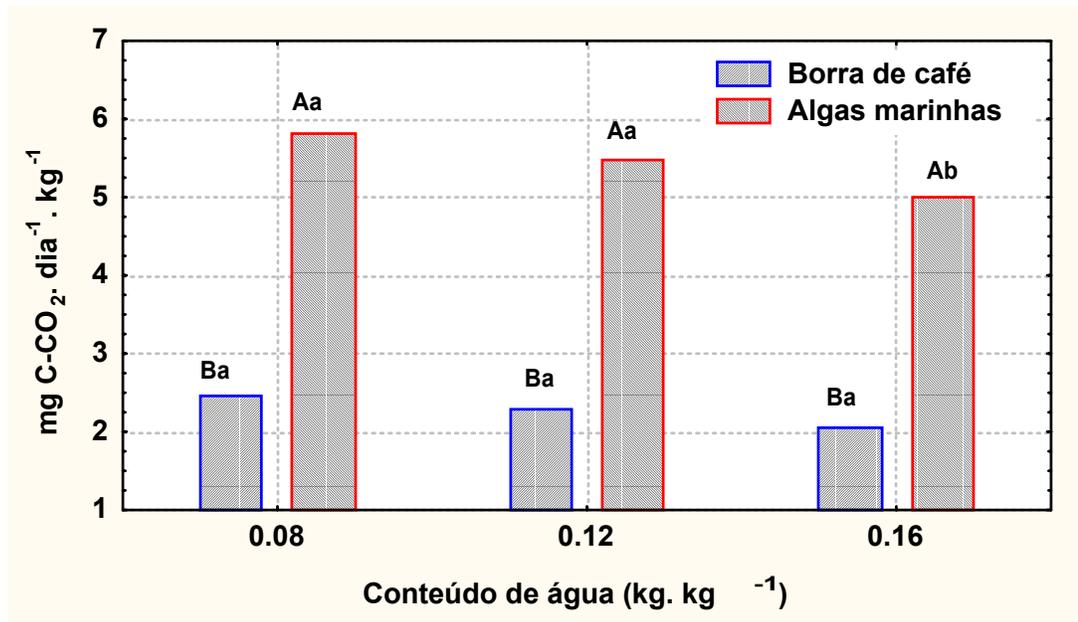
A comparação dos modos de aplicação de matéria orgânica dentro de cada conteúdo de água do solo mostra que o modo de aplicação incorporado foi significativamente superior ao de superfície, quanto a liberação de C-CO₂, para todos os níveis de conteúdos de água testados. Entretanto, o modo de aplicação localizado e incorporado não se diferenciaram para o conteúdo de água de $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$.

A liberação de C-CO₂ do solo associada a aplicação de matéria orgânica no modo localizado, foi significativamente superior a liberação de C-CO₂ da aplicação incorporada no conteúdo de água de $0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$. Para a interação resíduos versus conteúdos de água, observou-se que o percentual de mineralização de C para o tratamento com algas, foi diminuída pelo aumento do conteúdo de água do solo. O maior valor encontrado foi estabelecido no conteúdo de água de $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (9,44 %) e o menor no conteúdo de água de $0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ (8,18 %). Para a borra de café, os valores de percentagem de mineralização do carbono encontrados nos conteúdos de água de $0,08$ e $0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ não diferiram estatisticamente entre si (Figura 16b). A borra de café aplicada em solo com conteúdo de água de $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$ mostrou uma percentagem de mineralização de carbono inferior ao tratamento anteriormente mencionado. Os tratamentos com o resíduo M. S. de algas marinhas mostraram valores de percentagem de mineralização de C superiores aos valores encontrados para o emprego da borra de café dentro de cada conteúdo de água testados (Figura 16b).

Os valores mais baixos de liberação de C-CO₂ e dos percentuais de mineralização do C aplicado, estabelecidos no experimento, correspondem a 74% de saturação. Os valores mais altos de C-CO₂ foram encontrados no tratamento com algas (incorporado) no conteúdo de água de $0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$. Estes valores evidenciam que os níveis ótimos de aeração do solo foram encontrados em grau de saturação correspondente a 37%, o que corresponde ao nível mais baixo de conteúdo de água ($0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$).

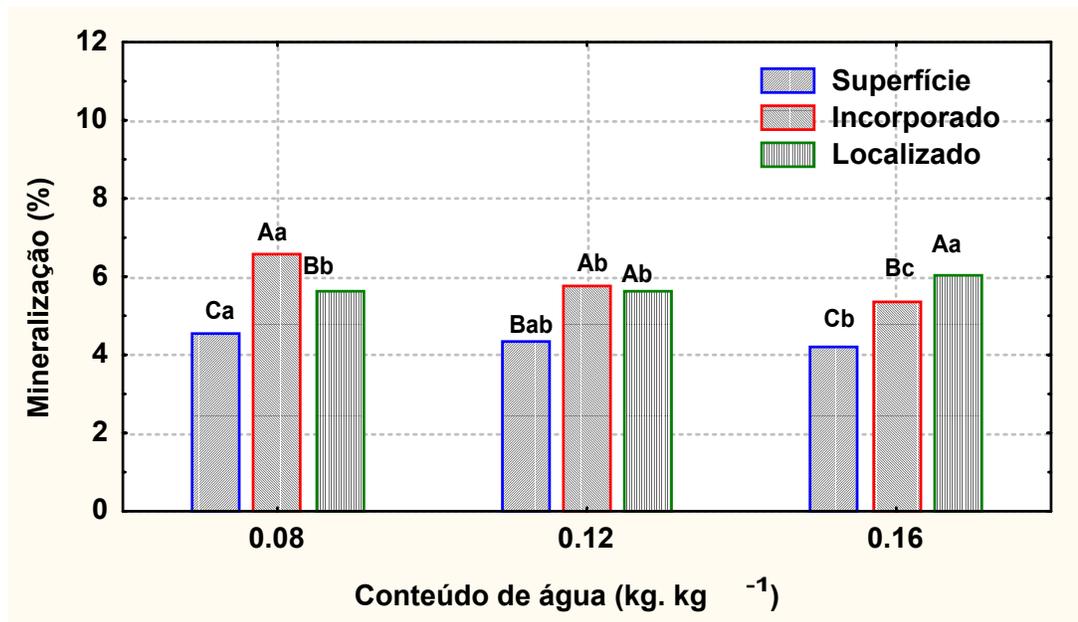


a)

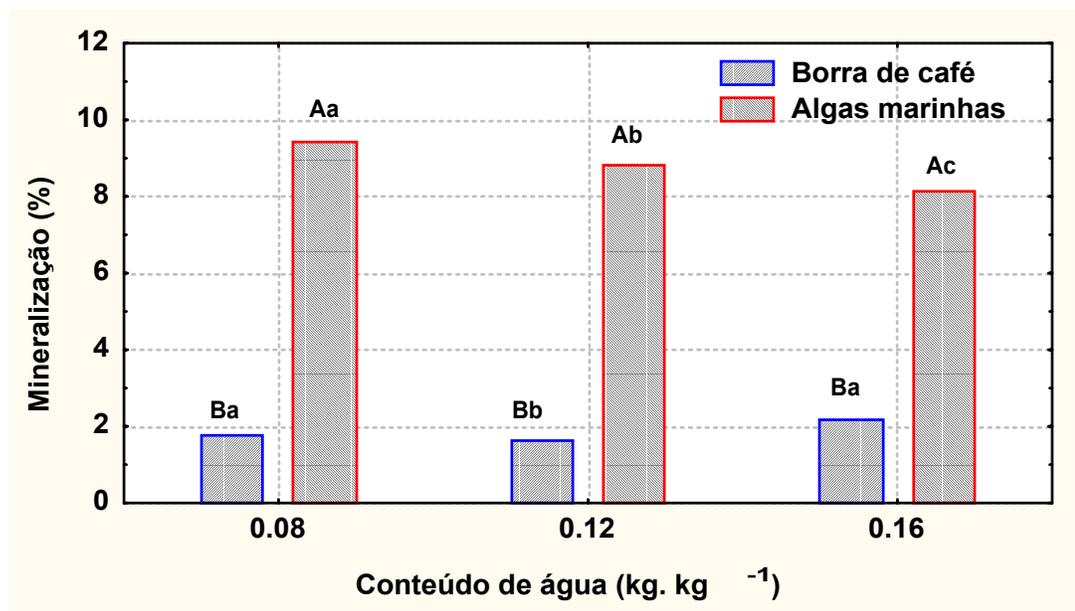


b)

Figura 15 Velocidade máxima de liberação do C-CO₂ de um Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta: a) tipos (borra de café e algas marinhas) e b) modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes conteúdos de água do solo (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg⁻¹). Letra maiúscula, compara tratamentos dentro de cada nível de conteúdo de água do solo. Letra minúscula compara modos de aplicação (tipo de matéria orgânica) em diferentes níveis de conteúdo de água no solo. Ambos pelo Teste de Tukey (p<0.01).



a)



b)

Figura 16- Mineralização da matéria orgânica no Neossolo flúvico (franco-arenoso), em resposta: a) tipos (borra de café e algas marinhas) e b) modos de aplicação (incorporado, localizado e superfície) de matéria orgânica, em diferentes conteúdos de água do solo (0,08; 0,12 e 0,16 kg.kg^{-1}). Letra maiúscula, compara tratamentos dentro de cada nível de conteúdo de água do solo. Letra minúscula compara modos de aplicação (tipo de matéria orgânica) em diferentes níveis de conteúdo de água no solo. Ambos pelo Teste de Tukey ($p < 0.01$).

