

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CAMPUS DE JABOTICABAL**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**

**PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO ALTERADAS  
POR COMPACTAÇÃO**

**Breno Pupin**

Biólogo

JABOTICABAL – SÃO PAULO - BRASIL

Novembro – 2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CAMPUS DE JABOTICABAL**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**

**PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO ALTERADAS  
POR COMPACTAÇÃO**

**Breno Pupin**

**Orientador: Prof. Dr. Ely Nahas**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Microbiologia Agropecuária.

JABOTICABAL – SÃO PAULO - BRASIL

Novembro – 2008

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**BRENO PUPIN** – nascido em 06 de março de 1980, em Monte Alto, São Paulo, Brasil. Filho de Leonildo Pupin e Aparecida Anuti Pupin. Biólogo formado em janeiro de 2006 pela Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Catanduva - FAFICA. Ingressou em agosto do mesmo ano no curso de Mestrado, área de concentração em Microbiologia Agropecuária, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal.

**DEDICO**

*Aos meus pais, Leonildo e  
Aparecida, pessoas preciosas  
que representam tudo de mais sagrado que  
tenho nesta vida, onde através da simplicidade e  
confiança me apoiaram nesta difícil jornada.*

**OFEREÇO**

*A Camila Quedas Soares pelo amor,  
carinho incentivo e compreensão em minhas  
ausências e pelo suporte nas horas difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, nosso Pai, que a cada noite peço em orações suas bênçãos para continuar lutando a cada dia.

Ao **Prof. Dr. Ely Nahas**, que sempre demonstrou acreditar no meu potencial, pela oportunidade oferecida, pela orientação e paciência. Dessa forma tive a oportunidade de enriquecer meu conhecimento, com suas argumentações científicas e sugestões nos meus relatórios, artigo, entre outros.

Ao técnico do laboratório, **Luiz Carlos de Assis**, pelo aprendizado, paciência, amizade e agradável convivência, além de abrir as portas de sua casa para a convivência com toda sua família

Ao **Prof. Dr. Antonio Carlos Monteiro**, pela amizade e ensinamentos ao longo do tempo.

Ao **Prof. Dr. José Frederico Centurion** e ao **Dr. Onã da Silva Freddi**, pela ajuda, esclarecimentos e relevantes sugestões feitas neste trabalho.

A **Profa. Dra. Mariza de Cássia Piccolo**, pela participação na banca examinadora e por valiosas considerações feitas ao trabalho.

Ao **Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira**, pela colaboração com os dados estatísticos.

A **Martha Garcia**, **Cynthia Barroso** (in memorian) e **Eliane Cardoso** pelos inúmeros ensinamentos e valiosas sugestões ao longo deste trabalho, além da agradável convivência e amizade.

A **Ana Claudia Oliveira**, pela ajuda e incentivo para que este trabalho se tornasse possível, meu eterno agradecimento.

Aos amigos **Fabício Jacianni e Thiago Rombola** pela agradável convivência. Pra vocês “Aquele abraço”.

Ao amigo **Walter Fernandes** e funcionários da Usina Cerradinho Açúcar e Álcool.

A todos os companheiros de laboratório, em especial, **Beatriz, Clóvis, Rose e Meire** pelo companheirismo, amizade, ajuda e carinho.

A secretária do departamento, **Edna Testa D’áquila**, pela simpatia e disposição nas inúmeras vezes em q esteve sempre disposta a me ajudar.

A **Rosângela e João Quintana** pela amizade companheirismo ao longo deste tempo.

**Ao CNPq** pela concessão de bolsa de estudo.

A todos os funcionários da **seção de Pós-Graduação e Funcionários da Fazenda** que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

**A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias** – Campus de Jaboticabal, através do corpo docente do Programa de Mestrado e Doutorado em Microbiologia, pelas disciplinas ministradas.

## SUMÁRIO

Página

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                        | <b>vi</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                        | <b>x</b>   |
| <b>RESUMO.....</b>                                                  | <b>xii</b> |
| <b>SUMMARY.....</b>                                                 | <b>xiv</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                           | <b>1</b>   |
| <b>2. REVISAO DE LITERATURA.....</b>                                | <b>3</b>   |
| 2.1 A cultura da cana-de-açúcar.....                                | 4          |
| 2.2 A cultura do milho.....                                         | 6          |
| 2.3 Compactação do solo.....                                        | 8          |
| 2.4 Microrganismos do solo.....                                     | 9          |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                   | <b>10</b>  |
| 3.1 Experimento 1 – Sistema da cultura da cana-de-açúcar.....       | 10         |
| 3.1.1 Tratos culturais e amostragem na área com cana-de-açúcar..... | 11         |
| 3.1.2 Delineamento experimental e análise estatística.....          | 14         |
| 3.2 Experimento 2 – Sistema da cultura do milho.....                | 15         |
| 3.2.1 Tratos culturais e amostragem na área com milho.....          | 15         |
| 3.2.2 Delineamento experimental e análise estatística.....          | 17         |
| 3.3 Contagem de microrganismos.....                                 | 17         |
| 3.3.1 Meios de cultura.....                                         | 17         |
| 3.4 Análises microbiológicas.....                                   | 22         |
| 3.4.1 Carbono da biomassa microbiana.....                           | 22         |
| 3.4.2 Atividade respiratória microbiana.....                        | 23         |
| 3.4.3 Atividade nitrificante.....                                   | 24         |
| 3.4.4 Atividade solubilizadora de fosfato.....                      | 25         |
| 3.4.5 Atividade enzimática da urease.....                           | 25         |
| 3.4.6 Atividade enzimática da fosfatase ácida.....                  | 26         |
| 3.4.7 Atividade enzimática da desidrogenase.....                    | 26         |
| 3.5 Análise química do solo.....                                    | 27         |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.1 Umidade do solo.....                                 | 27        |
| 3.5.2 Matéria orgânica do solo.....                        | 27        |
| 3.5.3 pH do solo.....                                      | 27        |
| 3.5.4 Capacidade de retenção de água do solo.....          | 28        |
| 3.5.5 Composição química do solo.....                      | 28        |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>                                  | <b>29</b> |
| 4.1 Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....    | 29        |
| 4.1 Efeito da compactação do solo na cultura do milho..... | 37        |
| <b>5. DISCUSSÃO.....</b>                                   | <b>44</b> |
| 5.1 Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....    | 44        |
| 5.2 Efeito da compactação do solo na cultura do milho..... | 47        |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>                                   | <b>50</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>                                | <b>51</b> |
| <b>8. ANEXOS.....</b>                                      | <b>62</b> |
| 7.1 Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....    | 62        |
| 7.2 Efeito da compactação do solo na cultura do milho..... | 70        |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                       | Página |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Tabela 01.</b> Produção de cana-de-açúcar e tratos culturais.....                                                                  | 12     |
| <b>Tabela 02.</b> Características químicas do solo após sucessivos cortes<br>de cana-de-açúcar.....                                   | 13     |
| <b>Tabela 03.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>contagem de UFC de bactérias totais do solo.....           | 62     |
| <b>Tabela 04.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>contagem de UFC de fungos totais do solo.....              | 63     |
| <b>Tabela 05.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>contagem do NMP de bactérias nitrificantes do solo.....    | 63     |
| <b>Tabela 06.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>contagem do NMP de bactérias desnitrificantes do solo..... | 64     |
| <b>Tabela 07.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>atividade respiratória do solo.....                        | 64     |
| <b>Tabela 08.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar no<br>carbono da biomassa microbiana do solo.....                | 65     |
| <b>Tabela 09.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>atividade nitrificante do solo.....                        | 65     |
| <b>Tabela 10.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>atividade amonificante do solo.....                        | 66     |
| <b>Tabela 11.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>atividade solubilizadora do solo.....                      | 66     |
| <b>Tabela 12.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na<br>atividade da enzima urease do solo.....                    | 67     |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 13.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade da enzima fosfatase ácida do solo..... | 67 |
| <b>Tabela 14.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade da enzima desidrogenase do solo.....   | 68 |
| <b>Tabela 15.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na % de umidade do solo.....                        | 68 |
| <b>Tabela 16.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na % de matéria orgânica do solo.....               | 69 |
| <b>Tabela 17.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar no pH do solo.....                                  | 69 |
| <b>Tabela 18.</b> Influência da compactação na contagem de UFC de bactérias totais do solo.....                          | 70 |
| <b>Tabela 19.</b> Influência da compactação na contagem de UFC de fungos totais do solo.....                             | 71 |
| <b>Tabela 20.</b> Influência da compactação na contagem do NMP de bactérias nitrificantes do solo.....                   | 71 |
| <b>Tabela 21.</b> Influência da compactação na contagem do NMP de bactérias desnitrificantes do solo.....                | 72 |
| <b>Tabela 22.</b> Influência da compactação na atividade da enzima urease do solo.....                                   | 72 |
| <b>Tabela 23.</b> Influência da compactação na atividade da enzima fosfatase ácida do solo.....                          | 73 |
| <b>Tabela 24.</b> Influência da compactação na atividade da enzima desidrogenase solo.....                               | 73 |
| <b>Tabela 25.</b> Influência da compactação na umidade do solo.....                                                      | 74 |
| <b>Tabela 26.</b> Influência da compactação na matéria orgânica do solo.....                                             | 74 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 27.</b> Influência da compactação no pH do solo..... | 75 |
|----------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE FIGURAS

Página

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Esquema da coleta de amostras de solo em cada corte de cana-de-açúcar.....                                                                               | 14 |
| <b>Figura 2.</b> Esquema da coleta de amostras de solo compactado na cultura do milho.....                                                                                | 16 |
| <b>Figura 3.</b> Contagem de (UFC) de bactérias totais (A) e fungos totais (B) do solo sob o efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....                          | 30 |
| <b>Figura 4.</b> Contagem de (NMP) bactérias nitrificantes (A) e bactérias desnitrificantes (B) do solo sob o efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....         | 31 |
| <b>Figura 5.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar no Carbono da biomassa microbiana (A) e na atividade respiratória (B) do solo.....                    | 32 |
| <b>Figura 6.</b> Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade amonificante (A), atividade nitrificante (B) e atividade solubilizadora (C) do solo..... | 34 |
| <b>Figura 7.</b> Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade da enzima desidrogenase (A), fosfatase ácida (B) e urease (C) do solo.....                   | 35 |
| <b>Figura 8.</b> Conteúdo de umidade (A), matéria orgânica (B) e pH (C) do solo sob efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.....                                   | 36 |
| <b>Figura 9.</b> Contagem de (UFC) bactérias totais (A) e fungos totais (B) do solo sob o efeito de compactação.....                                                      | 39 |
| <b>Figura 10.</b> Contagem de (NMP) bactérias nitrificantes e desnitrificantes (B) do solo sob efeito de compactação.....                                                 | 40 |
| <b>Figura 11.</b> Atividade da desidrogenase (A), urease (B) e fosfatase ácida (C) do solo sob efeito de compactação.....                                                 | 41 |

**Figura 12.** Conteúdo de umidade (A), matéria orgânica (B) e pH (C)  
do solo sob efeito de compactação.....43

## PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO ALTERADAS APÓS COMPACTAÇÃO

**RESUMO** - A cultura da cana-de-açúcar tem sido conduzida por cortes sucessivos e para isso é intensamente adubada e mecanizada. A influência sobre as bactérias totais, nitrificantes e desnitrificantes, os fungos, a biomassa microbiana-C, as atividades, respiratória, amonificante, nitrificante e solubilizadora e das enzimas desidrogenase, urease e fosfatase foram estudada em um solo após seis cortes da cultura de cana-de-açúcar. As amostras de solo foram coletadas na linha e entrelinha na profundidade do solo de 0-20 cm. Para a colheita, a palha da cana do 2º e 3º cortes foi queimada. As demais não foram queimadas. Reduções sucessivas foram encontradas nas contagens e atividades microbianas do solo após os sucessivos cortes. A não queima da palha no 4º corte acarretou aumento nas contagens dos fungos e das atividades amonificante, nitrificante, solubilizadora e das enzimas urease e fosfatase, que em seguida diminuíram. As contagens das bactérias totais, nitrificantes e desnitrificantes e dos fungos diminuíram de 55%, 22%, 17% e 77%, respectivamente, do primeiro corte ao sexto corte. Foram também observadas as seguintes reduções: biomassa microbiana-C 43%, atividades respiratória 39%, amonificante 35%, nitrificante 40% e solubilizadora 35%. A atividade das enzimas desidrogenase (58%) e urease (36%), mas não a da fosfatase. Redução significativa foi observada no conteúdo de umidade do solo (33%). Cortes sucessivos da cana-de-açúcar têm importante impacto nas populações e atividades microbianas, acarretando consequências negativas nos ciclos do C, N e P e diminuição da produtividade da cultura. Tendo em vista que a compactação é um dos fatores mais agravantes para a qualidade do solo, objetivou-se avaliar o efeito da compactação a comunidade e atividade enzimática microbiana de um solo sob cultura de milho. Seis níveis de compactação foram obtidos pela passagem de tratores com diferentes pesos em um Argissolo Vermelho e a densidade final foi medida ( $D_{1,35}$ ,  $D_{1,62}$ ,  $D_{1,66}$ ,  $D_{1,70}$ ,  $D_{1,73}$  e  $D_{1,74}$ ). Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm após a colheita do milho. O efeito da compactação

foi evidente em todos os parâmetros estudados, porém nem sempre foi significativo. Quando se comparou o solo mais denso com o controle, as contagens de bactérias totais reduziram-se significativamente de 22-30% e as nitrificantes de 38-41%. Contudo, as populações de fungos aumentaram de 55-86% e das bactérias desnitrificantes de 49-53%. A atividade da desidrogenase diminuiu de 20-34%, a da urease de 44-46% e a da fosfatase de 26-28%. O conteúdo de matéria orgânica e o pH do solo diminuíram da camada de solo superior em relação à inferior e influíram possivelmente na redução das contagens microbianas, exceto das bactérias desnitrificantes e da atividade das enzimas menos a da urease. Estes resultados indicam que a compactação do solo influenciou na comunidade de microrganismos aeróbios e na sua atividade. Este efeito pode alterar a ciclagem de nutrientes e a produção da planta.