EXPERIMENTO I

EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

EFEITO DA COMPACTAÇÃO E ADUBAÇÃO ORGANOMINERAL DE UM NEOSSOLO FLUVICO NO DESENVOLVIMENTO DO CAUPI

Houve redução significativa nos parâmetros avaliados da planta, como altura de planta (AP), massa seca dos nódulos (MSN) e massa seca da parte aérea (MSPA), em resposta ao aumento da densidade do solo (Figura 17).

SILVA; ROSOLEM (2001) comentam ser controverso o efeito da compactação sobre a produção de massa da parte aérea das plantas. Conforme MASLE; PASSIOURA (1978) e a produção de MSPA está negativamente associada à resistência do solo, o que, provavelmente decorre do deficiente suprimento de nutrientes e, ou, água. Assim, numa condição de vaso, não faltando água e nutrientes, não seria esperado efeito da compactação na produção de MSPA. Por outro lado, MASLE; FARQUHAR (1988) relacionam o efeito da compactação com o fato de que o carbono fixado disponível para o crescimento da parte aérea, pode ser limitado, uma vez que a demanda das raízes é alta, pois mais carboidratos são necessários para o crescimento de raízes em solos compactados. Além disso, a quantidade necessária para sintetizar o mesmo comprimento de raízes é muito maior quando a raiz encontra resistência ao crescimento.

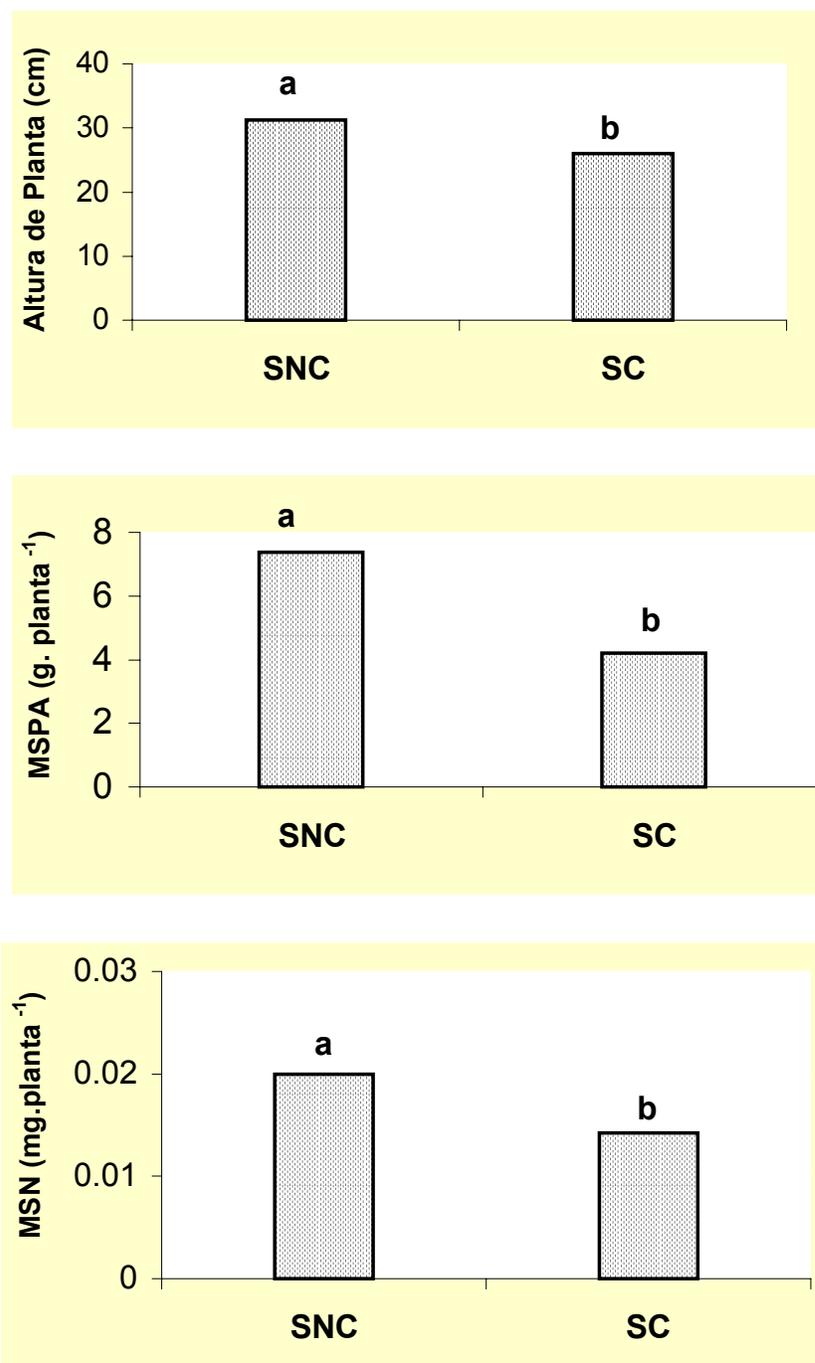


Figura 17- Altura de planta (a), massa seca da parte aérea (b) e massa seca de nódulos (c) do feijão caupi - IPA 206, aos 60 dias de cultivo em um Neossolo flúvico (SNC -solo não compactado; SC - solo compactado).

De acordo com BROWN; SCOTT (1984), existe um equilíbrio funcional entre o crescimento das raízes e da copa, um interferindo no outro. Assim, para isolar-se o efeito direto da compactação no crescimento da parte aérea, é necessário que ele seja avaliado antes da ocorrência do efeito secundário, causado pelo menor crescimento radicular. No presente caso, provavelmente as reduções observadas na produção de massa seca da parte aérea foram um efeito secundário, causado pelo menor crescimento radicular (Figura 17).

O comprimento das raízes (CR) foi outro parâmetro que se apresentou significativamente afetado com o aumento da densidade do solo, apresentando valor médio, na ausência da compactação, de 23,12 cm, e no solo artificialmente compactado de 16,27 cm. Os valores médios obtidos confirmam relatos de outros autores de que, tanto em condições de vaso (ROSOLEM et al., 1994; SILVA; ROSOLEM, 2001 e MULLER et al., 2001) como no campo (IIJIMA; KONO, 1991), as raízes têm dificuldade em se desenvolver verticalmente nas camadas de solos compactadas.

A análise estatística indicou que houve efeito significativo para os adubos: esterco, NPK, organomineral-1 e organomineral-2, considerando os parâmetros avaliados da planta, como altura de planta, massa seca dos nódulos e produção de massa seca da parte aérea (Figura 18). Houve de modo geral, resposta diferenciada ao uso da adubação, e uma tendência da mistura organomineral -2 em apresentar melhores resultados que os demais. A boa resposta conseguida com o organomineral-2 pode ser atribuída às características químicas do material (Figura 18). Isto demonstra o efeito benéfico da associação de material orgânico com mineral no desenvolvimento do feijão caupi, confirmando as observações de KIEHL (1993), segundo o qual a adubação orgânica quando misturada com a mineral funciona como seu condicionador, aumentando sua eficiência em fornecer nutrientes aos vegetais.

Não foi observado efeito significativo para a interação adubo versus compactação em relação às variáveis analisadas, indicando que o efeito da adição dos fertilizantes, independe do estado de compactação do solo (Figura 19). O adubo organomineral- 2 adicionado ao solo sem compactação apresentou os valores mais elevados de altura de planta e produção de massa seca da parte aérea (39,3 cm e 11,45 g, respectivamente). Os menores valores encontrados relativos foram estabelecidos nos tratamentos em que o solo se encontrava compactado, sem nenhum tipo de material adicionado (18,8 cm e 1,40 g, respectivamente).

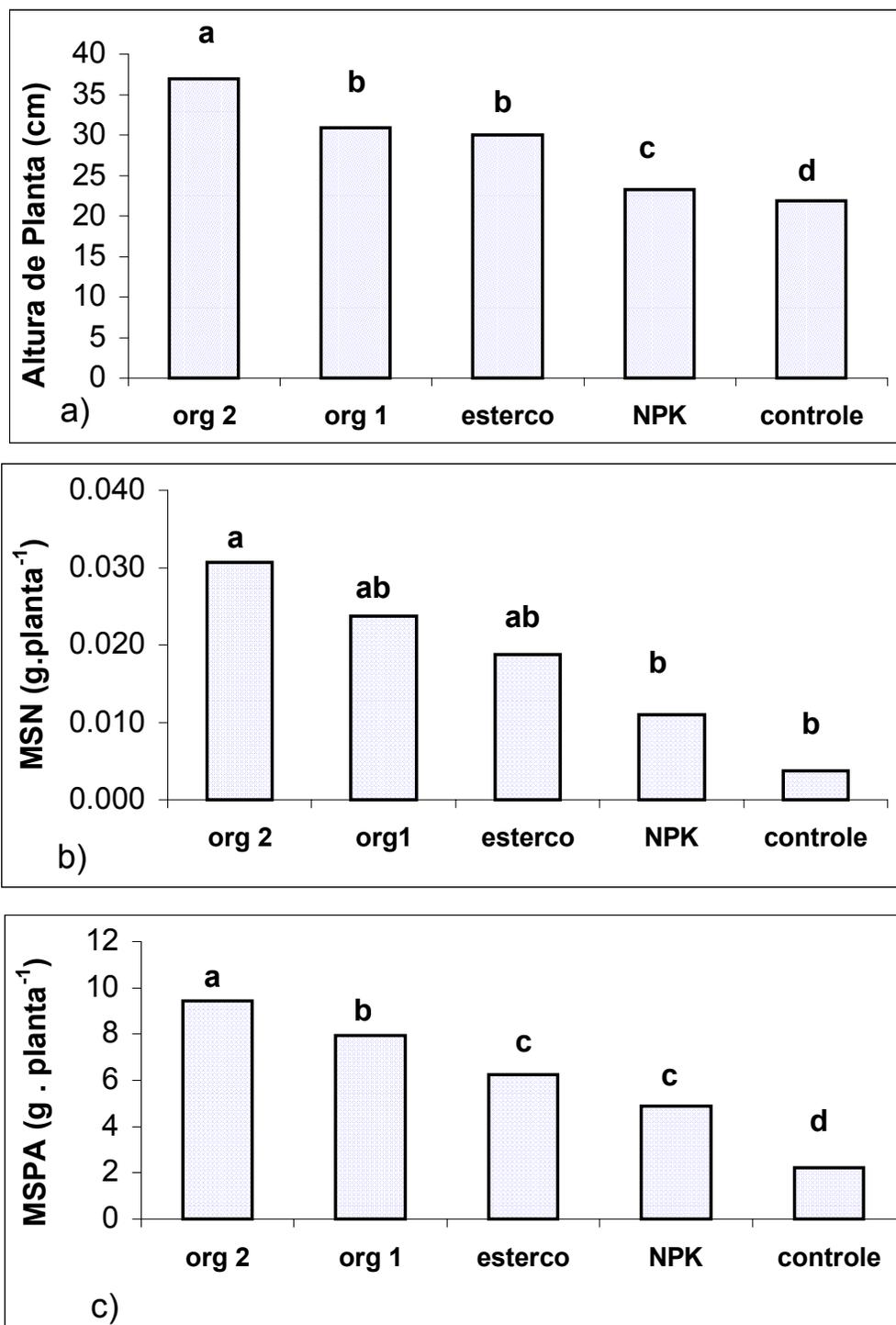


Figura 18 - Efeito da adubação em um Neossolo flúvico cultivado com feijão caupi - IPA 206. Altura de planta (a), massa seca dos nódulos (b) e massa seca parte aérea (c). Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

A indicação de efeito significativo para a interação adubo versus solo, para o comprimento da raiz (CR) do caupi, permitiu que se testasse as médias dos adubos na presença e ausência da compactação (Figura 19).

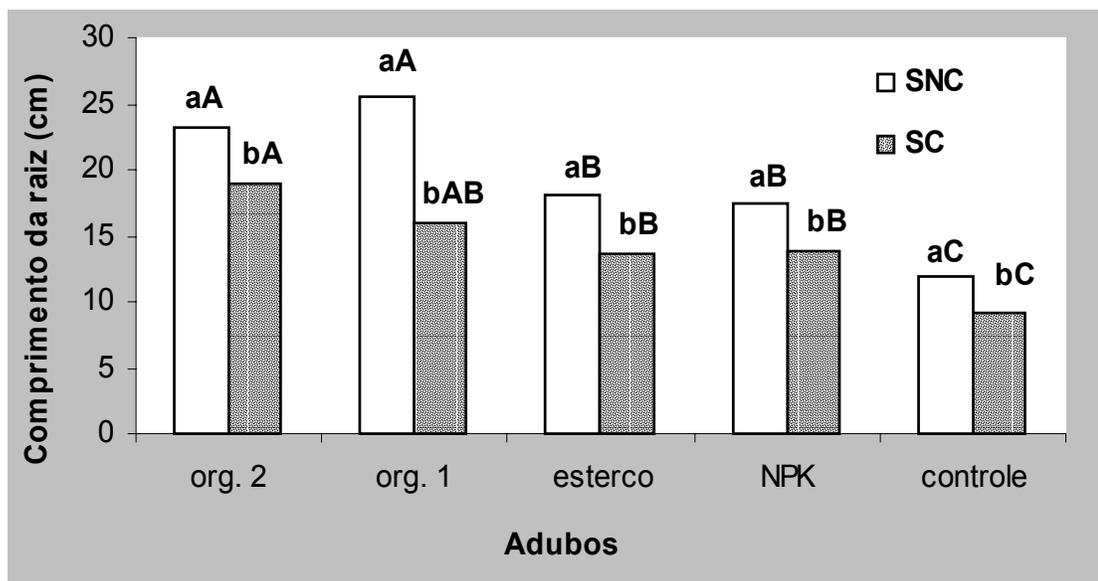


Figura 19 – Efeito da adição de organomineral 2, organomineral 1, esterco e NPK, em solo Neossolo flúvico, compactado (SC - 1,60 Mg. m⁻³) e não compactado (SNC - 1,30 Mg.m⁻³), sob o comprimento de raízes do feijão caupi. Letras maiúsculas comparam materiais adicionados para uma mesma densidade. Letras minúsculas comparam as densidades para um mesmo adubo. Ambos pelo teste de Tukey a (5%).

Para a condição de solo não compactado os adubos organominerais 1 e 2 apresentaram os valores, mais elevados (25,6 e 23,2 cm respectivamente) não diferindo estatisticamente entre si, seguindo-se o esterco e o NPK (18,0 e 17,4 cm, respectivamente) que também não apresentaram diferença. Para a condição de solo compactado, os adubos organominerais 2 e 1 apresentaram os maiores valores (19,0 e 15,8 cm, respectivamente), não sendo estatisticamente diferentes. O organomineral 2 diferiu significativamente do esterco e do NPK (13,7 e 13,7 cm, respectivamente), que não mostraram diferença estatística entre si (Figura 19). Para a mesma condição, os valores encontrados para o organomineral 1, esterco e NPK não apresentaram diferença estatística entre si.

No presente experimento, buscou-se avaliar ainda, a capacidade de retenção de água do solo (CRA) adicionado dos diferentes materiais em estudo. Na figura 20 encontram-

se as curvas de retenção de água de um Neossolo flúvico (franco-arenoso) (compactado e não compactado) ajustadas pela equação de VAN GENUCHTEN (1980).

Contrariamente ao esperado, não houve acréscimo significativo quanto ao conteúdo de água absorvido na saturação para o solo compactado ($1,60 \text{ Mg. m}^{-3}$) e com a adição dos adubos, em relação ao tratamento compactado ($1,60 \text{ Mg.m}^{-3}$) e sem adubação (Figura 20). Entretanto, entre os resultados obtidos o esterco apresentou o maior conteúdo de água na saturação ($0,3709 \text{ cm. cm}^{-3}$), seguido do organomineral 1 ($0,3656 \text{ cm. cm}^{-3}$), e logo após o organomineral - 2 ($0,3592 \text{ cm. cm}^{-3}$). O valor obtido no tratamento testemunha (solo compactado - $1,60 \text{ Mg.m}^{-3}$ e sem adição de material) correspondeu a $0,3625 \text{ cm. cm}^{-3}$.

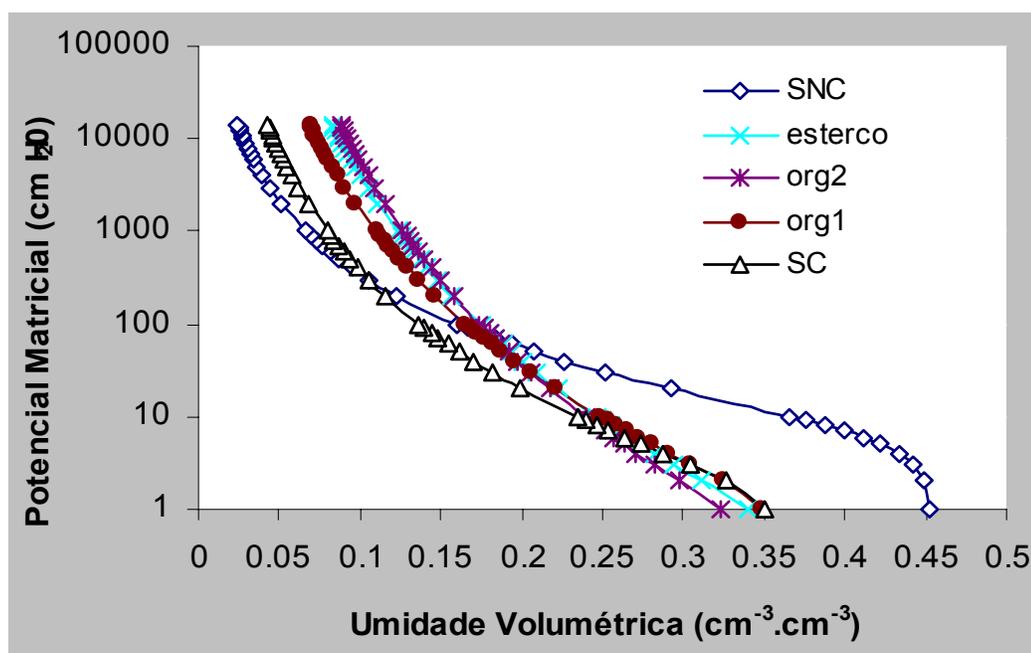


Figura 20 – Curvas de retenção de água do solo Neossolo flúvico, solo não compactado (SNC - $1,30 \text{ Mg. m}^{-3}$), solo compactado com adição isolada dos materiais: esterco, organomineral 2 e organomineral 1, solo compactado (SC - $1,60 \text{ Mg.m}^{-3}$) sem material.