**Palavras chaves:** atividade biológica, cana-de-açúcar, compactação, enzimas, microrganismos, milho

## MICROBIOLOGICAL PROPERTIES OF THE SOIL ALTERED AFTER COMPACTION

**SUMMARY** - Sugarcane culture has been cultivated by successive cuts and for that it is fertilized intensely and mechanized. The influence on the total bacteria, nitrifying and denitrifying, the fungi, the C of the biomass microbial, the activities, respiratory, amonifying, nitrifying and phosphates solubilizers and of enzymes dehydrogenase, urease and phosphatase it was studied in a soil after six cuts of the sugarcane culture. The soil samples were collected in the line and space between lines in the depth of the soil of 0-20 cm. For de harvest, the straw of the sugarcane of the 2° and 3° cuts it was burned. The others were not burned. Successive reductions were found in the counts and microbial activities of the soil after the successive cuts. It doesn't burn of the straw in the 4° cut caused increase in the counting of fungi and of the activities amonifying, nitrifying, solubilizers and of the enzymes urease and phosphatase that soon after decreased. The counting of the total bacteria, nitrifying and denitrifying and of the fungi they decreased of (55%), (22%), (17%) and (77%), respectively, of the first cut to the sixth cut. They were also observed the following reductions: C of the biomass microbial (43%), activities respiratory (39%), amonifying (35%), nitrifying (40%) and solubilizers (35%). The activity of enzymes dehydrogenase (58%) and urease (36%), but not it of phosphatase. Significant reduction was presented in the content of humidity of the soil (33%). Successive cuts of the sugarcane have important impact in the populations and microbial activities, causing negative consequences in the cycles of C, N and P and decrease of the productivity of the culture. Tends in view that the compaction is one of the most agravating factors for the soil quality, however the effect in the community and microbial enzymatic activity has not been studied sufficiently. Six compaction levels were obtained by the passage of tractors with different weights in a Red Argissolo and the final density was measured ( $D_{1,35}$ ,  $D_{1,62}$ ,  $D_{1,66}$ ,  $D_{1,70}$ ,  $D_{1,73}$  and  $D_{1,74}$ ). Soil samples were collected in the 0-10 and 10-20 cm depths after corn crop. The compaction effect was evident in all the studied parameters even so not always it was significant. When the densest soil was compared with the control, total bacteria counts reduced significantly 22-30% and nitrifying 38-41%. However, fungi populations increased 55-

86% and denitrifying 49-53%. Desidrogenase activity reduced 20-34%, urease 44-46% and phosphatase 26-28%. Organic matter content and soil pH decreased from the superior layer of soil in relation to inferior and influenced possibly the reduction of the microbial counts, except denitrifying, and enzymes activities, less urease. These results indicate that the soil Compaction influenced in the community of aerobic microorganisms and their activity. This effect can alter nutrient cycling and decrease crop production.

**Keywords:** biological activity, sugarcane, compaction, enzymes, microorganisms, corn

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar e o milho são culturas produzidas em grande escala no Brasil, principalmente no estado de São Paulo. Para conseguir altos índices de produção, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos por pesquisadores em todo território nacional.

A cana-de-açúcar é mantida por inúmeros cortes sucessivos para uma maior produção, e com isso, é intensamente adubada e mecanizada durante os cortes que podem ter duração de um ano ou ano e meio, dependendo da variedade. Com intensos tratos culturais que sofrem desde a implantação do canavial até a colheita da cana para o beneficiamento, vários veículos passam inúmeras vezes pelo mesmo local dentro de um canavial modificando a estrutura física que apresentava antes esta proporção do solo e com isso influenciam negativamente a fração biológica que funciona no solo com os microrganismos e as suas transformações microbianas que realizam em benefício da cultura.

No caso da cultura do milho, métodos como a semeadura direta vem sendo adotados ao longo dos últimos anos em substituição ao preparo convencional antes utilizado. Com este sistema de plantio direto, provoca-se também uma compactação superficial do solo, que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não-revolvimento do solo, sendo então, apontado como causas da compactação em solos agricultáveis, o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita são apontados como principais.

Outro problema da compactação do solo é a diminuição de oxigênio presente devido ao rearranjo das partículas do solo causando uma diminuição da porosidade do mesmo, afetando assim atividades que os microrganismos exercem no solo, acarretando consequências negativas aos ciclos do C, P, N diminuindo a produção das culturas.

Neste estudo, foram utilizadas duas culturas submetidas à compactação. A cultura do milho através de compactação induzida e a cultura da cana-de-açúcar

sujeitas ao tráfego de máquinas agrícolas após sucessivos cortes. Os efeitos negativos da compactação e de sucessivos cortes sem renovação da cultura podem acarretar reflexos negativos no desenvolvimento dos microrganismos e suas atividades microbiológicas, influenciando na produtividade das culturas.

Assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a hipótese de que alterações provocadas no solo pelo impacto dos sucessivos cortes e da compactação induzida na cultura da cana-de-açúcar e do milho respectivamente, possam influenciar a comunidade microbiológica, causando uma diminuição do número de microrganismos e também nas suas respectivas atividades.

Como objetivos específicos, pretenderam-se determinar no solo:

- Número de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias e fungos totais;
- Número mais provável (NMP) de bactérias nitrificantes e desnitrificantes,
- Biomassa microbiana-C;
- Atividade respiratória;
- Atividade nitrificante;
- Atividade amonificante;
- Atividade solubilizadora;
- Atividade da enzima urease;
- Atividade da enzima fosfatase ácida;
- Atividade da enzima desidrogenase;
- Umidade e matéria orgânica;
- pH do solo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A agricultura atual tem sido baseada no uso intensivo de implementos agrícolas para o manejo do solo e aplicação de fertilizantes e pesticidas. O intenso tráfego da maquinaria agrícola ocasiona compactação e, como consequência, mudanças físicas do solo e diminuição da produtividade das plantas (LANZANOVA et al., 2007). A combinação destes fatores pode diminuir a produtividade das plantas em relação às áreas não compactadas. Em adição, ocorre diminuição da macroporosidade e da porosidade total, aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração das raízes (GIAROLA et al., 2007).

Reconhecida como um indicador da qualidade e das transformações biológicas, a matéria orgânica, pode proporcionar informações sobre o manejo do solo (ARAÚJO E MONTEIRO, 2007; GARCIA E NAHAS, 2007).

Considerada como um compartimento da matéria orgânica do solo, a biomassa microbiana pode ser diretamente influenciada por fatores bióticos e abióticos, sendo, portanto, sensível às mudanças ocorridas no sistema. A compactação do solo durante os processos mecânicos, tem como resultado a diminuição da aeração e conseqüentemente, uma redução da biomassa microbiana (BRELAND e HANSEN, 1995). Esta redução segundo Breland e Hansen (1996), acontece também durante a mineralização e disponibilidade do N.

A compactação pode influir na disponibilidade de nutrientes para as plantas porque o número de microrganismos e sua atividade podem ser reduzidos (LEE et al., 1996). A diminuição da biomassa e atividade microbiana foi relatada por vários autores (LI et al., 2003). A população de bactérias, fungos totais, nematóides e artrópodes foi significativamente maior no solo controle em relação ao compactado (SMELTZER et al., 1986). Estudando a decomposição do trevo, Breland e Hansen (1995) observaram uma redução de 18% na mineralização do  $^{15}\text{N}$  em solo compactado em relação ao controle.

As enzimas microbianas realizam funções importantes no solo e tem sido utilizada para medir a influência do manejo e da qualidade do solo (BERGSTROM et al.,

1998). A atividade das enzimas pode dar interferências sobre a ciclagem dos nutrientes, produtividade das plantas e o efeito das alterações físicas e químicas do solo (MARTENS et al., 1992; DICK et al., 1997).

Um dos efeitos da compactação resulta da alteração da disponibilidade de aeração do solo devido a perda de bioporos e outros macroporos (WHALLEY et al., 1995, LIMA et al., 2005). A tendência é a de que condições de anaerobiose passem a vigorar modificando a predominância das populações microbianas e a atividade resultante nas transformações dos nutrientes no solo. Em ensaios em condições controladas de ambiente, o aumento da perda de N foi relacionado com o aumento da densidade e grau de saturação do solo em consequência da desnitrificação (TORBERT e WOOD, 1992; JORDAN et al., 2003). A nitrificação no solo é favorecida pelas condições aeróbias, podendo haver perda de óxido nítrico (NO), bem como  $N_2O$  (óxido nitroso). Contudo, a desnitrificação é favorecida por condições anaeróbias, com aumento da desnitrificação pode desencadear a redução acentuada de  $N_2O$  para  $N_2$  e, portanto diminuir emissão de  $N_2O$  (CLAYTON et al., 1997). Bactérias desnitrificantes predominaram em solo compactado aumentando a emissão do  $N_2O$  em área cultivada com batata (RUSER et al., 2006).

Embora inúmeros trabalhos tenham abordado o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo e do desenvolvimento das plantas, muito pouco foi estudado em relação à dinâmica das populações de microrganismos e as enzimas envolvidas nos processos metabólicos do solo.

## **2.1. Cultura da cana-de-açúcar**

O Brasil é considerado atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (MOLIN et al., 2004), sendo que esta cultura é conduzida por meio de atividades economicamente organizadas para extração do açúcar e produção de álcool, com produção de até  $150 \text{ t ha}^{-1}$  no primeiro corte da cultura. O sistema idealizado para maximizar a produção de sacarose tem sido baseado em diversos cortes de colheita que podem chegar até oito quando a cultura é renovada.

Para conseguir altos índices de produção, a cultura da cana é intensamente adubada e mecanizada. Começando pelo plantio e até o final do corte, inúmeras operações agrícolas de preparo do solo, colheita e transporte da matéria prima são conduzidas repetidas vezes em uma mesma área. As consequências do intenso tráfego de máquinas agrícolas podem causar verdadeiros impactos ambientais no solo (LEBERT et al., 2007). A compactação é a principal causa destas perturbações, causando estresse ao solo, em razão das forças mecânicas exercidas no sistema, com isso são limitadas as atividades microbiológicas e seus processos bioquímicos, que são importantes para a disponibilidade de nutrientes.

A cana-de-açúcar tem sido cultivada no Brasil desde 1532. Atualmente assume grande importância econômica, social e ambiental, pelas grandes áreas plantadas, por gerar matéria prima como base para as agroindústrias do açúcar, álcool e aguardente, além de representar para o nosso país uma fonte de grande geração de empregos e renda no meio rural. Tendo alcançado uma impressionante marca de 515 milhões de toneladas, onde só no Estado de São Paulo este número chegou a 337 milhões de toneladas, numa área total de 7 milhões de hectares na safra 2006/2007 (IBGE, 2008).

Considerada uma gramínea perene, a cana-de-açúcar pertencente ao gênero *Saccharum*, tendo comprimento, espessura e formas variadas. Geralmente é cultivada em áreas tropicais ou subtropicais, sendo originária do Sudeste Asiático, pertencente à família Poaceae, um grupo de plantas vasculares com uma grande facilidade de adaptação.

A condição climática tropical brasileira favoreceu a formação de grandes latifúndios monocultores (BALASTREIRE, 1998), fundamentando nossa economia até os dias atuais. Esta cultura representa uma importante atividade agro-industrial para o Estado de São Paulo (Estado este com maior contribuição para o País) e para o Brasil, fazendo parte tanto do consumo interno quanto para as exportações. Oferece como bioprodutos o açúcar, a vinhaça, o melaço, a cachaça, o álcool e a forragem para animais. Podendo ainda se extrair a celulose a partir dos talos para a produção de papel (LIMA, 1988). Contudo sua importância socioeconômica pode ser atribuída à produção de dois derivados: o açúcar utilizado na alimentação humana e o etanol que

substitui de forma mais econômica e menos poluente os derivados de petróleo utilizados como combustíveis de automóveis.

A curva de crescimento da cana-de-açúcar de primeiro corte pode ser mais simétrica se o corte for anual (cana-de-ano) ou bimodal, caso seja corte de mais de um ano (cana-de-ano e meio). A cana-de-ano (12 meses), plantada entre os meses de setembro-outubro, tem seu desenvolvimento máximo entre novembro a abril, diminuindo após ter condições climáticas adversas do período de inverno, podendo essa colheita ocorrer a partir de julho, isto em função do cultivar.

A cana-de-ano e meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, apresenta taxa de crescimento mínimo, nula ou mesmo negativa, de maio a setembro, no Centro-Sul, em função das condições pouco favoráveis do inverno, como pequena disponibilidade hídrica no solo ou mesmo déficit hídrico, baixas temperaturas e menores intensidades de radiação. Já com o início das precipitações, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, a fase de maior desenvolvimento da cultura acontece de outubro a abril, com o pico do crescimento por volta de dezembro a abril.

Segundo ARIZONO et al., (1998), a cultura canavieira passa por um momento de grandes mudanças, uma das quais é a substituição da colheita manual pela mecânica, isto implica em várias alterações que ocorrem no ambiente do solo e a compactação vem sendo citada como um desses agravantes no ambiente.

## **2.2 Cultura do milho**

Devido ao valor nutritivo e dos altos rendimentos alcançados, o milho é um dos cereais mais cultivados no mundo, assumindo grande importância social e econômica. A importância econômica do milho é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização, que vai desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia. Dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com 51 milhões de toneladas em grãos (total) produzidas em uma área aproximadamente de 13 milhões de hectares na safra 2006/2007 (IBGE, 2008).

A produção brasileira de milho cresceu a uma taxa superior a 4% ao ano, sendo que o principal componente desse crescimento foi à elevação da produtividade média (COUTO et al., 2003). Os híbridos simples e triplos representam, hoje, cerca de 65% das opções para os produtores, mostrando uma tendência na agricultura brasileira e uma maior necessidade de se aprimorar os sistemas de produção utilizados, para melhor explorar o potencial genético dessas sementes (CRUZ e PEREIRA FILHO, 2006). Segundo Couto et al. (2003), em algumas regiões do Sul, do Triângulo Mineiro, de São Paulo e, de maneira geral, no Centro-Oeste, são observados os maiores rendimentos da cultura do milho, sendo que estes crescimentos estão geralmente associados a lavouras de maior área, de orientação comercial, onde normalmente é conduzido um sistema de rotação milho-soja e é mais freqüente o uso do sistema plantio direto.

Nos últimos anos, tem se aumentado substancialmente o uso do sistema de plantio direto, sendo que atualmente, mais de 26 milhões de hectares, já são cultivados com este sistema e, cerca de 3 milhões de hectares ocupados com a cultura do milho; e nas regiões onde se cultiva a soja e o milho, o sistema plantio direto se beneficia desta rotação que é benéfica para ambas as culturas, o mesmo ocorrendo para o plantio do milho “safrinha” plantado após a soja precoce (COELHO et al., 2004).

O plantio direto é um sistema onde a semente é depositada diretamente no solo não preparado, onde os resíduos da cultura anterior permanecem na superfície e as plantas daninhas são controladas quimicamente. Uma vez que o sistema plantio direto altera as condições químicas, físicas e biológicas do solo, também ocorrerão alterações no desenvolvimento das plantas e na produtividade.

### **2.3 Compactação do solo**

A compactação do solo, como consequência do cultivo freqüente com maquinaria pesada é um dos principais problemas que a agricultura moderna mecanizada está enfrentando. Este prejuízo para a lavoura causado pelo intenso tráfego de máquinas interfere nas características físicas e também na fertilidade do solo, embora estudos

como a diminuição da estabilidade de agregados, formação de crostas e bandejas, penetração de raízes no solo causadas pelo tráfego intenso sejam bem documentadas, pouco ainda se sabe sobre como a compactação afeta a comunidade biológica do solo (DE NEVE e HOFFMAN, 2000).

A modernização da agricultura por meio de mecanização acarreta facilidades ao homem, possibilitando um trabalho mais rápido e eficiente. Com o passar dos tempos foram surgindo máquinas cada vez maiores e mais pesadas, otimizando o trabalho no campo, mas trazendo à tona um grande problema, a compactação do solo.

As mudanças físicas ocorridas pela compactação do solo modificam os microhabitats formados por microrganismos, inibindo a eficácia do seu potencial na ciclagem de nutrientes. Efeitos biológicos da compactação do solo incluem a diminuição do crescimento radicular das plantas e de suas atividades microbianas, reduzindo a disponibilidade de nutrientes e modificando taxas de mineralização (WHALLEY et al., 1995; GOMEZ et al., 2002).

A compactação do solo pode ser entendida como a diminuição do volume do solo, ocasionando por compressão, causando um rearranjo das partículas do solo que vem sempre acompanhado de uma redução da porosidade (CARVALHO FILHO et al., 2004). Para se ter uma agricultura sustentável é necessário conhecer as intensidades de compactação suportada pelo solo, bem como o momento das operações agrícolas (DIAS JUNIOR, 2000). Dentre os efeitos prejudiciais da compactação do solo, pode-se destacar: a redução da infiltração de água no solo, resultando em aumento da erosão, poluição e assoreamento dos mananciais aquáticos; redução do movimento de ar, da água e a disponibilidade de nutrientes no solo; a redução da penetração e da ramificação das raízes por excessiva resistência mecânica e aeração deficiente, podendo afetar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea das plantas (HAKANSSON e VOORHEES, 1998), além de enormes prejuízos a microbiota estabelecida no ambiente do solo.

Pelo fato da compactação ser um sério problema para os solos agrícolas, seu estudo é intenso em relação à proporção física do solo, bem como a busca por parâmetros que permitam sua mensuração e comparação entre os diferentes solos.

Porém pouco se sabe sobre a influência da compactação sobre os microrganismos e suas habilidades nas transformações e ciclagem de nutrientes. Um fator de suma importância a considerar é o impacto das causas da compactação como a redução da disponibilidade de O<sub>2</sub>, do teor de água, dos espaçamentos entre os macros e microporos, diminuição da penetração das raízes no solo, onde se tem uma maior quantidade de microrganismos presentes, todas estas variáveis estão sujeitas a modificar a microbiota estabelecida no solo de uma cultura.

## **2.4 Microrganismos do solo**

Devido ao crescimento populacional e a crise de alimentos no mundo, o manejo intensivo do solo, a rotação de cultura e o uso de pesticidas e fertilizantes tornaram-se práticas comuns para o aumento da produção agrícola. A utilização destas práticas tem ocasionado perda de matéria orgânica, compactação, erosão do solo, além da contaminação de águas subterrâneas, e prejuízos a microbiota do solo interferindo em seus processos bioquímicos (ARAÚJO et al., 2007).

A compactação tem sido citada como agravante no crescimento, desenvolvimento e na produção das culturas (FERNANDES et al., 1983; SILVIA et al., 2000a,b), influenciando na redução da população de bactérias do solo, em virtude de circunstâncias anaeróbias do solo (LI et al., 2003) e também dos fungos (PRITCHETT e FISHER, 1987). As bactérias aeróbias são a maioria no sistema de um solo, mas devido às condições anaeróbias do solo compactado são reduzidas em virtude da competição com microrganismos anaeróbios e anaeróbios facultativos (SYLVIA et al., 1998).

Com a compactação do solo, há uma diminuição da atividade microbiana como a respiração e as atividades enzimáticas, devido à escassez de oxigênio pela diminuição do espaço entre os poros, entretanto, algumas microrganismos podem fazer uso dessa condição do solo para aumentar suas atividades (WRONSKI e MURPHY, 1994; STARTSEV et al., 1998).

Com a mudança da porcentagem de macro e microporos, a compactação do solo pode causar deficiência de oxigênio reduzindo suas taxas de difusão que afetam as

atividades enzimáticas, tais como a catalase e fosfatase (GLINSKI et al., 1986; PAGLIAI e DENOBILI, 1993). Entretanto, uma elevada atividade da fosfatase foi encontrada nos solos compactados, indicando que algumas comunidades microbianas podem ser tolerantes ou resistentes a compactação do solo (BUCK et al., 2000; SHESTAK e BUSSE, 2005).

O efeito dos sistemas de manejo sobre a microbiota, porém, não se restringe a aspectos quantitativos, como as alterações na biomassa. A composição da comunidade microbiana também pode ser alterada, pois os grupos de microrganismos podem ser afetados diferentemente pelas práticas agrícolas de manejo. O preparo freqüente do solo, por exemplo, pode ocasionar o rompimento físico de hifas (CALDERÓN et al., 2001), prejudicando a população fúngica. Este manejo adotado com a cana-de-açúcar tem alterado as características químicas do solo, como o teor de carbono orgânico e suas frações (GOMES JÚNIOR, 1995; BLAIR, 2000).

Enzimas e atividades microbianas do solo são sensíveis a mudanças bruscas no ambiente, (BERGSTROM et al., 1998). Com a compactação do solo, as atividades microbianas são afetadas, assim, influenciam na viabilidade de nutrientes prescindíveis para o crescimento das plantas (LEE et al., 1996). Também em solos compactados, as mudanças nas atividades enzimáticas podem ser complicadas devido aos tipos de solo, retirada dos resíduos culturais e circunstâncias climáticas (DICK et al., 1988; LI et al., 2002). Segundo Dick et al. (1988) e Jordan et al. (2003) a compactação do solo reduz as atividades da fosfatase, amilase e desidrogenase, porém uma atividade elevada da fosfatase foi encontrada em solos compactados, sugerindo que as comunidades microbianas podem ser resistentes ou tolerantes a compactação do solo (BUCK et al., 2000; SHESTAK e BUSSE, 2005).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Experimento 1 – Sistema da cultura da cana-de-açúcar.**

As amostras de solo foram coletadas no mese de agosto de 2006, das Fazendas São João e Zaire de Catanduva, São Paulo, com coordenadas geográficas de 21°08'16" latitude sul e 48°58'22" longitude oeste de Greenwich, altitude de 503 m e clima classificado como tropical, com chuvas de verão e inverno seco. A temperatura anual variou entre 18° e 39° com média de 25,3°C, tendo umidade relativa do ar em torno de 70%. O solo de ambas as localidades foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média 15 a 35%. A variedade de cana-de-açúcar plantada no espaçamento de 1,4 m foi a RB 835486. Foram selecionados seis talhões destas fazendas com plantas de idades correspondentes do primeiro ao sexto corte da planta, que se estenderam do ano de 2000 a 2005.

### **3.1.1 Tratos culturais e amostragem na área de cana-de-açúcar**

Antes da introdução da cana planta alguns tratos culturais vieram a ser feitos no local da coleta (Tabelas 1). Foram aplicado calcário dolomítico (2,0 t ha<sup>-1</sup>) e gesso (1,5 t ha<sup>-1</sup>) em toda a área na profundidade de 30 cm dois meses antes do plantio. A adubação no sulco de plantio foi 40-120-120 kg ha<sup>-1</sup> de N-P-K e de 250 L ha<sup>-1</sup> de Agrolmin®. Após o terceiro corte da cana-de-açúcar, foram incorporados na entrelinha a 10 cm de profundidade 1,5 t/ha<sup>-1</sup> de calcário, 1,0 t ha<sup>-1</sup> de gesso, 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia) e 110 kg há<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio). A vinhaça foi aplicada em toda extensão do canavial com caminhão-tanque na quantidade de 60 m<sup>3</sup> nos tratamentos 1, 4, 5 e 6, e por canal na quantia de 250 m<sup>3</sup> nos tratamentos 2 e 3, durante os dois primeiros meses após o corte da cana-de-açúcar.

**Tabela 1.** Produção de cana-de-açúcar e tratos culturais\*

| Tratamentos | Ano de corte | Toneladas ha <sup>-1</sup> | Tratos culturais |
|-------------|--------------|----------------------------|------------------|
| 1           | 2000         | 128,09                     | Não queimada     |
| 2           | 2001         | 67,02                      | Queimada         |
| 3           | 2002         | 61,63                      | Queimada         |
| 4           | 2003         | 46,63                      | Não queimada     |
| 5           | 2004         | 77,49                      | Não queimada     |
| 6           | 2005         | 54,92                      | Não queimada     |

\*Fonte: Dados Usina Cerradinho Açúcar e Álcool.

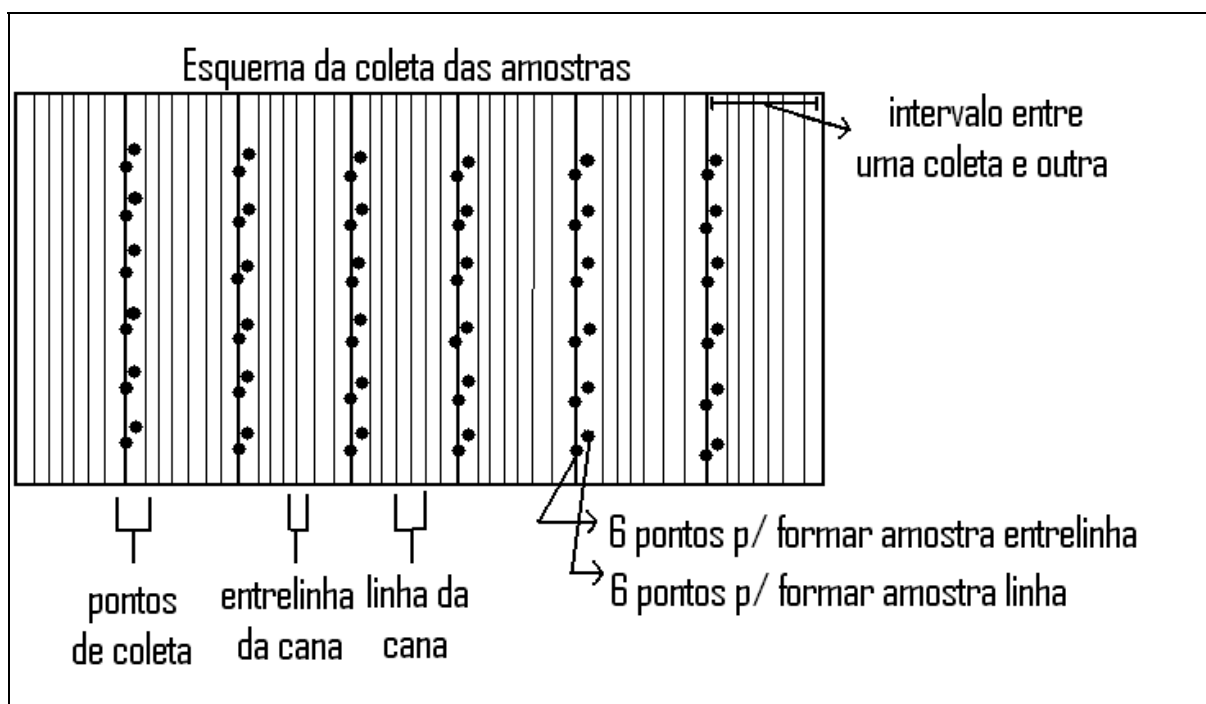
As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm, com o auxílio do trado holandês, na linha e entrelinha, distantes de 70 cm uma da outra, descontando 7 m de bordadura de cada talhão da cultura de cana-de-açúcar (Figura 1). A partir da extremidade do talhão, as parcelas foram selecionadas a cada seis linhas de plantio. As subamostras, em número de seis por parcela, eqüidistantes 3 m uma da outra e totalizando 72 subamostras por talhão, foram reunidas nas respectivas amostras. As amostras de solo foram peneiradas (2 mm de malha) e divididas em duas frações, sendo uma mantida em geladeira até o momento do uso para as análises microbiológicas e a outra seca ao ar (TFSA) e conservada em temperatura ambiente para as análises químicas. A composição química do solo pode ser apreciada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Características químicas do solo após sucessivos cortes de cana-de-açúcar.

| Cortes | Espaçamento | CRA   | pH  | M.O.                | P                    | K <sup>+</sup>                                | Ca <sup>2+</sup> | Mg | H+Al | SB   | T    | V  |
|--------|-------------|-------|-----|---------------------|----------------------|-----------------------------------------------|------------------|----|------|------|------|----|
|        |             |       |     | $\frac{g}{dm^{-3}}$ | $\frac{mg}{dm^{-3}}$ | -----mmol <sub>c</sub> /dm <sub>3</sub> ----- |                  |    |      |      |      | %  |
| 1º     | Entrelinha  | 38,34 | 5,8 | 11                  | 40                   | 2,9                                           | 28               | 9  | 13   | 39,9 | 52,9 | 75 |
|        | Linha       |       | 5,9 | 15                  | 46                   | 2,6                                           | 32               | 15 | 13   | 49,6 | 62,6 | 79 |
| 2º     | Entrelinha  | 41,83 | 5,2 | 15                  | 26                   | 2,0                                           | 18               | 10 | 20   | 30,0 | 50,0 | 60 |
|        | Linha       |       | 5,7 | 14                  | 20                   | 1,8                                           | 30               | 21 | 18   | 52,8 | 70,8 | 75 |
| 3º     | Entrelinha  | 41,25 | 5,3 | 12                  | 16                   | 1,5                                           | 14               | 9  | 16   | 24,5 | 40,5 | 60 |
|        | Linha       |       | 5,2 | 9                   | 21                   | 1,4                                           | 14               | 7  | 18   | 22,4 | 40,4 | 55 |
| 4º     | Entrelinha  | 34,72 | 5,7 | 9                   | 20                   | 2,2                                           | 19               | 10 | 12   | 31,2 | 43,2 | 72 |
|        | Linha       |       | 5,8 | 14                  | 24                   | 2,4                                           | 24               | 13 | 13   | 39,4 | 52,4 | 75 |
| 5º     | Entrelinha  | 40,75 | 5,3 | 15                  | 8                    | 3,2                                           | 15               | 8  | 18   | 26,2 | 44,2 | 59 |
|        | Linha       |       | 4,9 | 11                  | 9                    | 3,6                                           | 9                | 5  | 22   | 17,6 | 39,6 | 44 |
| 6º     | Entrelinha  | 40,75 | 5,7 | 10                  | 24                   | 5,2                                           | 25               | 12 | 15   | 42,2 | 57,2 | 74 |
|        | Linha       |       | 5,6 | 15                  | 24                   | 5,7                                           | 22               | 11 | 16   | 38,7 | 54,7 | 71 |

CRA: capacidade de retenção de água do solo; H+Al: acidez potencial do solo; SB: soma de bases do solo; T: capacidade de troca catiônica do solo; V: saturação por bases do solo.

**Figura 1.** Esquema da coleta de amostras de solo em cada corte de cana-de-açúcar.



### 3.1.2 Delineamento experimental e análise estatística

Para o delineamento experimental, utilizou-se um arranjo fatorial 6x2 cujos fatores foram: seis cortes de cana-de-açúcar e 2 espaçamentos (linha e entrelinha), com seis repetições para cada espaçamento. Os resultados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F. O teste Tukey ( $p < 0,05$ ) foi empregado para a comparação das médias. Para a análise estatística foi utilizado o programa SAS (1990). Os resultados das contagens foram transformados em  $\log(x + 10)$  em que  $x$  corresponde as variáveis estudadas e submetidas à análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Nas Tabelas e Figuras foram colocados os valores originais não transformados.

### **3.2 Experimento 2 – Sistema da cultura do milho.**

O experimento foi realizado na fazenda de ensino e pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/ FCAV), Jaboticabal (SP), com coordenadas geográficas aproximadas de 21°15'29" de latitude sul e 48°16'47" de longitude oeste de Greenwich, em altitude média de 614 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21 °C. A cultura presente nos tratamentos estudados foi a do milho híbrido triplo Máster de ciclo precoce. O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulinitico hipoferrico (LVd). Os tratamentos para o desenvolvimento do trabalho foram (D = densidade Mg m<sup>-3</sup>): a) solo não tráfegado (D = 1,35); b) uma passada (D = 1,62); c) uma passada (D = 1,66); d) duas passadas (D = 1,70); e) quatro passadas (D = 1,73); e f) seis passadas de máquina (D = 1,74), estas parcelas se apresentavam uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície.