KIEHL (1993), comenta que, de modo geral, nos fertilizantes organominerais a massa orgânica funciona como condicionadora dos fertilizantes minerais, por possuir, entre outras propriedades, elevada retenção de água. A capacidade da massa orgânica em reter água (CRA) por absorção está ligada a quantidade do colóide húmus que ela contém. A

massa orgânica crua tem em média 80% da capacidade de retenção (CRA); à medida que se processa sua decomposição, vão se formando colóides húmicos cujas micelas tem elevada CRA (KIEHL, 1993). Como exemplo, podemos citar a turfa brasileira, que bem decomposta chega a absorver de 300 a 700% de água, isto é, um quilograma de turfa pode reter de 3 a 7 quilogramas de água.

De acordo com ALLISON (1999), a propriedade do húmus de absorver água em elevadas proporções, dez vezes mais do que o solo argiloso é importante, pois, garante a solubilidade dos nutrientes do fertilizante mineral contido no organomineral. Considerando ainda, que o fertilizante mineral contendo NPK só é assimilado pelas raízes quando em solução, verifica-se a importância da elevada capacidade de retenção de água da fração orgânica, dissolvendo os sais do adubo mineral e favorecendo a assimilação pela planta (KIEHL, 1993).

No gráfico da figura 20, é possível observar o efeito do aumento da compactação na capacidade de retenção de água pelo solo, sugerindo tendências igualmente encontradas por HILLEL (1980), com as curvas tornando-se idênticas sob condição de alta sucção.

Como propõe HILLEL (1980), o exame das curvas de retenção de água pelo solo na literatura, mostra que a degradação física do solo (compactação) induz a mudança na forma da curva (DERTER, 2004). Isto pode ser visto especialmente, no valor do conteúdo de água na saturação, θ_{sat} , que torna-se menor em solos compactados. DERTER (2004) usando equações de pedotransferências sugere um novo parâmetro como indicador da qualidade estrutural do solo. Segundo o autor, a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão (**S**) é uma medida da microporosidade do solo e pode ser usada como um índice da qualidade física do solo. As curvas obtidas proporcionaram valores de **S** maiores que o índice 0,02 proposto por DEXTER como sendo o índice abaixo do qual o solo apresentaria condição de qualidade considerada pobre ou degradado.

EXPERIMENTO II

EXPERIMENTO EM CONDIÇÃO DE CASA DE VEGETAÇÃO

EFEITO DA COMPACTAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DO CAUPI [*Vigna unguiculata*, (L) Walp], E DE PLANTAS PROVINIENTES DE SEMENTES IRRADIADAS

Na tabela 4 encontram-se os resultados obtidos no estudo do efeito da compactação do solo e de doses crescentes de radiação gama no desenvolvimento do feijão caupi [*Vigna unguiculata*, (L) Walp], variedade IPA-206. Observar-se que houve redução significativa para a altura de planta (AP), diâmetro do caule e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) do caupi, em resposta ao aumento da densidade global do solo ($1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ - solo não compactado e $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$ - solo compactado).

Para a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) o maior valor encontrado (12,05 g) que correspondeu ao tratamento controle (0 Gy). Entretanto, apesar dos valores encontrados nas doses de 100 Gy, 200 Gy e 300 Gy, indicarem tendência de decréscimo, esses decréscimo não foram significativamente diferentes entre si. Também, não houve efeito significativo, para o tratamento com radiação, em relação ao diâmetro do caule (Tabela 4).

Tabela 4 – Matéria seca da parte aérea e diâmetro de caule do feijão do caupi, em diferentes doses de radiação gama, cultivado em um Neossolo flúvico, na presença e ausência de compactação.

SOLO	MATERIA SECA DA PARTE AÉREA	
	(g)	DIÂMETRO CAULE (cm)
SNC	11,21a	0,56a
SC	9,78b	0,51b
DOSE (Gy)		
0	12,05a	0,55a
100	10,59b	0,53a
200	9,74b	0,54a
300	9,59b	0,51a
Média	10,49	0,53
C.V.(%)	7,11	7,28

Médias de três plantas por latão. SNC - solo não compactado, SC-solo compactado. Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

A presença de efeito significativo para a interação compactação versus dose de radiação gama para a altura de planta, possibilitou que se comparasse o efeito das doses de radiação na presença e ausência da compactação (Figura 21). Para o solo não compactado (SNC), a análise de regressão revelou um comportamento linear decrescente, indicando um coeficiente de determinação de 0,91 ($p < 0,05$). Para o solo compactado (SC) não houve efeito significativo. Permitindo concluir que para o solo não compactado (SNC) o aumento da dose de radiação gama

causou redução na altura de planta do caupi, o que era desejado. O mesmo não pode ser observado para o solo compactado (SC), apesar dos dados indicarem uma tendência de decréscimo na altura de planta com o aumento da dose de radiação gama (Figura 21).

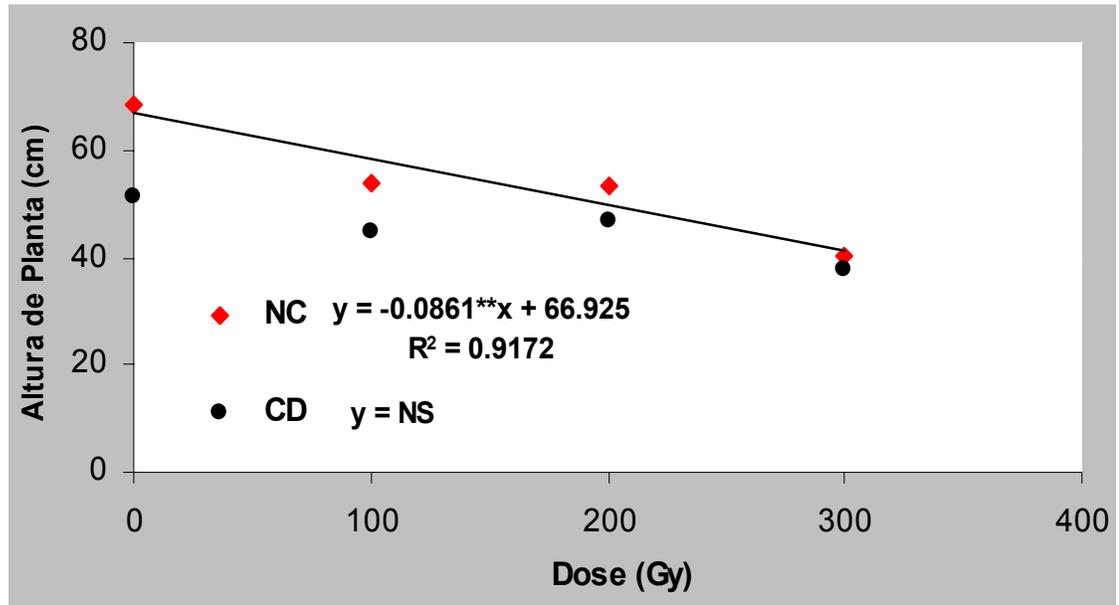


Figura 21 Efeito de doses crescentes de radiação γ (Cobalto-60) na altura de planta do caupi, estando o solo compactado - $1,70\text{Mg.m}^{-3}$ e não compactado - $1,30\text{ Mg.m}^{-3}$, aos 60 dias após a semeadura.

Observar-se ainda, que a diferença na altura de planta encontrada entre os tratamentos sem radiação (0 Gy), para o solo não compactado (68,65 cm) e solo compactado (51,11 cm), foi diminuída nas doses de 100 Gy e 200 Gy, de modo que no maior nível de radiação (300 Gy), não houve diferença estatística significativa entre o solo compactado e não compactado. Pode-se aceitar que a radiação teve efeito atenuante sobre a compactação do solo, nas faixas de doses consideradas, com reflexo sobre a altura de planta do caupi.

Não houve efeito significativo para a interação compactação versus doses de radiação gama para a matéria seca da parte aérea do caupi, indicando que apesar da MSPA decrescer com o aumento da dose de radiação e com o aumento da densidade do solo, o decréscimo obtido com o aumento da dose de radiação não foi significativamente afetado pela compactação do solo.

Na figura 22, estão as curvas de curvas de retenção de água do solo (Figura 22) obtidas nas respectivas densidades trabalhadas ($1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ e $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$). De acordo com HILLEL (1980), a forma da curva característica de retenção de água do solo, é afetada pela estrutura do solo. Quanto mais compactado, tanto menor será a porosidade total.