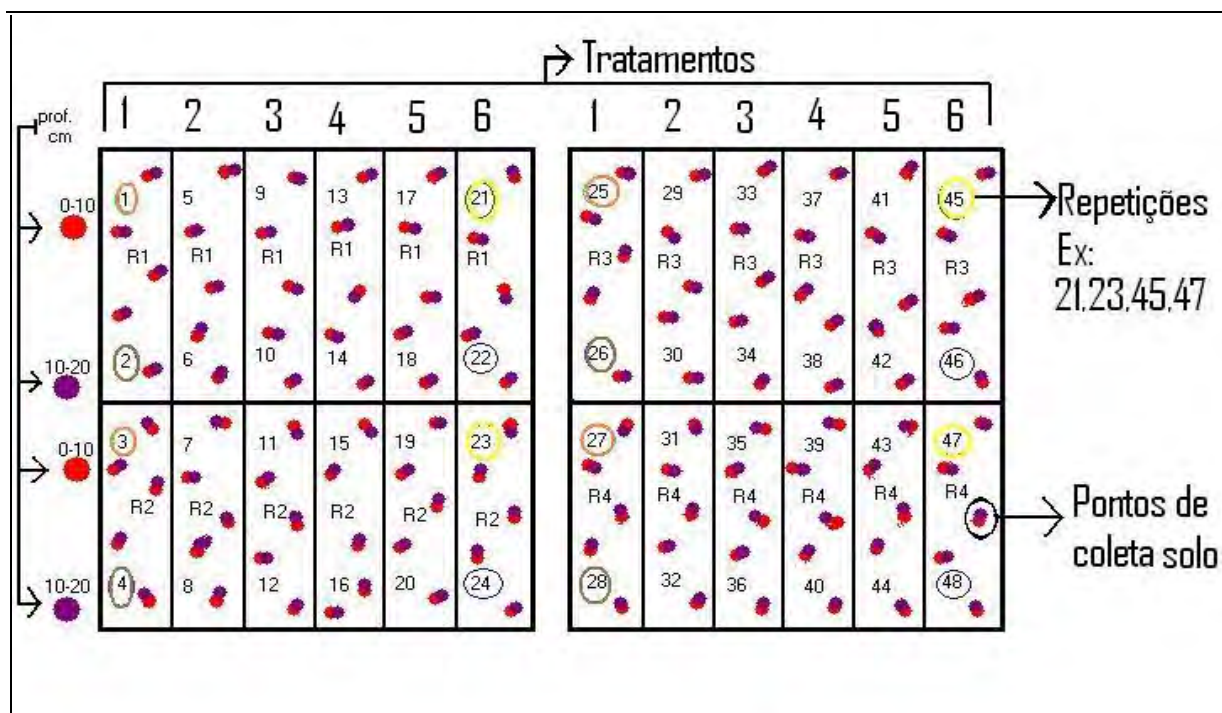
#### **3.2.1 Tratos culturais e amostragem na área do milho**

No mês de setembro de 2004 foi aplicado calcário para elevação da saturação por bases a 60 % o qual foi incorporado pela utilização de uma gradagem aradora. Antes da instalação do experimento, toda a área foi escarificada a 30 cm de profundidade, seguida de uma gradagem niveladora. Todas as parcelas experimentais apresentaram 2 metros de largura, com cinco linhas de milho com 3 m de comprimento. No dia 22 de novembro de 2004 foi semeado, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, o híbrido triplo de milho Máster, de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 8 a 10 sementes por metro, adubado com 0,3 Mg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10–20–20, para obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha<sup>-1</sup>, segundo Van Raij et al. (1987). A adubação de cobertura foi realizada 28 dias após a emergência das plântulas, utilizando-se 0,3 Mg ha<sup>-1</sup> de sulfato de amônio, quando as plantas estavam com sete a oito folhas.

Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com numero igual de vezes.

As amostras de solo foram coletadas em duas profundidades, 0-10 e 10-20 cm, utilizando-se trado holandês. Para cada parcela foram retiradas 5 amostras simples, que foram reunidas para formar uma amostra composta. Totalizando 8 amostras por tratamento, sendo 4 na camada de 0-10 e 4 na camada de 10-20 cm. As amostras coletadas foram trazidas para laboratório de Microbiologia Agropecuária, da FCAV – UNESP/Jaboticabal, onde foram peneiradas em peneira com 2 mm de malha. Cada amostra foi dividida em duas frações, sendo que uma parte foi mantida em geladeira até o momento do uso para as análises microbiológicas e a outra parte foi seca ao ar (TFSA) e conservada em temperatura ambiente para as análises químicas.

**Figura 2.** Esquema da coleta de amostras de solo compactado na cultura do milho.



### **3.2.2 Delineamento experimental e análise estatística**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas foram considerados os diferentes níveis de compactação e, nas subparcelas, as profundidades de amostragens do solo. Os resultados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F. O teste Tukey ( $p < 0,05$ ) foi empregado para a comparação das médias. Para a análise estatística foi utilizado o programa SAS (1990). Os resultados das contagens foram transformados em  $\log(x + 10)$  em que x corresponde as variáveis estudadas e submetidas à análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Nas tabelas e figuras foram colocados os valores originais não transformados.

## **3.3 Contagem de Microrganismos**

### **3.3.1 Meios de cultura**

Foram utilizados os seguintes meios de cultura para a contagem de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias e fungos totais, e do número mais provável (NMP) de bactérias nitrificantes e desnitrificantes:

a) Meio de Bunt e Rovira (1955), para contagem de UFC de bactérias totais:

| Compostos                                        | Quantidades |
|--------------------------------------------------|-------------|
| Glicose                                          | 5,0g        |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                  | 0,4g        |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 0,5g        |
| MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O             | 0,1023g     |
| MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O             | 0,2133g     |
| FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O             | 0,0170g     |
| CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O             | 0,1325g     |
| Peptona                                          | 1,0g        |
| Extrato de levedura                              | 1,0g        |
| Extrato de solo                                  | 250mL       |
| H <sub>2</sub> O                                 | 750mL       |
| Àgar                                             | 15,0g       |
| pH                                               | 7,4         |

b) Meio de Martin (1950), para contagem de UFC de fungos totais:

| Compostos                                 | Quantidades |
|-------------------------------------------|-------------|
| Glicose                                   | 10,0g       |
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$                  | 0,5g        |
| $\text{K}_2\text{HPO}_4$                  | 0,5g        |
| $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 0,5g        |
| Peptona                                   | 5,0g        |
| Extrato de levedura                       | 0,5g        |
| Rosa Bengala                              | 0,07g       |
| $\text{H}_2\text{O}$                      | 1000mL      |
| Ágar                                      | 15,0g       |
| pH                                        | 5,6         |
| Agrovet                                   | 100mg mL    |

- c) Meio de Schmidt e Belser (1982), para a contagem do NMP de bactérias nitrificantes:

| Compostos                       | Quantidades |
|---------------------------------|-------------|
| KNO <sub>2</sub>                | 0,008g      |
| CaCl <sub>2</sub>               | 0,013g      |
| MgSO <sub>4</sub>               | 0,04g       |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 0,034g      |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 0,023g      |
| FeSO <sub>4</sub>               | 0,0024g     |
| Edta Na                         | 0,033g      |
| NaMoO <sub>4</sub>              | 0,01g       |
| H <sub>2</sub> O                | 1000mL      |
| pH                              | 7,2         |
| • MnCl <sub>2</sub>             | 0,027g      |
| • CoCl <sub>2</sub>             | 0,0002g     |
| • ZnSO <sub>4</sub>             | 0,01g       |
| • CuSO <sub>4</sub>             | 0,002g      |

- Diluir em 100 mL depois pipetar 0,1 mL no meio de cultura.

Reagentes utilizados:

“Diazotizing” – 0,5 g de sulfanilamida em 100 mL de HCl 2.4 M. Estocar em vidro âmbar no refrigerador.

“Coupling” – 0,3 g N-(1-naphthyl)-ethylenediamida em 100 mL de HCl 0,12 M. Estocar em vidro âmbar no refrigerador

d) Meio de Alexander (1965), para a contagem do NMP de bactérias desnitrificantes:

| Compostos                               | Quantidades                  |
|-----------------------------------------|------------------------------|
| Solução A:                              |                              |
| KNO <sub>3</sub>                        | 1,0g                         |
| Asparagine                              | 1,0g                         |
| Solução alcoólica azul de bromotimol 1% | 5,0 mL (1g/100 mL de álcool) |
| H <sub>2</sub> O                        | 500mL                        |
| Solução B:                              |                              |
| Citrato de Na                           | 8,5g                         |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>         | 1,0g                         |
| MgSO <sub>4</sub>                       | 1,0g                         |
| CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O    | 0,40g                        |
| FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O    | 0,05g                        |
| H <sub>2</sub> O                        | 500mL                        |
| pH                                      | 7,0                          |

- Juntar solução A com solução B.

Para estimar o número de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias e fungos totais, além do número mais provável (NMP) de bactérias nitrificantes e desnitrificantes foi empregada a metodologia de diluição em série proposta por Wollum II (1982). Amostras de 10 g de solo foram suspensas em 95 mL de solução de pirofosfato de sódio 0,01%, e agitadas por 30 minutos em agitador horizontal. A partir das suspensões, foram realizadas diluições sucessivas com alíquotas de 1,0 mL, sendo transferidas para tubos de ensaio contendo 9 mL de solução de pirofosfato de sódio 0,1%.

O número de UFC de bactérias e fungos totais além do NMP de bactérias nitrificantes e desnitrificantes foi estimado utilizando-se 5 repetições por diluição

(variando de  $10^{-2}$  a  $10^{-7}$ ) por tratamento, com o emprego dos meios de cultura específicos. Após o procedimento da diluição foi realizado o plaqueamento “pour plate” em placas de Petri esterilizadas. O tempo de incubação foi de 24 horas para bactérias totais e 48 horas para fungos totais, 4 dias para bactérias nitrificantes e 7 dias para bactérias desnitrificantes, e após este período, foi feita a contagem do número de colônias existentes de bactérias e fungos totais, conforme Vieira e Nahas (2005), com o auxílio de uma lupa com aumento de 6 vezes, e do NMP conforme Alexander 1982, de bactérias nitrificantes e desnitrificantes.

Para estimar o NMP de bactérias nitrificantes foram transferidos 0,1 ml do meio de cultura inoculado para uma placa de vidro estéril que foi acrescida com uma gota do reagente “diazotizing” e outra gota do reagente “coupling”, quando positivo, passava do incolor para a cor rosa indicando a presença de nitrito. Já o NMP de bactérias desnitrificantes, foi verificado após 7 dias de incubação, onde a leitura foi feita observando cada tubo se houve a mudança da cor verde para o azul escuro, além de apresentar formação de gases.

### **3.4. Análises Microbiológicas**

#### **3.4.1 Carbono da biomassa microbiana**

Para a determinação do carbono da biomassa microbiana utilizou-se o método proposto por Vance et al. (1987). Foram pesados 10 g de solo úmido em béquer, sempre duas amostras, uma para ser fumigada e outra para ser extraída de imediato, considerando controle. A capacidade de campo foi ajustada para 60%. Para a fumigação, as amostras foram colocadas em dessecador, previamente forradas com papel de filtro úmido para manter a umidade, um béquer com aproximadamente 30 mL de água destilada e outro com 50 mL de clorofórmio isento de álcool e contendo perolas de vidro dispostas no seu interior. O conjunto foi submetido a vácuo por 5 minutos até o clorofórmio borbulhar. Em seguida, o dessecador contendo as respectivas amostras fumigadas foi mantido por 24 horas em estufa B.O.D. a 28°C. Após esse período foi

retirado do dessecador os béqueres com a água destilada e com o clorofórmio e, também, o papel de filtro umedecido, deixando apenas os béqueres contendo solo. A seguir foi realizado vácuo para a remoção dos vapores de clorofórmio. A extração das amostras fumigadas e não fumigadas foi feita transferindo-se o solo para erlenmeyer de 125 mL e adicionando-se 50 mL de solução extratora de sulfato de potássio 0,5 M. Foram agitados por uma hora em agitador horizontal e a mistura foi filtrada em papel de filtro, cujo filtrado foi armazenado em câmara fria até o momento da determinação. Para a determinação, foram pipetados 8 mL do filtrado em erlenmeyer de 125 mL, 2 mL de solução de dicromato de potássio 0,066 M, 5 mL de ácido ortofosfórico 88% e 10 mL de ácido sulfúrico 98%. A mistura foi submetida ao banho-maria em ebulição por uma hora. Com água destilada, o volume foi ajustado para 75 mL. Depois que a solução atingiu a temperatura ambiente, foram adicionados 3 gotas de solução de difenilamina 1% e titulou-se com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,033 M em solução de ácido sulfúrico 0,4 M, até a mudança da cor azul para verde garrafa. Em cada avaliação foi feito um branco com 8 mL de sulfato de potássio 0,5 M em substituição ao extrato de solo. O fator de conversão ( $K_c$ ) da biomassa microbiana foi de 0,33.

### **3.4.2 Atividade respiratória microbiana**

A atividade respiratória microbiana (carbono do  $\text{CO}_2$  liberado) foi determinada em 100 g de solo úmido colocado em um frasco com tampa com capacidade de 2,5 L, conforme Rezende et al. (2004), com o teor de umidade corrigido para 60 % da capacidade de retenção de água (CRA). Em cada frasco foram colocados 2 béqueres com capacidade de 50 mL cada, um contendo 20 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada e o outro contendo 20 mL de solução de NaOH 0,5 M. Os frascos foram vedados com filme plástico do tipo PVC seguidos da tampa e incubados a 30°C por 12 dias. A cada 2 dias retirou-se o béquer contendo NaOH 0,5 M, ao qual foram adicionados 2 mL de solução de cloreto de bário 30%, três gotas de solução de fenolftaleína 1%, titulando-se o mesmo com HCl 0,5 M, até a viragem da cor rosa escuro para incolor, de modo que a

determinação da quantidade de CO<sub>2</sub> produzida foi acumulativa. Dois frascos contendo seus respectivos béqueres sem o solo foram incluídos como controle.

### 3.4.3 Atividade nitrificante

A atividade nitrificante do solo foi determinada mediante o emprego da metodologia proposta por Schimdt e Belser (1994). Foram pesados 10 g de solo úmido em placas de petri, com duas repetições de cada amostra de solo, uma com e outra sem adição de 160 µg N-NH<sub>4</sub> ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) g<sup>-1</sup> solo seco. A capacidade de campo foi ajustada para 60%. Depois, as amostras foram mantidas em estufa BOD por 21 dias a 30°C. Após o período de incubação, 8 g de solo de cada amostra, com e sem N-NH<sub>4</sub>, foram pesadas e transferidas para erlenmeyer de 125 mL. A extração das amostras foi feita adicionando-se 50 mL de solução extratora, cloreto de potássio (KCl) 1 M. Agitou-se por uma hora em agitador horizontal e filtrou-se a mistura em papel de filtro, cujo filtrado foi armazenado em câmara fria até o momento da determinação. Para a determinação por titulação, foi utilizado o método proposto por Keeney e Nelson (1982). Para a determinação do amônio (NH<sub>4</sub>), em tudo digestor com saída lateral, foram acrescentados 10 mL do filtrado que foi levado ao digestor onde foi acrescentado pela saída lateral do tubo, 0,2 g de óxido de magnésio. Em seguida, foram recolhidos 40 mL em erlenmeyer de 50 mL contendo 5 mL de solução indicadora, previamente pipetada. Titulou-se o destilado com solução de ácido sulfúrico 0,0025 M até a mudança da cor verde para rosa. Utilizando-se as mesmas amostras que estavam nos tubos digestores com saída lateral e, após o seu resfriamento, foi acrescentado 1 mL de ácido sulfâmico que foi levado ao destilador onde foi acrescentado, pela saída lateral do tubo, 0,2 g de liga devarda. Em seguida, recolheu-se 40 mL em erlenmeyer de 50 mL contendo 5 mL de solução indicadora, previamente pipetada. Titulou-se o destilado com solução de ácido sulfúrico 0,0025 M até a mudança da cor verde para rosa. Determinou-se assim a presença de nitrato (NO<sub>3</sub>) nas amostras. O mesmo procedimento foi utilizado tanto para as amostras com e sem N. Em cada avaliação determinou-se um branco substituindo-se o extrato por 10 mL de cloreto de potássio (KCl) 1M.

#### **3.4.4 Atividade solubilizadora de fosfato**

Para a atividade solubilizadora do solo, foram pesados 10 g de solo úmido em placas de petri, com duas repetições de cada amostra de solo, uma sem e outra com adição de 38,4 mg de fluorapatita (32,8% de P)  $\text{g}^{-1}$  de solo seco para cada amostra. A capacidade de campo foi ajustada para 60%. As amostras foram mantidas em estufa BOD por 30 dias a 30°C. Para a extração e determinação de fosfato solúvel foi utilizado o método proposto por Watanabe e Olsen (1965). Após incubação foi retirado 0,6 g de solo de cada amostra, com e sem P, foram pesadas e transferidas para um erlenmeyer de 125 mL. A extração das amostras foi feita adicionando 12 mL de solução extratora de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0,5 M pH 8,5. Agitou-se por 30 minutos em agitador horizontal e filtrou-se a mistura em papel de filtro Whatman n° 42, cujo filtrado foi armazenado em câmara fria até o momento da determinação. Foram pipetados 2 mL do filtrado em tubo de ensaio, adicionando-se 0,2 mL de solução de ácido sulfúrico 5 N e 0,8 mL de reagente B. Todos os tubos foram agitados e submetidos a incubação e banho-maria a 45°C por vinte minutos. Após a incubação, a leitura das amostras foi feita em espectrofotômetro no comprimento de onda de 820 nm. O mesmo procedimento foi utilizado para os dois tipos de amostras (sem e com a adição de P). Em cada avaliação foi feito um branco com 2 mL de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0,5 M pH 8,5 em substituição ao extrato de solo.

#### **3.4.5 Atividade enzimática da urease**

A determinação da atividade da urease foi realizada com base na metodologia de McGarity e Myers (1967). Pesando 2,0 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em tubo de 18x180 mm, acrescentando-se 0,2 mL de tolueno que ficou em repouso por 15 minutos, e foram adicionados 2 mL de tampão fosfato 0,1M - pH 6,7 e como substrato 1 mL de solução de uréia a 10% e incubou-se a 37 °C em banho-maria por 3 horas. Após incubação acrescentaram-se 3 mL de água destilada. Após a centrifugação (10.000 rpm

por 10 minutos), foram pipetados 0,1 mL do centrifugado, em tubos de ensaio. Adicionando-se 2,1 mL de água destilada, 0,5 mL de fenolato e 0,3 mL de hipoclorito 0,9 % de cloro ativo. Os tubos foram agitados vigorosamente, incubando-se novamente, agora em temperatura ambiente por 60 minutos e realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 630 nm. Os resultados foram calculados a partir de uma curva padrão com solução de sulfato de amônia.

#### **3.4.6 Atividade enzimática da fosfatase ácida**

A atividade da fosfatase ácida foi determinada segundo a metodologia de Tabatabai e Bremmer (1969). Foi pesado 0,2 g de solo seco em tubo de ensaio de 18x180 mm, adicionou-se 4 ml de tampão acetato 0,1 M pH 5,4. Acomodaram-se os tubos em banho-maria a 37 °C e após o equilíbrio da temperatura, 5 minutos, adicionou-se, exceto nos tubos controle, 1 mL de solução de p-nitrofenilfosfato 30 mM, agitou-se levemente os tubos e 18 incubou-se por 60 minutos em banho-maria a 37 °C. Após o tempo de incubação acrescentou-se 1 mL de solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) 0,5 M e 4 mL de solução de hidróxido de sódio 0,5 M, agitou-se vigorosamente em agitador de tubos, filtrou-se em papel de filtro Whatman n° 12. Na sequência realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 405 nm. Através da realização da curva padrão com concentrações crescentes de solução de p-nitrofenol, calculou-se a quantidade de fosfato produzido com a reação enzimática. A atividade da fosfatase foi expressa em  $\mu\text{g}$  de p-nitrofenol (PNF) liberado  $\text{g}^{-1}$  solo por hora.

#### **3.4.7 Atividade enzimática da desidrogenase**

A atividade da desidrogenase foi obtida através do método de Casida et al. (1977). Pesando 6,0 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em tubo de ensaio de 18x180

mm, misturou-se 0,06 g de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Após isso foi adicionado 0,5 mL de TCC 3% (tetrazolium cloreto de sódio), acrescentou-se 1 mL de água destilada para formação de um filme de líquido na superfície do solo. Agitação leve do tubo com as mãos, incubando-se a 37 °C por 24 horas. Após incubação, o solo foi lavado com 5 mL de metanol, filtrando em papel chupão. Em seguida, realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 485 nm. Através da realização da curva padrão com concentrações crescentes de solução de TFF (trifenilformazan), calculou-se a quantidade de TFF produzido com a reação enzimática.

### **3.5 Análises Químicas do Solo**

#### **3.5.1 Umidade do solo**

A porcentagem de umidade foi determinada após secagem do solo a 105°C por 24 horas em cadinho de porcelana previamente pesado vazio e contendo o solo úmido. Depois de retirados da estufa, os mesmos foram colocados imediatamente em dissecador com sílica indicadora de umidade e foram novamente pesados com o solo seco. A porcentagem de umidade foi dada pelo cálculo da subtração da amostra úmida menos a amostra seca multiplicado por 100 e dividido pelo valor da amostra úmida.

#### **3.5.2 Matéria orgânica do solo**

O solo utilizado na determinação do percentual de umidade foi incinerado em mufla a 550°C por 24 horas. Após a retirada dos cadinhos da mufla, estes foram colocados imediatamente em dissecador com sílica indicadora de umidade. Em seguida foram pesados com a amostra queimada. Obteve-se o teor de matéria orgânica (g/100g) pelo cálculo da subtração da amostra seca menos a amostra queimada multiplicado por 100 e dividido pela amostra seca.

#### **3.5.3 pH do solo**

O pH do solo foi determinado através do método proposto por Van Raij et al. (1987). Foram adicionados 10 mL de solo seco em 25 mL de solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) 0,01 M em erlenmeyer de 125 mL repousando por 15 minutos para melhor uniformizar cada amostra amostra. Em seguida, as amostras foram agitadas vigorosamente por 5 minutos em mesa agitadora e após permanecerem por 30 minutos em repouso a leitura foi realizada com uso de eletrodo do pHmetro que foi introduzido no sobrenadante.

#### **3.5.4 Capacidade de retenção de água do solo**

A capacidade de retenção de umidade do solo foi realizada pesando-se o recipiente para determinação da capacidade de retenção (Peso1), colocou-se TFSA peneirada (2,0 mm) neste recipiente, pesou-se novamente o mesmo (Peso 2). O recipiente foi imerso em um frasco contendo água de modo a alcançar metade da sua altura. Deixou-se umedecer a superfície do solo no recipiente, aguardando até ser observado à umidade na superfície, diante disso retirou-se o recipiente do frasco com água e colocou sobre papel absorvente para escorrer a água por 24 horas tampando o recipiente com papel alumínio para evitar a evaporação da água. Após as 24 horas foi pesado o recipiente sem o papel alumínio (Peso 3). O quanto de água que o solo reteve foi determinado através da subtração do Peso 3 menos o Peso 2.

#### **3.5.5 Composição química do solo**

A composição química do solo foi determinada seguindo metodologia proposta por Van Raij e Quaggio (1983) (Tabela 1), realizada no Departamento de Solos e Adubos da UNESP/Jaboticabal.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.

As variações nas contagens de microrganismos e nas suas atividades observadas devem ter resultado da influência de parâmetros físico-químicos após os seis cortes sucessivos da cana-de-açúcar, bem como dos tratos culturais ao longo de cada corte.

As contagens de microrganismos do solo submetido ao efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar apresentam variações decorrentes dos cortes e bem como dos locais de retiradas das amostras, linha e entrelinha tendo uma maior contagem na linha da plantio da cana-de-açúcar.

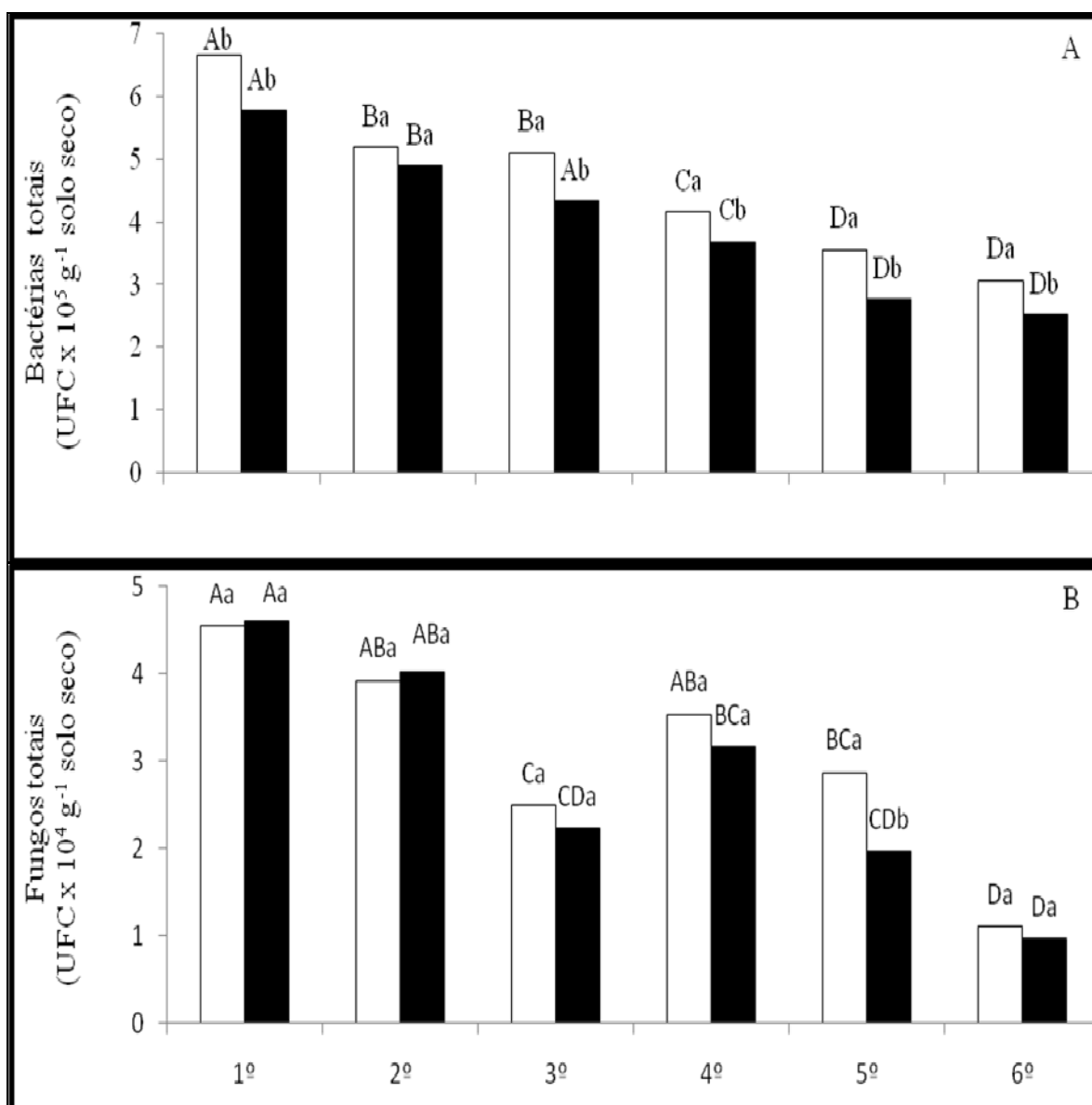
Quando se comparou o primeiro com o sexto corte da cana, estes resultados mostram que o número de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias e fungos totais decresceu em média entre os cortes em 55 e 77% (Figura 3 A-B). Os resultados das contagem de bactérias e fungos totais, com a análise estatística apresentados nas Tabelas 3 e 4 (página 60 e 61), respectivamente mostram que este decréscimo foi significativo.

Quando comparadas as contagens entre a linha e a entrelinha de plantio, esta redução foi significativa (Tabelas 3 e 4, página 60 e 61), da ordem de 8 e 13% para bactérias e fungos totais, respectivamente (Figura 3 A-B).