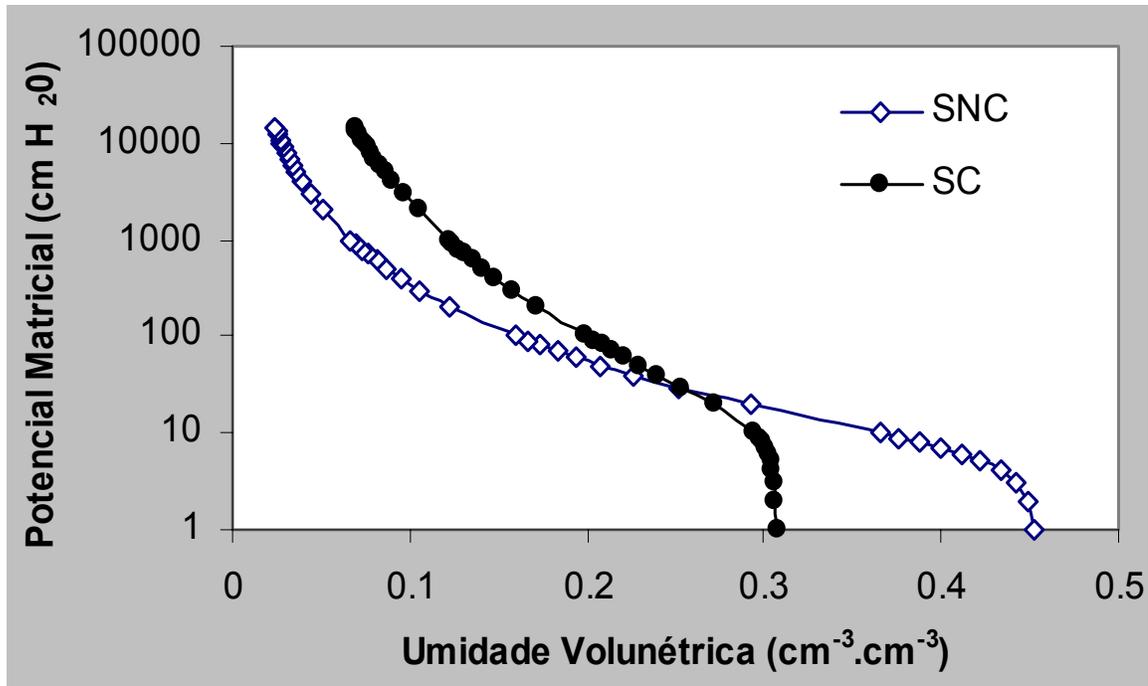


Figura 22 Curva característica de retenção de água do solo Neossolo flúvico, não compactado (SNC - $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$) e compactado (SC-, $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$).

Os valores encontrados para a porosidade total do solo nas densidades referidas ($1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ e $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$) correspondem a 49% e 34% respectivamente. Isso significa que o conteúdo de água do solo em estudo foi reduzido pelo aumento da densidade global do solo.

Os valores obtidos com relação à resistência mecânica do solo à penetração e que foram obtidos em percentual de água correspondente a 75% da capacidade de campo (C.C.) do solo, aumentaram com o aumento da densidade do solo, sendo os valores médios encontrados de 0,12 MPa para a densidade de $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ e de 1,32 MPa para a densidade de $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$.

5 CONCLUSÕES

EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

A adição de algas marinhas ao solo ocasionou uma maior liberação de C-CO₂ e do percentual de mineralização do C, em relação aos valores obtidos com a adição da borra de café. A liberação de C - CO₂ do solo e o percentual de mineralização do C, mostraram-se influenciados pelos modos de aplicação (incorporado, superfície e localizado) da borra de café e das algas marinhas ao solo.

A compactação do solo afetou negativamente o rendimento de C-CO₂ e a percentagem de mineralização do C, quando as algas marinhas foram aplicadas na superfície das amostras de solo, no modo localizado. No modo de aplicação incorporado, a compactação mostrou efeito positivo.

O aumento do conteúdo de água do solo influenciou negativamente o desempenho da liberação de C-CO₂ e percentual de mineralização do C, induzidos pela adição de algas marinhas ao solo. Os níveis ótimos de aeração do solo foram encontrados em grau de saturação correspondente a 37%, o que correspondeu ao nível mais baixo de conteúdo de água (0,08kg.kg⁻¹).

EXPERIMENTO EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO I

A altura de planta, produção de massa seca da parte aérea e o comprimento das raízes do caupi foram diminuídos pelo aumento da densidade do solo. A incorporação de materiais orgânicos e organominerais no Neossolo flúvico compactado artificialmente, influenciou significativamente a altura de planta, bem como a produção de massa seca da parte aérea e o comprimento do sistema radicular, sugerindo que esses materiais quando adicionados ao solo, podem atuar de forma benéfica para a cultura. De um modo geral, a mistura organomineral 2 apresentou o melhor desempenho.

A capacidade de absorção de água pelo solo foi reduzida pelo aumento da densidade global do solo. Entretanto, não foi observado aumento significativo na capacidade de retenção de água, quando da adição dos materiais ao solo.

EXPERIMENTO EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO II

A altura de planta e a produção de matéria seca da parte aérea do caupi foram reduzidas em resposta ao aumento da densidade global do solo, bem como ao aumento da dose de radiação gama. A radiação teve efeito atenuante sobre a compactação do solo, nas faixas de doses consideradas, com reflexo sobre a altura de planta do caupi.

A resistência à penetração do solo foi aumentada pelo aumento da densidade do solo alcançando um valor médio de 1,32 MPa, considerado restritivo mas não impeditivo ao crescimento radicular. A capacidade de retenção de água do solo foi diminuída em resposta ao aumento da compactação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. **Soil & Till. Res.**, v. 47. p. 83-89, 1998.

ALBUQUERQUE, M. A; MALUF, J. L. LOURES, E. M.; SCHAEFER, C. E. E. Efeitos da incorporação de diferentes resíduos vegetais sobre atributos químicos e biológicos de um LVm. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p. 2348-2349.

ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. 2 ed. New York: John Wiley, 467p. 1977.

ALLISON, F. E. Soil organic matter and its role in crop production. Ney York : Elsevier Scientific, 1973. 637p.

ALMEIDA, E. C.; SANTOS, G. M. M.; MORENO, M. S.; SANTANA, J. R. F.; OLIVEIRA, L.M.; SMITH, M. R. B.; CARVALHO, P. C. L.; DOREA, R. A. Comportamento da camada compactada em um Latossolo Amarelo álico coeso sob três sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1926 - 1927, 1995.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M. ; MOURA FILHO & REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, p.319-326, 1996.

ARAÚJO, J.P.; RIOS, G.P.; WATT, E.E.; NEVES, B.P.; FAGERIA, N.K.; OLIVEIRA, I.P.; GUIMARÃES, C. M.; SILVEIRA FILHO, A. Cultura do caupi, [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]: Descrição e recomendações técnicas de cultivo. Goiânia: EMBRAPA, CNPAF, Circular técnica, 18). p. 52-56. , 1984 .

ARCHER, S.R.; SMITH, P.D. Relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soil. **Journal of Soil Science**, Edinburgh, v.23, n.4, p.475-480, Dec. 1972.

BACHHI, O. S. B. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (*Sccharum spp*). Piracicaba, SP,1976. Dissertação de mestrado, CENA/ ESALQ, 65p. 1976.

BAKKEN, L. R., BORRESSENT, T. ; NOIJ, A. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum L*). **J. Soil Science**, v. 38, p. 541-52, 1987.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo. Maole, 30p., 1990.

BARRETO , P. D.; DYNIA, J. F. Sistemas de produção de caupi em monocultura no trópico semi-árido brasileiro. In: ARAÚJO, J.P.P.; WATT, E. E. (Orgs.). **O caupi no Brasil**. Brasília: IITA/ EMBRAPA. p.387-404, 1988.

BAVER, L.D.; GARDNER, W. R; GARDNER, W.R. **Soil Physics**. 9th ed. New York, John Wiley, 492p. 1972.

BELTRAME, L. D.; GONDIM, L. A . P.; TAYLOR, J. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 3, p. 145-149. 1981.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **J. Soil Sci.**, London, v. 41: p. 341-358, 1990.

BERNAL, M. P. SANCHEZ-MONEDERO, M. A . PAREDES, C., ROIG, A ., Carbon mineralization from organic wastes at different composting stage during their incubation with soil. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v.69, 175-189, 1998.

BOLLER, W.; CALDATO, D. E. Desenvolvimento da cultura do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em diferentes condições de cobertura e de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.2, p. 167-173, mai. 2001.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F. ; CORREIA, G. F. ; COSTA, L. M. Mistura de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um Latossolo com compactação simulada. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 21, p. 125-130, 1997.

BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F. REGAZZI, A. J.; FERNANDES, B. BARROS, N. F. Respostas de variedades de soja a compactação de camadas de solo. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 35: p. 553-568. 1988.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical. **American Society of Agronomy**, Madison, p. 463-478. 1986.

BRADY, N. C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo. 7 ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 898p., 1989.

BRODER, M. W.; WAGNER, G. H. Micribial colonization and decomposition of corn, wheat, and soybeans residue. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 52:112:117, 1988.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculation from size distribution data. **Trans. AIME**, p. 71-78, 1953.

CAMARGO, O. A. Aeração. In: GROHMANN, F. **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, p. 85-89, 1975.

CINTRA, L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 7, p.197: 201, 1983.

COELHO, M. B.; MATEOS, L.; VILLALOBOS, F. J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. **Soil & Tillage Res.**, v.57, p. 129-142, 2000.

CONLIN, T. S. S.; VAN DEN DRIESSCHE, K. Response of soil CO₂ and O₂ concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in Central British. Disponível em: <<http://www.nrc.ca/aic-journals/> v. 31, n 1, jan/fev 2000>. Acesso em : 20 de Abr. 2002.

DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Plant Mol. Biol.**, v. 42, p. 55-76, 1991.

DEDECK, R. A . A dinâmica dos solos em áreas degradadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1992, Curitiba. **Anais...Curitiba: FUPEF.** p.44-57. 1992.

DEXTER, A . R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Till. Res.**, v. 11, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A . R. Soil physical quality Parte I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma.** v. 120, p.201-214, 2004.

DIAS JÚNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras. 1990. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, RIO DE JANEIRO. **Resumos...** RIO DE JANEIRO: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1CD-ROM.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 20, p.175-182, 1996.