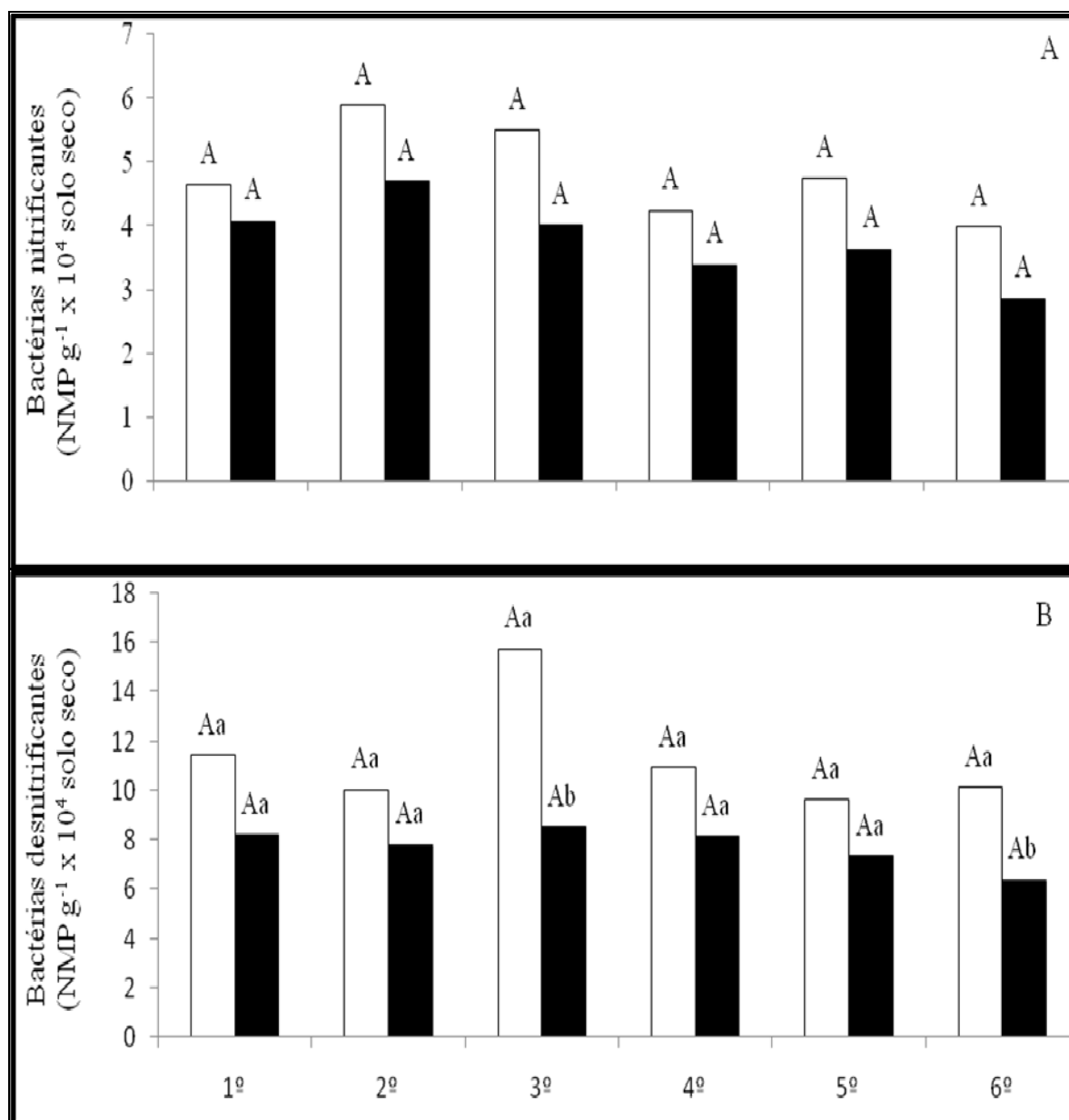
O número de bactérias nitrificantes e de desnitrificantes aumentou após o segundo e/ou terceiro corte e depois diminuiu (Figura 4 A-B; Tabelas 5 e 6, página 61 e 62). Essa redução entre os cortes foi de 22 e 17% respectivamente. Quando se comparam as contagens destes microrganismos entre a linha e a entrelinha de plantio verificou-se redução de 22 e 32%, que foi apenas significativa para as contagens de bactérias desnitrificantes.

As quantidades de carbono da biomassa microbiana e da atividade respiratória determinadas após o primeiro e até ao sexto corte também sofreram uma diminuição ao longo dos seis cortes, decrescendo significativamente, de 43% e 39%, respectivamente

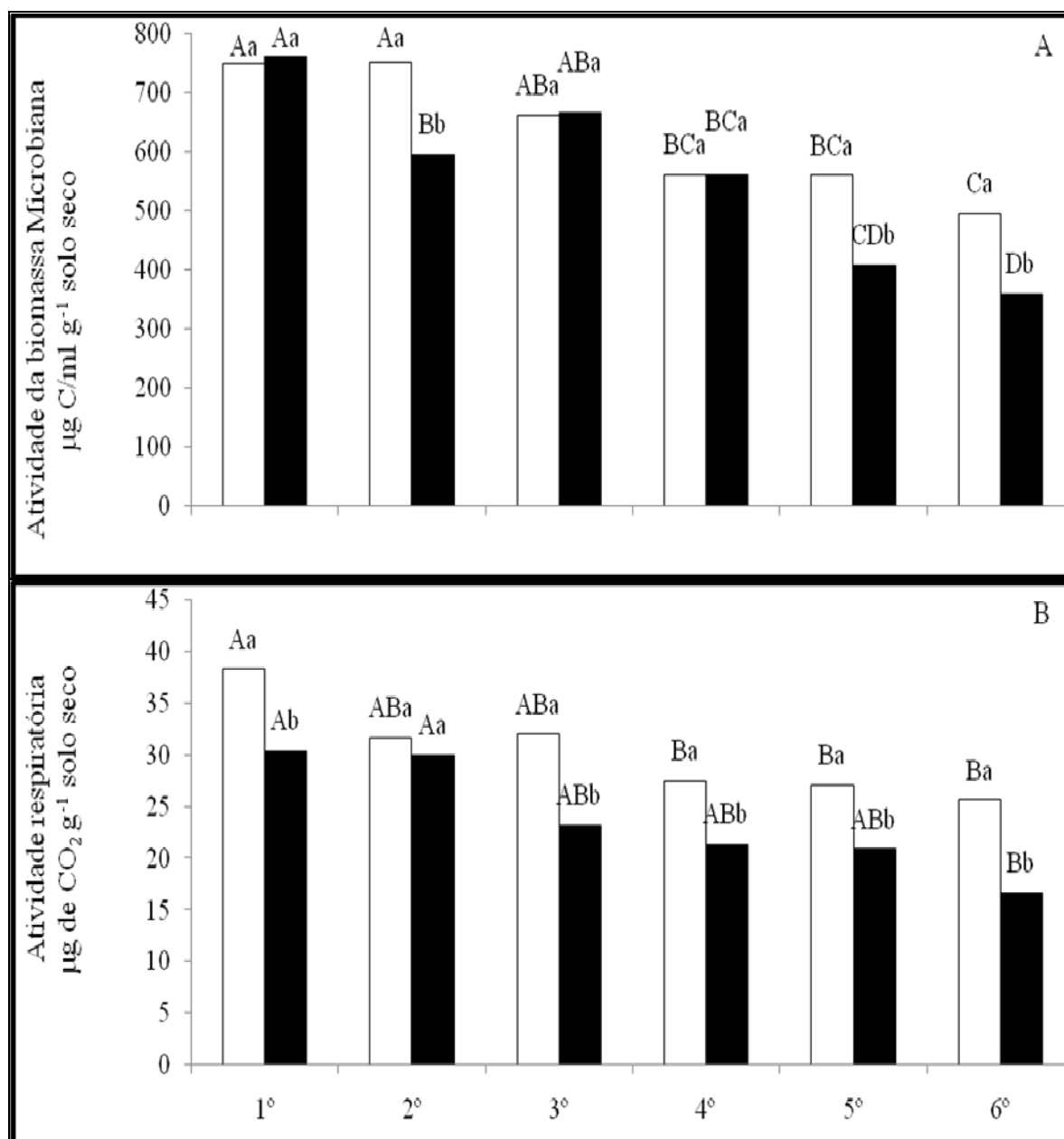
(Figura 5 A-B; Tabelas 7 e 8, página 62 e 63) acompanhando algumas contagens de microrganismos. Significativo decréscimo foi verificado nos resultados observados entre a linha e entrelinha de plantio de 11% (C da biomassa microbiana) e 24% (atividade respiratória).



**Figura 3.** Contagem de (UFC) bactérias totais (A) e fungos totais (B) do solo sob o efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar, espaçamento (□) linha; (■) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 4.** Contagem de (NMP) bactérias nitrificantes (A) e bactérias desnitrificantes (B) do solo sob efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar, espaçamento ( □ ) linha; ( ■ ) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

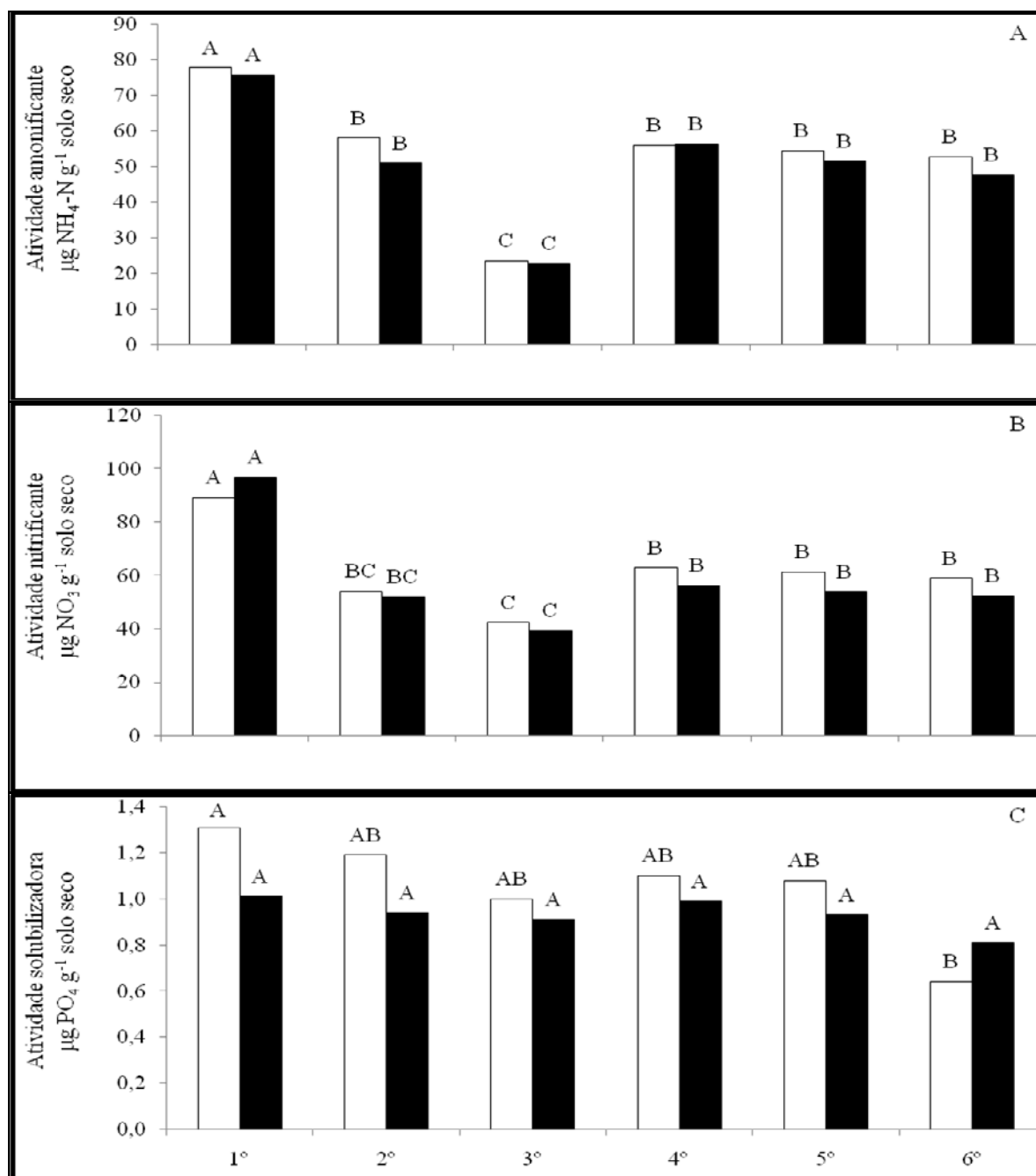


**Figura 5.** Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar no Carbono da biomassa microbiana (A) e na atividade respiratória (B) do solo, espaçamento ( □ ) linha; ( ■ ) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

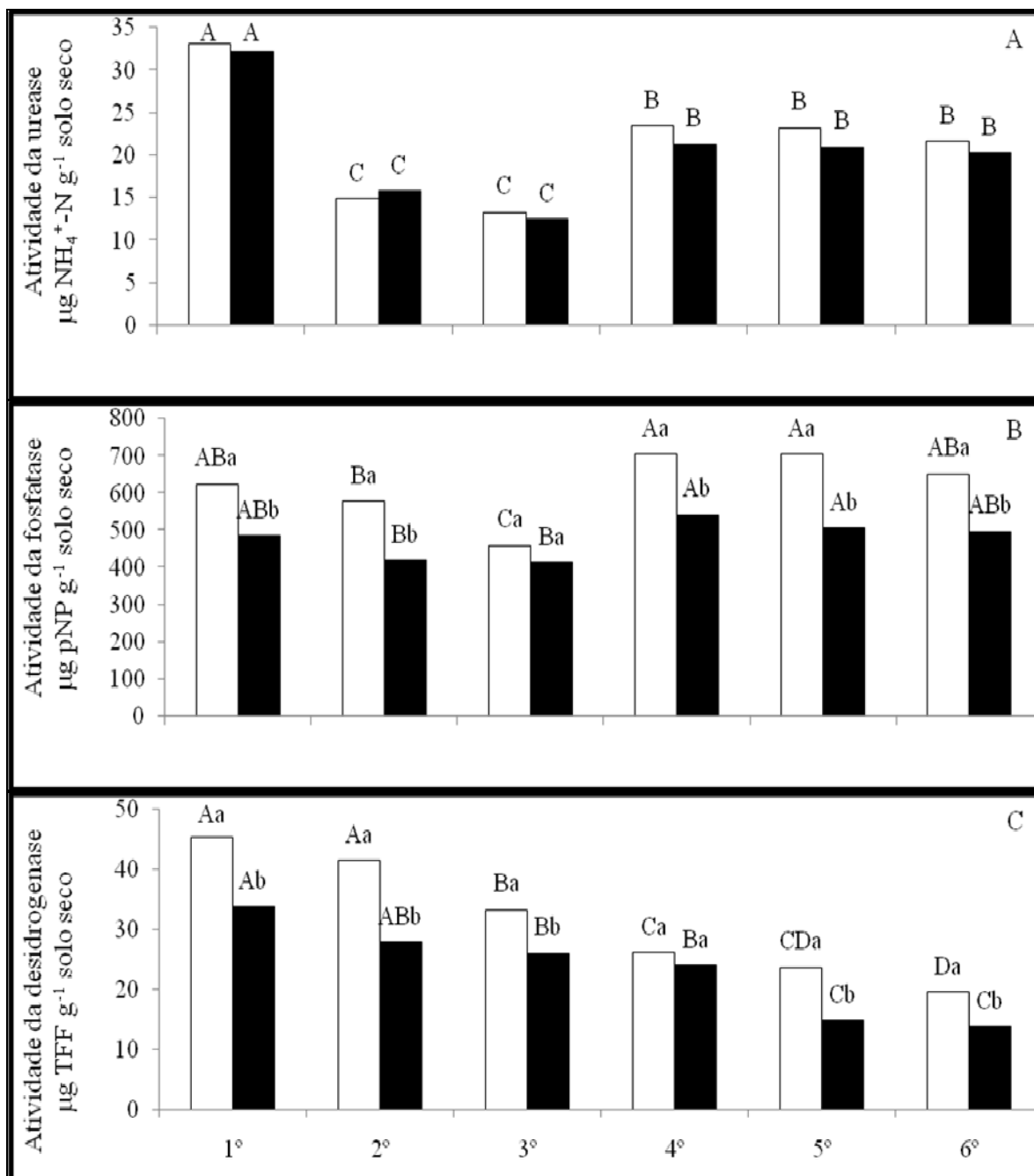
O efeito da seqüência de cortes de cana-de-açúcar mostrou uma tendência apontada nos resultados anteriores de diminuição progressiva das atividades amonificante, nitrificante e solubilizadora do solo que variou de 35 a 40% (Figura 6 A-B-C; Tabelas 9, 10 e 11, página 63 e 64). Excetuando a atividade solubilizadora na entrelinha, o decréscimo dos demais resultados foi significativo ( $p < 0,05$ ). A variação entre os resultados da linha e entrelinha foi de 5 a 11%, porém nenhuma diferença significativa foi encontrada.