DOBEREINER, J. O nitrogênio na agricultura brasileira. In: Simpósio Brasileiro sobre Nitrogênio em Plantas, **Anais...** Itaguaí, Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal, p. 3-26, 1990.

FERREIRA, E. B. Efeitos da compactação, conteúdo de água e fontes de carbono e nitrogênio, na aeração do solo. Dissertação de Mestrado - UFPE/DEN, n.80, p.75,1997.

FERREIRA, E. B., COLACO, W. Avaliação da respiração do solo e do grau de saturação do solo como índices de aeração do solo. In SANTA MARIA: CONGRESSO BRASILEIRO DE FERTIDADE E BIODINÂMICA DO SOLO - FERTBIO2000, 2000, SANTA MARIA, RS. **Anais...** SANTA MARIA: UFSM. v.1. p.185-185, 2000.

FERREIRA, E. B.; COLAÇO, W.; CARNEIRO, C. J. G. Utilização potencial das algas marinhas como condicionadores na retenção de água nos solos. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, **Anais...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p. 567-567, 1993.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic Ochraqulf in Northwest Ohio. **Soil & Till. Res.**, v. 48, p. 21-35, 1998.

GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; THERIAUL, R. A review of subsoil compaction and crop response. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, 1., 1985, Ausburn, Australia. USDA-ARS, v.5, p. 970-978, 1985.

GENT JR.; BELLORD, R.; HASSAN, A. E.; CASSEL, D. K. Impact of preparation on physical properties of soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 48, p. 173-177, 1984.

GENTOS, T.A.; LELLIS, T.H. Effects of soil compaction, water and organic matter contents on emergence and initial plant growth of cotton and sugar beet. **J. Agric. Eng. Res.**, v. 66, p. 121-134, 1997.

GILL, W. R.; REAVES, C. A. . Compaction patterns of smooth rubber tires. **Agr. Eng.**, v. 37, p. 677 - 680, 1956.

GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. **Advance in Agronomy**, v. 18, p. 57- 106, 1966.

GROHMANN, F. & QUEIROZ NETTO, J.P. Efeito da compactação de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz. In: *Elementos de pedologia*. Rio de Janeiro, 1975, Livros Técnicos e Científicos, 1975. p.92-98.

GROHMANN, F. Porosidade. In: **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975. p.80-84.

GROHMANN, F. QUEIROZ NETTO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de algodão. **Bragantia**, v. 25, p. 421-432, 1966.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Adv. Soil Sci.** London, v. 6, p. 65-100, 1987.

HÅKANSSON, I.; VAN OUWERKERK, C. SOANE, B. D. Conclusions of the ISTRO WORKSHOP on “ The effects soil compaction on physical, chemical and biological factors in the environment” 25 August 1993, Melitopol, Ukraine. **Soil & Till Res.**, v. 35, p. 11-113, 1995.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Till. Res**, v. 16, p. 105-120, 1990.

HÅKANSSON, I.; VOORHEERS, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Res.**, v. 11, p. 230-282, 1988.

HANSEN, J. W. Is an agricultural sustainability a useful concept? **Agricultural Systems**, v. 50, p. 117-143, 1996.

HANSEN, S. Effects of manure treatment and soil compaction on plant production of a dairy farm system converting to organic farming practice. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 1996.

HILL, J. N. S.; SUMNER, M. E. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. **Soil Science**, v. 103, n. 4, p. 234-238, 1966.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York, Academic Press, p. 341-378, 1990.

IJIMA, M.; KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **J. Crop Sci.**, Jap, v. 60, p.130- 138, 1991.

ISHAQ, M.; IBRAHIM, A. HASSAN, A. SAEED, M.; LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil & Till Res.**, v. 60, p. 153- 161, 2001.

JAMISSON, V. C.; H; WEAVER, A ; REED, I. F. The distributions of tractor tire compaction effects in Cecil clay. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 15, p. 34-37, 1951.

JORAJURIA, D. A; DRAGHI, L. Sobre compactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, v. 4, n.3, p. 445-452, Campina Grande, PB, DEAg /UFPB, 2000.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 7 ed. São Paulo, Nobel, 1988. 408p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**., Jaboticabal, v. 18, n.2, p. 45-54, dez. 1998.

KLUTE, A . Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A . (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, Madison, p. 635-660, 1986.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999a.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 497-506, 1999b.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water Relations of Plants and Soils**. Academic Press, California, 495p., 1983.

KUTILEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology**. Cremlingen-Dested, Catena Verlag, 360p.,1994.

LAL, R. Trend in world use: potential and constrains. In: LAL , R.; STEWART, B. Ed. Soil management, experiment basis for sustainability, Boca Raton: CRC Press, p.1 – 8, 1995.

LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLET, R. F. Pedospheric processs and the carbon cycle. **Soil processes and the carbon cycle**., Boca Raton, CRC Press, p.1 – 8, 1988.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 450-457, 1980.

LETEY, J. Relations between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, v.1: p. 277 – 294, 1985.

LINN, D. M.; DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 48:1267-1984.

MANTOVANI, E. C. Compactação do Solo. **Inf. Agropec.** Belo Horizonte, v. 13, n. 147, 1987.

MARSHALL, T. J.; HOLMES J. W. **Soil physics**. Cambridge University Press, Cambridge. p. 220 - 223, 1979.

MASLE, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of soil strength on the relation of water –use efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. **J. Plant Physiol.**, v. 86, p.32-38, 1988.

MASLE, J.; PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Aust. J. Plant Physiol.**, v, p. 304-303, 1987.

MATERECHERA, S. A .; ALSTON, A . M.; KIRBY, J. M.; DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant Soil**, v. 144, p. 297-303, 1992.

MAZIERO, J. V. G.; MIALHE, L. G.; CORRÊIA, I, M ; YANA, KIYOSHI ; MENEZES, J. F. Efeito da patinação da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 56, p. 191-197, 1997.

MERIDITH, H. L.; PATRICK JR, W. H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. **Agron. J.**, Madison, v. 53, p.163-167, 1961.

MIELNICZUCK, J.; RHEINHEIMER, D. S.; VEZZANI, F. M. Interação entre fertilidade e conservação do solo. In: Atividade e Biomassa Microbiana no solo com a aplicação de dois diferentes lodos de curtume. **Rev. Bras. Agrocência**, v.7, n. 2, p. 125 -130, 2001.

MILLAR, A. A. Drenagem de terras agrícolas: bases agrônomicas. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 276 p.

MINHONI, M. T. A ; ROCHA, M. M. Liberação de CO₂ e formação de biomassa em solo adicionado de matéria orgânica e/ou herbicida. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1995. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.460-462, 1995.

MOTAVALLI, P. P.; ANDERSON, S. H.; PENGTHAMKEERATI, P. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. **Field Crops Research**, 2003.

MOTTA NETO, J. A. Processos químicos e físicos na dinâmica de recuperação de solos degradados: uma visão interior. In: BALENSIEFER, M (Ed.) Recuperação de áreas degradadas – III: Curso de atualização. Curitiba: FUPEF, p.123-133, 1996.

MOURA, E. G.; VIEIRA, S. R.; CARVALHO, A . M. Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas Transeções na Baixada Ocidental Maranhense. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 16, p.7-18, 1992.

MULLER, M. M. ; CECON, G. ; ROSOLEM, C. A . Influência da compactação do solo em sub-superfície sobre o crescimento aéreo e radicular de planta de adubação verde de inverno. **R. Bras. Ci. Solo**, 25: 531-538, 2001.

MUZZILI, O ; OLIVEIRA, E. L. ; GERAGE, A . C. ; TORNERO, M. T. Adubação nitrogenada em milho no Paraná. III. Influencia da recuperação do solo com adubação de inverno nas respostas à adubação nitrogenada. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 18, 1: p. 23-7, 1983.

NACIF, P. G. S. Efeitos da subsolagem em propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo Álico coeso representativo do recôncavo baiano. In: OLIVEIRA, L. B. ; LUZ, L. R. Q. P. DELAIA, M. P. **Contribuição aos estudos de compactação. Adensamento e Coesão dos Solos.** EMBRAPA/ SOLOS. Em elaboração.

NAIME, J. M. Um novo método para estudos dinâmicos, *in situ*, da infiltração da água na região não-saturada do solo. São Carlos, São Paulo, 2001. Tese Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, 2001.

NASCIMENTO, J. S.; VAHL. C. C. ROSA COUTO, J. R. Efeito da palha sobre a mineralização do nitrogênio no solo. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1997. Goiânia. **Resumos...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.,v.1, p.150-152, 1997.

NEILSON, J. W.; PEPPER, J. L. Soil respiration as an index of soil aeration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 54, p.428 - 32, 1990.

NETO, F.C.M.; SOUZA,C. M. Avaliação de um método de recuperação de áreas degradadas através da estimativa da respiração da microbiota. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13 2000 Ilhéus. **Resumos...** Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, CD ROM.

NUERNBERG, N. J. VIDOR, C.; STAMMEL, J. G. Efeito de sucessões de culturas e tipo de adubação na densidade populacional e atividade microbiana do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.8, n.2,p. 197-203. 1984.

OLIVEIRA FILHO, J.; CARVALHO, M. A ; GUEDES, G. A . A . Matéria orgânica do solo. **Inf. Agrop.**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, 1987.

OUSSIBLE, M.; CROOSKSTON, P. K.; LARSON, W. E. Subsurface compaction reduces the root shoot growth and grain yield of wheat. **Agron. J.**, v. 84, p. 43- 38, 1992.