As atividades enzimáticas (Figura 7 A-B-C; Tabelas 12, 13 e 14, página 65 e 66) avaliaram o impacto da seqüência dos cortes da cana-de-açúcar nas atividades da desidrogenase, urease e fosfatase ácida do solo. Excetuando a fosfatase ácida, a atividade das demais enzimas decresceu sucessivamente como visto nos resultados anteriores, em média de 36 a 58%. A atividade da fosfatase ácida diminuiu significativamente até o 3º corte da cana-de-açúcar e depois aumentou para valores próximos aos observados após o 1º corte. Os resultados observados na linha diminuíram ( $p < 0,05$ ) da linha de plantio para a entrelinha de 5 a 26%.

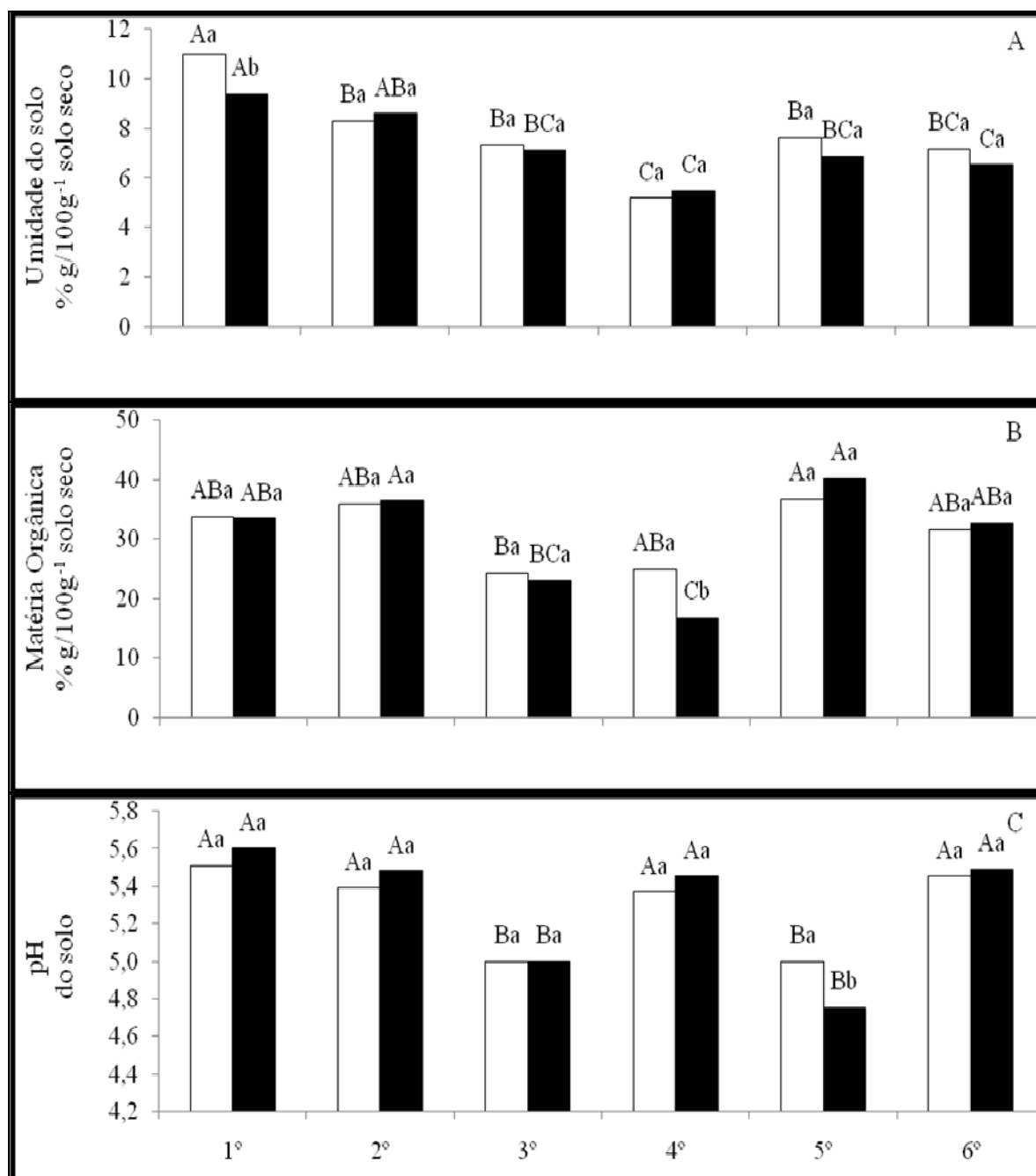
Respostas diferentes foram verificadas do efeito dos diferentes cortes de cana-de-açúcar sobre o conteúdo do pH, umidade e matéria orgânica (Figura 8 A-B-C; Tabelas 15, 16 e 17, página 66 e 67), o pH que teve uma diminuição apenas de 1,5% em relação aos cortes de cana-de-açúcar, a umidade diminuiu significativamente de 33% em média quando se comparou o primeiro e o sexto corte da cana-de-açúcar e maiores teores de matéria orgânica foram encontrados nos últimos cortes isto talvez pelo acúmulo de palhada no solo durante toda as safras. Nestas variáveis os resultados só foram significativos ( $p < 0,05$ ) em se tratando dos espaçamentos para a umidade que decresceu da linha para a entrelinha em 5,5%.



**Figura 6.** Influência dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade amonificante (A), atividade nitrificante (B) e atividade solubilizadora (C) do solo, espaçamento (□) linha; (■) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 7.** Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar na atividade da enzima urease (A), fosfatase ácida (B) e desidrogenase (C) do solo, espaçamento (□) linha; (■) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 8.** Conteúdo de água (A), matéria orgânica (B) e pH (C) do solo sob o efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar, espaçamento (□) linha; (■) entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas (cortes) e minúsculas (linha/entrelinha), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

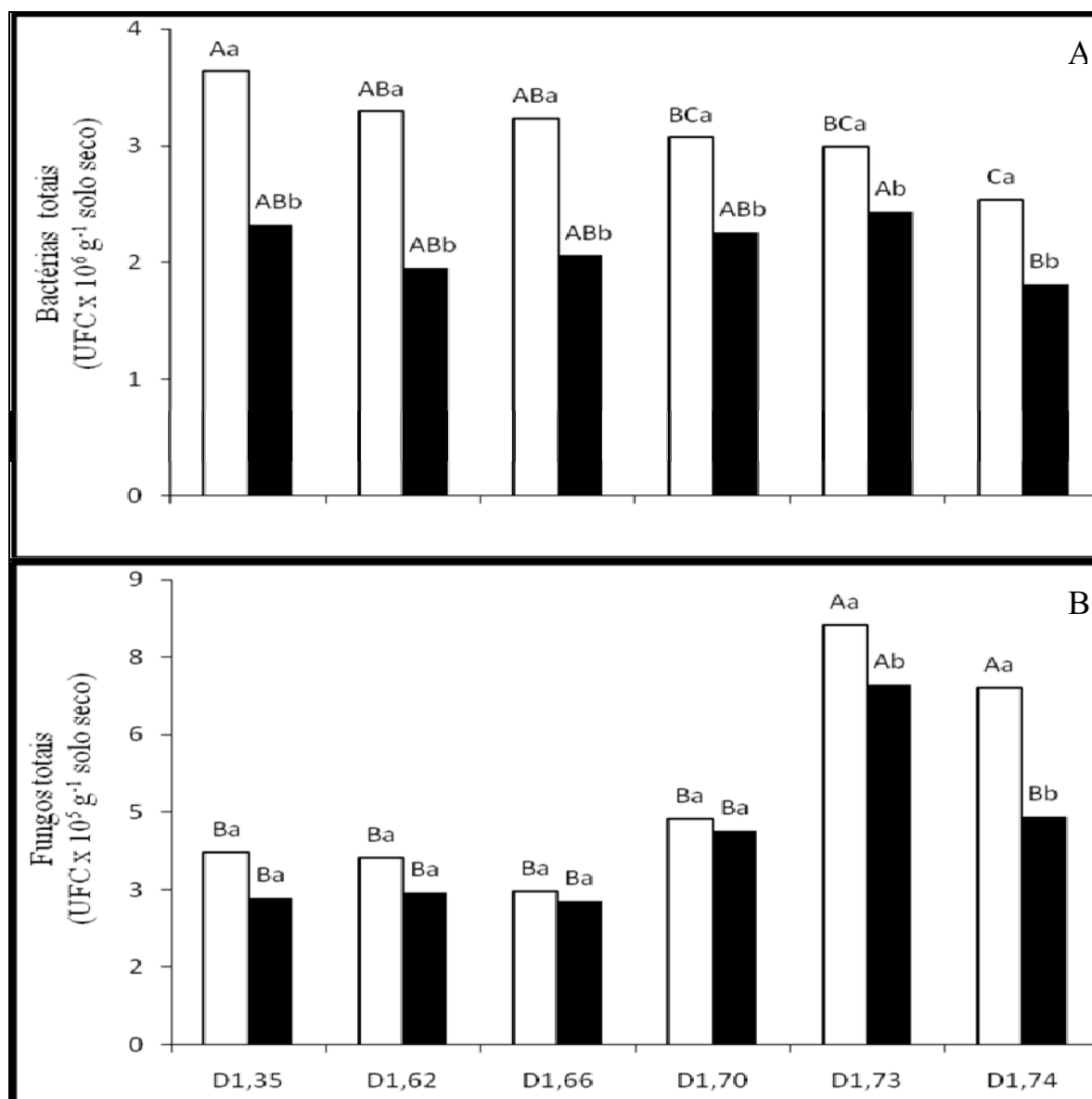
## 4.2 Efeito da compactação do solo na cultura do milho.

Os resultados obtidos mostraram que as variáveis microbiológicas são medidas sensíveis para determinar mudança na cultura estudada. Variações nas contagens de microrganismos e nas atividades enzimáticas observadas devem ter resultado da influência da compactação do solo e da profundidade de amostragem além de parâmetros físico-químicos estudados.

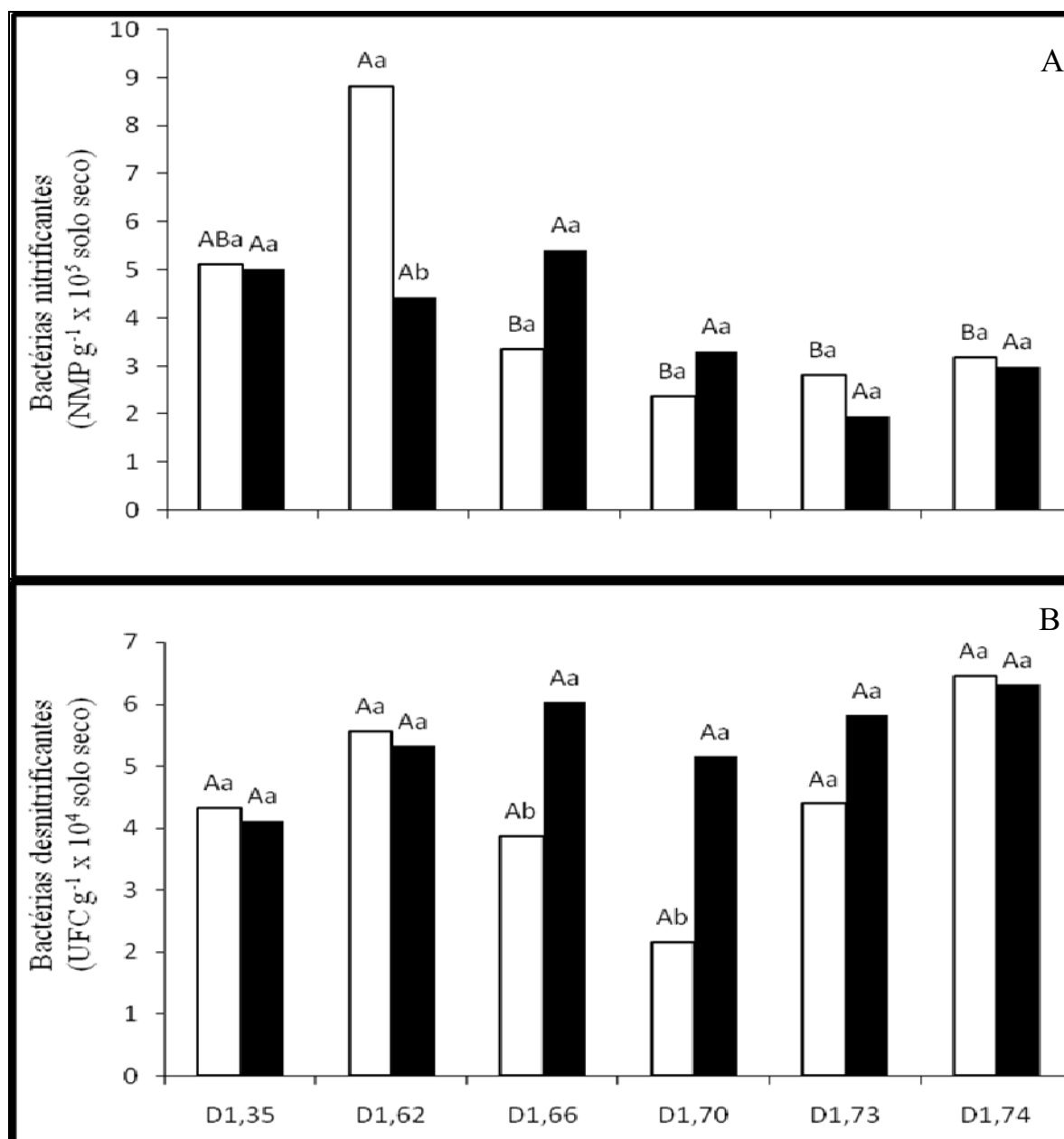
Entre os tratamentos estudados, analisando os diferentes níveis de compactação descritos com menor densidade ( $D_{1,35}$ ) até a maior densidade ( $D_{1,74}$ ), estes resultados mostram que o número de microrganismos decresceu entre os respectivos tratamentos em 26% para as contagens de bactérias totais, (Figura 9 A-B, Tabelas 18 e 19, página 68 e 69) 21% para as contagens de bactérias desnitrificantes, contudo não seguiu a mesma tendência para as contagens de bactérias nitrificantes (Figura 10 A-B, Tabelas 20 e 21, página 69 e 70), e fungos totais que aumentaram do solo com menor densidade ( $D_{1,35}$ ) até o solo com maior densidade ( $D_{1,74}$ ) em 48 e 75% respectivamente. Estes valores foram significativos (Tukey  $p < 0,05$ ) para todas as contagens dos microrganismos. Quando comparados os resultados da camada 0-10 cm, houve uma diminuição ( $p < 0,05$ ) em relação à camada de 10-20 cm em 26% para a contagem de bactérias totais, 21% para a contagem de bactérias nitrificantes e 23% para a contagem de fungos totais, o mesmo não se constatou para a contagem de bactérias desnitrificantes que aumentou na maior profundidade 10 – 20 cm em 22%, isso talvez devido ao baixo nível de oxigênio nesta profundidade do solo.