PARKINSON, D. & COUPS, E. Microbial activity in a podzol. In: Soil organism. DOEKSEN, J.; VAN DER DRIFT, J. North Holland Publishing Co., Amsterdam. 167-175, 1963.

PASSIONOTO, C. C.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V.; LIMA, A. C. R.; LIMA, C. L. R. Atividade e biomassa microbiana no solo com aplicação de dois diferentes lodos de curtume. **Rev. Bras. Agrociencia**, v.7 n 2. p. 125-130, 2001.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. Aust. **J. Soil Res.**, 29:717-728, 1991

PHILLIPS, R. E.; KIRKHAN, D. Soil compaction in the field and corn growth. **Agron. J.**, Madison, v. 54, p. 29-34, 1962.

QUIROGA, A. R.; BUSCHIAZZO, D. E.; PEINEMANN, N. Soil compaction in related to management practices in the semi-arid Argentine Pampas. **Soil & Till Res.**, v. 52, p. 21-28, 1999.

RADFORD, B. J.; BRIDGE, B. J.; MCGARRY, D.; PILLAI, U.P.; RICKAMAN, J. F.; WALSH, P. A.; YULE, D. F. Changes in the properties of a vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil & Till. Res.**, v. 54, p.155-170, 2001.

RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v. 11, p. 1-36, 1990.

REAVES, C. A. ; COOPER, A. W. Stress distribution in soils under tractor loads. **Agr. Eng.**, v. 41; n. 31, p. 20-21, 1960.

REICHARDT, K. **A Água na Produção Agrícola**. Piracicaba: McGraw-Hill do Brasil, 1978.p.115.

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados. Planaltina, **Rev. Bra. Pesq Agr**, 22p, 1991. (série documentos, 36).

ROSOLEM, C. A ALMEIDA, A C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, v. 53, p.259-266, 1994.

SAMPAIO, C. B. V.; REZENDE, J. O; SAMPAIO, L.S.V; COSTA, J.A.; SAMPAIO, C. V. Utilização do feijão caupi (*Vigna unguiculata*) como planta indicadora dos efeitos da subsolagem mecânica e biológica num Latossolo Amarelo álico coeso representativo do nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Viçosa, p. 2139- 2141, 1995.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à colheita de madeira. Piracicaba, 75p. Tese (Livro-docência). ESALQ. Universidade de São Paulo. 2000.

SHIERLAW, J. ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant Soil**, v. 7, p. 15 –28, 1984.

SHIPITALO, M. J.; DICK, W. A ; EDWARD, W. M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and fate of chemicals. **Soil & Tillage Res.**, v. 53, p. 167-83. 2000.

SILVA, A P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O A . Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 213-220. 1997.

SILVA, I. F.; MIELINICK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados dos solos. **R. Bras.Ci. Solo**, Campinas, v. 21, p.113-117, 1977.

SILVA, J. C. C.; COLAÇO, W.; BURITY, H. A.; FERREIRA, N. C. M.; FIGUEREIDO, M. V. B.; MARTINEZ, C. R. Influência da aplicação de herbicidas na produção do caupi e nas

transformações do N no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p. 727-729, 1995.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 253-260, 2001.

SIQUEIRA, J. O ; NAIR, M. G.; HAMMERSCHMIDT, R; SAFIR, G. R. Significance of phenolic compounds in plant-soil-microbial systems. Critical Review, **Plant Science**, v.10, n.1, p. 63-121,1991.

SITULA, B. K.; HANSEN, S.; SITULA, J. I. B.; BAKKEN, L. R. Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. **Chemosphere, Global Change Science**. v. 2, p. 367-371, 2000.

SMITH, D. L. O. ; DICKSON, J. W. The contribution of vehicles weight and aground pressure to soil compaction. **J. Agric. Eng. Res.**, London, v. 46, p. 13-29, 1990.

SOANE, B. D. Studies on some soil physical properties in relation to cultivations and traffic. In: Soil physical conditions and crop production. **Tech. Bull.**, v. 29, p. 160- 183, 1975.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil Tillage Res.**, v. 16, p. 179- 201, 1990.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop for the quality of the environment. **Soil & Tillage Res.**, v. 35, p. 5-22, 1995.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. Glossary of soil science terms. **Soil Science Society of America**, Madison , Inc, 1997.

SOUZA, F. L. C. ; TREIN, C. C.; CAMPONI, D. B. Determinação do perfil do solo mobilizado pela ação de sub-solador. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2., Jundiaí, **Anais...** Jundiaí: SBEA, p.329-335. 1987.

SPOSITO, G.; REGINATO, R. J. Opportunities in basic soil science research. **Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, p. 86 - 89, 1992.

STOLF, R. Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força por unidade de área. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, SBEA. p. 823-836, 1990.

STOLZKY, G. Microbial Respiration. In: **Methods of soil analysis. II.** American Society of Agronomy. Madison, (Agronomy Monograph 9, part 2). p. 1550, 1965.

STONE, R. J.; EKWUE, E. J. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1713-1719, 1993.

TACKETT, J. L. AND PEARSON, A. W. Effect of carbon dioxide on cotton seedling root penetration of compacted soil cores. **Soil Sci. Soc. Am..J.** Proc. 28, p. 741 – 743, 1964.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strengths of soil. **Soil Science**, v. 96. n. 3, p. 153-157, 1963.

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as measure of soil aeration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 14, p.55-61, 1949.

THUNG, M. D. T.; OLIVEIRA, I. P. **Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle.** Santo Antônio de Goiás. EMBRAPA – CNPAF, 172p. il., 1998.

TOGNON, A.A. Propriedades físico hídricas do latossolo roxo da região de Guaiara-S.P. sob diferentes sistemas de cultivo. Piracicaba: ESALQ, 1991. 67 p. (Dissertação-Mestrado em solos e nutrição de plantas)

TROUSE J.; A C.; BAVER, L. D. Illage problems in the Hawaiian Sugar Industry. IV. Seedbed preparation and cultivation. **Tech. Suppl. Soils Repr.**, HSPA., n- 12, 1965.

TROUSE J.; A C.; HUMBERT, R. P. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. **Soil Science**, Baltimore, v. 14, p. 361-366, 1961.

TRURIÈS, L. ; PANSU, M. ; FELLER, C. ; HERRMANN, P. REMY, J. C. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil. **Soil Biology & Biochemistry**. V. 33, p. 997-1010, 2001.

UNGER, P. W. Common soil and conservation practices In: AGASSI, M. Soil erosion, conservation, and rehabilitation. New York, Marcel Dekker, p. 230-265, 1994.

VAN BAVEL, C. H. M. Composition of soil atmosphere. In: **Methods of soil analysis**. Am. Soc. Agron. (Agronomy Monograph 9), p. 315-318, 1965.

VAN GENUCHETEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Sci Soc. Am. J.** v. 44, p. 892 – 898, 1980.

VAN OUWERKERK, C.; SOANE, B. D. The effects soil compaction on physical, chemical and biological factors in the environment. **Soil & Till Res.**, v. 35, p. 1- 4, 1995.

VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação de solos. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 16, p.153-159, 1992.

VOMOCIL, A J. Porosity. In: **Methods of soil analysis I**. Madison, Am. Soc. Agron. 1967. p. 299-314 (Agronomy Monograph 9, parte 2).

WHALLEY, W. R.; DUMITRU, E.; DEXTER, A. R. Biological effects of soil compaction. **Soil & Till. Res.**, v. 35, p. 53- 68, 1995.

WHITELEY, G. M.; DEXTER, A . R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. **Soil &Till. Res.**, v. 2, p. 379-393, 1982.

WILLIAMS, D. D.; BUGIN, A.; REIS, J. L. B. C. Manual de recuperação de áreas degradadas por mineração: técnicas de revegetação. In: BERG, E. V. D. Recuperação de áreas degradadas por monocultivos extensivos. EPAMIG. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 210, maio/jun. 2001.

ZORBEL, R. W. Soil enviroment constraints to root growth. **Adv. Soil Sci.** v.19, p.27-51, 1992.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Valores de PT (porosidade total) e GS (grau de saturação), calculados a partir dos valores de densidade de partícula do solo (Neossolo flúvico), e das densidades globais, umidades mássicas e volumétricas, às quais o solo foi submetido nos experimentos 1, 2 e 3 (laboratório).

EXPERIMENTOS	d_p	d_g	u_m	u_v	PT	GS
(Laboratório)	(Mg.m ⁻³)		(kg.kg ⁻¹)		(m ³ .m ⁻³)	(%)
Experimento 1	2,58	1,53	0,12	0,18	0,41	45
	2,58	1,30	0,12	0,16	0,50	31
Experimento 2	2,58	1,53	0,12	0,18	0,41	45
	2,58	1,66	0,12	0,20	0,36	56
	2,58	1,53	0,08	0,13	0,36	37
Experimento 3	2,58	1,53	0,12	0,20	0,36	55
	2,58	1,53	0,16	0,26	0,36	74

Apêndice 2 -Análise de variância do C-CO₂ liberado de um Neossolo flúvico, submetido a tratamentos com algas marinhas e borra de café, e mantido numa mesma densidade global e num mesmo conteúdo de água, durante todo período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento 1).

FV	GL	SQ	QM	F
Matéria Organica	1	25.198	25.198	654.30**
Modos aplicação	2	0.741	0.370	9.62**
Interação	2	5.112	2.556	66.37**
Resíduo	12	0.462	0.039	

Total	17	31.512		

Apêndice 02 -Análise de variância do % de mineralização do C liberado de um Neossolo flúvico, submetido a tratamentos com algas marinhas e borra de café, e mantido numa mesma densidade global e num mesmo conteúdo de água, durante todo período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento 1).

FV	GL	SQ	QM	F
Matéria Orgânica	1	1.982	213.7672	6561.83**
Modos Aplicação	2	7.070	0.990811	30.41**
Interação	2	0.391	3.534863	108.51**
Resíduo	12	223.209	0.0032577	

Total	17	1.982		

Apêndice 03 -Análise de variância do C- CO₂ liberado do solo, submetido a tratamentos com algas marinhas e borra de café, mantido a diferentes níveis de densidade global (1.30, 1.53 e 1.66 Mg.m⁻³) e mantido em um mesmo conteúdo de água (0.12 kg.kg⁻¹), durante todo o período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento 2).

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Densidade (D)	2	0.756	0.377817	18.81**
Matéria Orgânica (MO)	1	178.404	178.4039	8881.76**
Modos Aplicação (MA)	2	28.798	14.39896	716.85**
D x MO	2	1.037	0.518515	25.81**
D x MA	4	3.245	0.81121	40.39**
MO x MA	2	15.343	7.671393	381.92**
D x MO x MA	4	9.405	2.351191	117.05**
Resíduo	48	0.964	0.020087	
Total	53	237.195		

Apêndice 04 -Análise de variância do % de mineralização do C liberado do solo, tratamentos com algas marinhas e borra de café, mantido a diferentes níveis de densidade global (1,30, 1,53 e 1,66 Mg.m⁻³) e mantido em um mesmo conteúdo de água (0,12 kg.kg⁻¹), durante todo o período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento 2).

FV	GL	SQ	QM	F
Densidade	2	2.574	1.287	39.1**
Matéria Orgânica (MO)	1	670.742	670.742	20374.4**
Modos Aplicação (MA)	2	12.270	6.135	186.4**
D x MO	2	0.475	0.237	7.2**
D x MA	4	5.910	1.477	44.9**
MO x MA	2	2.915	1.457	44.3**
D x MO x MA	4	9.103	2.276	69.1**
Resíduo	48	1.580	0.033	
Total	53	702.995		

Apêndice 05 -Análise de variância do C- CO₂ liberado do solo, submetido a tratamentos com algas marinhas e borra de café, mantido a diferentes conteúdos de água e numa mesma densidade global, durante todo o período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento 3).

FV	GL	SQ	QM	F
Umidade(U)	2	3.537	1.77	51.48**
Matéria Orgânica (MO)	1	135.790	135.79	3953.25**
Modos Aplicação(MA)	2	18.144	9.07218	264.12**
U x MO	2	0.399	0.199443	5.81**
U x MA	4	0.926	0.231429	6.74**
MO x MA	2	2.822	1.410843	41.07**
U x MO x MA	4	0.317	0.079192	2.31 ^{NS}
Resíduo	48	1.649	0.034349	
Total	53	160.046		

Apêndice 06 -Análise de variância da % de C mineralizado do solo, submetido a tratamentos com algas marinhas e borra de café, mantido a diferentes conteúdos de água e a só uma densidade global, durante todo o período de incubação. Delineamento inteiramente casualizado com três repetições. (Experimento3).

FV	GL	SQ	QM	F
Densidade	2	1.798	0.899008	47.1**
MO	1	652.691	652.691	34187.5**
Mod apl.	2	26.097	13.04842	683.5**
D x MO	2	7.248	3.62413	189.8**
D x Mod	4	3.567	0.891641	46.7**
MO x Mod	2	6.932	3.466117	181.6**
D x MO x M	4	5.304	1.325997	69.5**
Residuo	48	0.916	0.019092	
Total	53	702.755		

Apêndice 07 -Análise de variância da produção de massa seca da parte aérea do feijão caupi, submetida a tratamentos com adição de diferentes adubos e dois níveis de densidade global. (Casa de vegetação- Experimento I)

Quadro de análise de variância				
F V	GL	SQ	QM	Valor F
TRATAM	9	317.7091900	35.30102111	32.8171 **
SOLOS	1	60.56521000	60.56521000	56.3037 **
ADUBACAO	4	248.46141500	62.11535375	57.7447 **
SOLOS*ADUBACAO	4	8.68256500	2.17064125	2.0179 ns
Residuo	30	32.2706500	1.07568833	
Total	39	349.979840		

Apêndice 08 - -Análise de variância comprimento de raiz do feijão caupi, submetida a tratamentos com adição de diferentes adubos e dois níveis de densidade global. (casa de vegetação- Experimento I)

Experimento tubo de PVC				
Quadro de análise de variância				
FV	GL	SQ	QM	F
TRATAM	9	628.38225000	69.82025000	18.1843 **
SOLOS	1	10.92025000	10.92025000	2.8441 **
ADUBACAO	4	388.67100000	97.16775000	25.3068 **
SOLOS*ADUBACAO	4	228.79100000	57.19775000	14.8969 **
Residuo	30	115.18750000	3.83958333	
Total	39	743.56975000		

Apêndice 09 -Análise de variância da produção de massa seca dos nódulos feijão caupi, submetida a tratamentos com adição de diferentes adubos e dois níveis de densidade global. (Casa de vegetação- Experimento I)

Experimento tubo de PVC
ANALISE DE DADOS EM LOG(1000*X)

Quadro de análise de variância

FV	GL	SQ	QM	Valor F
TRATAM	9	6.44392217	0.71599135	4.2433 ns
SOLOS	1	0.77988940	0.77988940	4.6220 ns
ADUBACAO	4	5.64884304	1.41221076	8.3694 **
SOLOS*ADUBACAO	4	0.01518973	0.00379743	0.0225 ns
Residuo	30	5.06207757	0.16873592	
Total	39	11.50599974		

APÊNDICE 10- Análise de variância da altura de planta do feijão caupi submetida a tratamentos com 4 doses de irradiação e de dois níveis de densidade global. (casa de vegetação- Experimento II)

FV	GL	SQ	Q M	F
TRATAM	7	1924.35178102	274.90739	21.7348**
COMP	1	394.55150417	394.55150	31.1942
DOSES	3	1311.63413843	437.21137	34.5670
Graul	1	1094.79029343	1094.7902	86.5568
COMP*DOSES	3	218.16613843	72.722046	5.7496
Residuo	16	202.37178519	12.648236	
Total	23	2126.72356620		

APÊNDICE 11- Análise de variância do diâmetro do caule do feijão caupi, submetida a 4 níveis de doses de irradiação e de dois níveis de densidade global. (Casa de vegetação- Experimento PVC)

FV	GL	SQ	QM	F
TRATAM	7	0.02044259	0.00292037	1.9185 ns
COMP	1	0.01014074	0.01014074	6.6618 **
DOSES	3	0.00462407	0.00154136	1.0126 ns
COMP*DOSES	3	0.00567778	0.00189259	1.2433 ns
Resíduo	16	0.02435556	0.00152222	
Total	23	0.04479815		

APÊNDICE 12- Análise de variância da matéria seca da parte aérea do feijão caupi, submetido a tratamentos com 4 doses de irradiação e de dois níveis de densidade global. (casa de vegetação- com latões)

ANALISE DE EXPERIMENTO LATAO C/FATORIAL COMPLETO				
FV	GL	SQ	QM	F
TRATAM	7	38.19229	5.45604206	9.7971 **
COMP	1	12.08899	12.08893519	21.7075 **
DOSES	3	23.02075	7.67358580	13.7791 **
Grau1	1	12.857653	12.8576533	23.0878 **
COMP*DOSES	3	3.08260185	1.02753395	1.8451 ns
Resíduo	16	8.91043704	0.55690231	
Total	23	47.10273148		

APÊNDICE 13 Análise conjunta de variância da altura de planta do feijão caupi, submetido a 4 níveis de doses de irradiação e dois níveis de densidade global, referentes aos 60 dias posteriores a semeadura. (casa de vegetação- Experimento -II)

ANALISE DE EXPERIMENTO LATAO C/FATORIAL COMPLETO

Quadro de análise de variância Variavel Dependente : APm

FV	GL	SQ	QM	F
TRATAM	7	1924.35178102	274.90739729	21.7348**
COMP	1	394.55150417	394.55150417	31.1942**
DOSES	3	1311.63413843	437.21137948	34.5670**
Grau1	1	1094.79029343	1094.79029343	86.5568**
COMP*DOSES	3	218.16613843	72.72204614	5.7496**
Residuo	16	202.37178519	12.64823657	
Total	23	2126.72356620		

APÊNDICE 14– Relação C/N dos resíduos orgânicos adicionados ao solo (Experimento Laboratório)

Resíduos	N	C	C/N
Borra de café	1.05	43	41
Algas marinhas	1.22	24.47	20.05

APÊNDICE 15–Relação C/N das misturas orgânicas adicionadas ao solo (Experimento I - Casa de Vegetação)

Misturas	N	C	C/N
Organomineral I	5,77	2,95	0,511
Organomineral II	4,37	2,82	0,65

APENDICE 16- Teste de germinação com sementes de feijão caupi - IPA-206

Dia 0	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Lote 1	47%	87%	93%
Lote 2	80%	100%	100%
Lote 3	67%	100%	100%
Lote 4	27%	100%	100%
Lote 5	67%	100%	100%