Analisando-se o impacto do aumento do nível de compactação do solo nas atividades das enzimas desidrogenase, urease e fosfatase ácida no solo, (Figura 11 A-B-C; Tabelas 22, 23 e 24, página 70 e 71), verificou-se que as atividades de todas as enzimas diminuíram significativamente do solo menos denso ( $D_{1,35}$ ), para o solo com maior densidade ( $D_{1,74}$ ). Com exceção da enzima urease, as atividades da desidrogenase e fosfatase ácida decresceram sucessivamente em 27% entre as densidades do solo  $D_{1,35}$  e  $D_{1,74}$ , acompanhando os resultados apresentado na contagem de bactérias. A atividade da urease diminuiu 45% entre as densidades

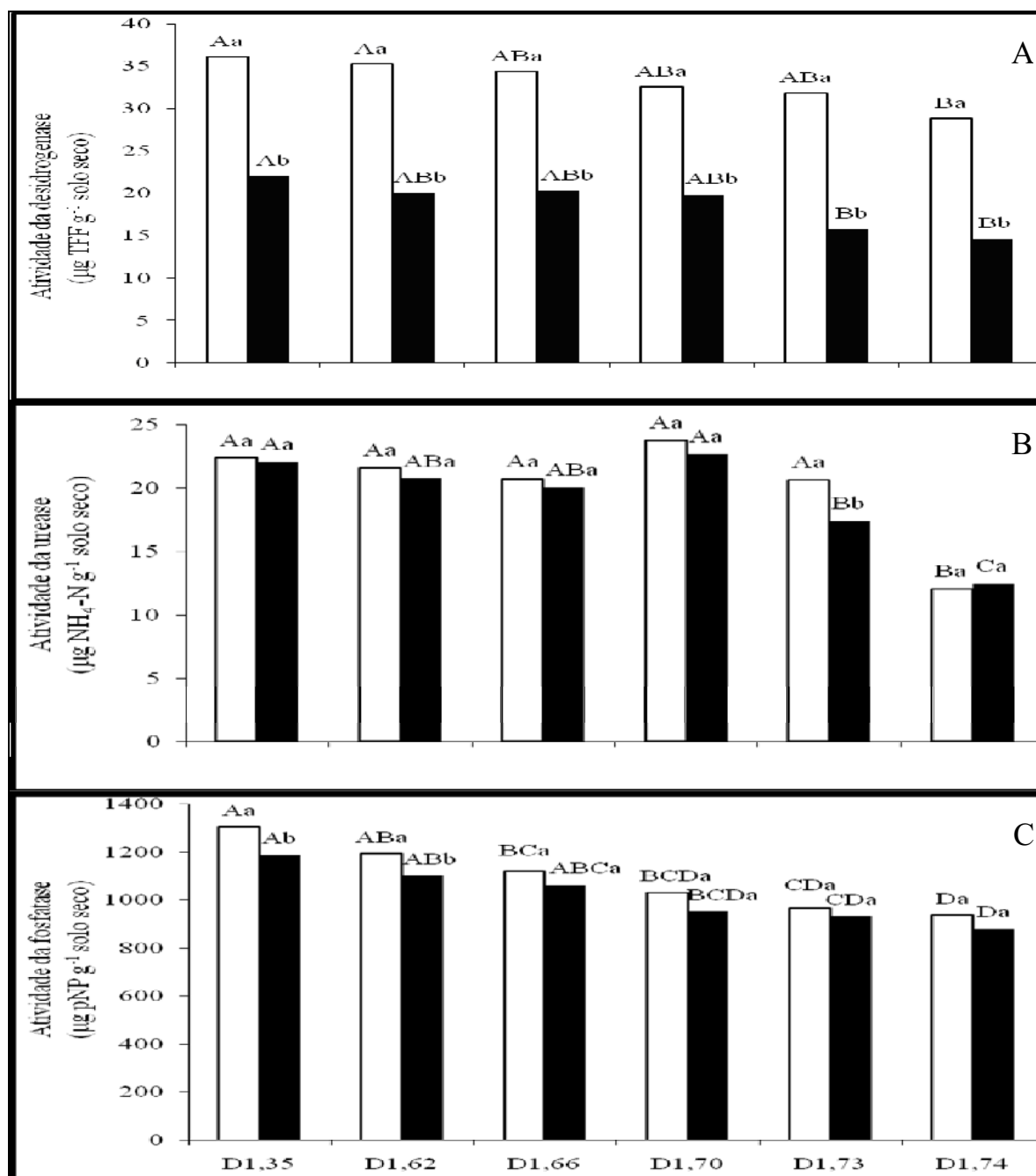
estudadas, porém, com decréscimos seccionados das densidades  $D_{1,35}$  à  $D_{1,66}$  em 8% e das densidades  $D_{1,70}$  à  $D_{1,74}$ , diminuindo significativamente em 49%. Os resultados observados na camada 0-10 cm diminuíram ( $p < 0,05$ ) em relação à camada de 10-20 cm em 43% para a atividade da enzima desidrogenase, 5% para a urease e 7% para a fosfatase ácida.



**Figura 9** – Contagem de (UFC) bactérias totais (A) e fungos totais (B) do solo sob o efeito de compactação, profundidades 0–10 ( □ ) e 10–20 cm ( ■ ). Médias seguidas de mesma letra, maiúscula (densidade) e minúscula (profundidade), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



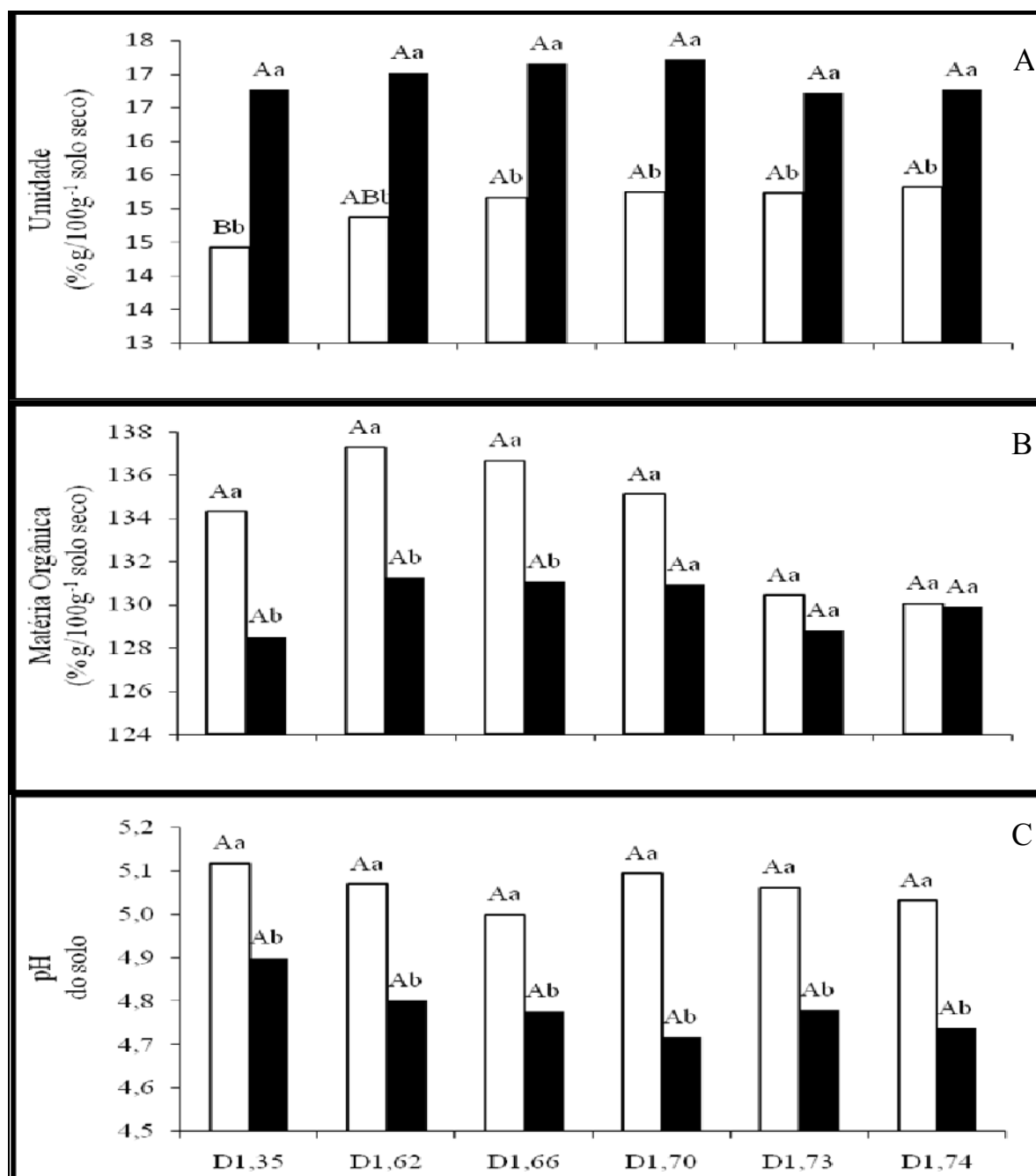
**Figura 10** – Contagem de (NMP) bactérias nitrificantes (A) e desnitrificantes (B) do solo sob o efeito de compactação, profundidades de 0–10 (□) e 10–20 cm (■). Médias seguidas de mesma letra, maiúscula (densidade) e minúscula (profundidade), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 11** - Atividade da desidrogenase (A), urease (B) e da fosfatase ácida (C) do solo sob efeito de compactação, profundidades 0–10 (□) e 10–20 cm (■). Médias seguidas de mesma letra, maiúscula (densidade) e minúscula (profundidade), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Outras respostas foram verificadas sobre o efeito do aumento do nível de compactação do solo sobre os conteúdos de umidade, matéria orgânica e pH (Figura 12 A-B-C; Tabelas 25, 26 e 27, página 72 e 73).

Os valores apresentados destas variáveis não diminuíram significativamente quando se comparados aos 6 níveis de compactação estudados, onde o teor de matéria orgânica do solo teve uma redução de 1%, o valor do pH de 2,5% enquanto que a umidade aumentou até o solo mais denso  $D_{1,74}$  em 3%, acompanhando estes valores não significativos entre as densidades do solo os valores obtidos entre as profundidades também não se diferiram onde a camada de 0 – 10 cm teve maiores valores para matéria orgânica 3%, pH 5.5% e para umidade do solo onde se observou um aumento na camada de 10 – 20 cm de 13%.



**Figura 12** – Conteúdo de água (A), matéria orgânica (B) e pH (C) do solo sob efeito de compactação, profundidades 0–10 ( ) e 10–20 cm ( ). Médias seguidas de mesma letra, maiúscula (densidade) e minúscula (profundidade), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

## **5. DISCUSSÃO**

### **5.1 Efeito dos sucessivos cortes de cana-de-açúcar.**

O sistema idealizado para maximizar a produção de sacarose baseado em seis colheitas sucessivas da cana-de-açúcar influenciou significativamente a maioria dos resultados de contagem dos microrganismos e dos processos microbianos estudados no solo. A tendência geral observada durante os sucessivos cortes de cana-de-açúcar é de decréscimo do número microrganismos e das atividades microbianas do solo. De modo geral, reduções nos parâmetros estudados foram verificadas entre a linha e a entrelinha de plantio da cana.

Alguns fatores decorrentes da condução da cultura podem ser relacionados e provavelmente influenciaram os resultados obtidos. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil é uma das mais evoluídas do mundo e é baseada na mecanização acarretando tráfego intenso de maquinaria. As condições do solo, mais compactadas, que favorecem este tráfego, desfavorecem o desenvolvimento das culturas, pois afetam o crescimento da planta e a produção de biomassa (TAVARES FILHO et al., 2001; STRECK et al., 2004).

As modificações que ocorrem na estrutura do solo são evidenciadas por alterações nos valores de densidade do solo, resistência mecânica à penetração, porosidade total, porosidade de aeração, armazenagem e disponibilidade de água às plantas, dinâmica de água na superfície e no seu perfil, assim como a consistência e a máxima compactabilidade do solo (KLEIN et al., 1998). Assim, o cultivo da cana-de-açúcar por até quatro anos acarretou aumento da compactação decorrente do tráfego de máquinas e conseqüentemente aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade (CENTURION et al., 2007). Além do aumento da densidade, a infiltração de água na entrelinha de plantio de cana foi diminuída (BRAUNACK et al., 2006). Possivelmente, este efeito acarretou menor conteúdo de umidade na entrelinha em relação à linha neste estudo e conseqüentemente os resultados das contagens e atividades microbianas.

Enquanto a diminuição das contagens de bactérias e fungos totais foi progressiva e bastante acentuada, variando entre 55 e 77%, respectivamente, após o primeiro e sexto corte da cana-de-açúcar, o decréscimo do NMP de bactérias nitrificantes (22%) e desnitrificantes (17%) foi menos marcante. O número de bactérias, fungos e actinomicetos diminuíram de 26 a 39% em solo com densidade alterada por compactação (LI et al., 2002). Esta redução nas contagens de microrganismos pode ser atribuída ao aumento da compactação do solo e à limitação do brotamento e crescimento das raízes (GROLEAU-RENAUD et al., 1998). Com isso, há redução da produtividade e da secreção de exsudatos necessários acompanhada pela diminuição do crescimento microbiano (CANBOLAT et al., 2006). A diminuição da difusão de oxigênio é outro fator que contribuiria para a redução dos microrganismos aeróbios (SCHNURR-PÜT et al., 2006). A compactação do solo reduz o volume total de poros do solo e aumenta a probabilidade de condições anaeróbias (JORDAN et al., 2003). Este efeito poderia ter contribuído para o aumento nas contagens das bactérias desnitrificantes, porém este efeito apenas foi observado entre o primeiro e o terceiro corte quando se observou na linha de plantio um aumento de 38% no número de bactérias.

Acompanhando o decréscimo nas contagens de microrganismos, o C da biomassa também foi reduzido. Foi observado que a biomassa microbiana foi sensível a compactação em solo de floresta, indicando o resultado do efeito de fatores físicos sobre a biomassa (TAN et al., 2008). A desidrogenase é uma enzima relacionada com a atividade metabólica intracelular e reflete o crescimento microbiano (TAN et al., 2008). Dick et al. (1988), relataram que correlação negativa da biomassa microbiana e atividade da desidrogenase com a densidade do solo. Nos cortes sucessivos da cana-de-açúcar observou-se redução da atividade da desidrogenase e este resultado está coerente com as respostas obtidas das contagens e da biomassa microbiana. A atividade da desidrogenase pode estar envolvida nos processos respiratórios microbianos (DICK et al., 1994). Desta forma, a redução na produção de CO<sub>2</sub> durante os vários estágios de colheita da cana-de-açúcar pode estar relacionada aos fatores abióticos do solo envolvidos no crescimento e atividade microbiana.

Devido à diminuição dos espaços entre os poros, a redução na disponibilidade de oxigênio tende a reduzir a atividade respiratória (JORDAN et al., 2003). Embora a mineralização do C tenha sido influenciada pela compactação, a mineralização do N foi menos pronunciada e foi similar no final do experimento, em todas os níveis de densidades (DE NEVE e HOFMAN, 2000). Contudo, neste estudo, tanto a mineralização do C e do N como as atividades nitrificante e de solubilização do P insolúvel foram severamente diminuídas, de 35 a 40%, com o tempo de cultivo. Estes resultados mostram uma indicação da influência dos diversos fatores antes apontados, resultantes do prolongado cultivo da cana-de-açúcar nos processos de mineralização da matéria orgânica e solubilização do fosfato mineral. Confirmando os resultados deste estudo, a mineralização do N foi também diminuída como resultado da compactação do solo (CANBOLAT, et al. 2006).

Na segunda e terceira colheitas da cana-de-açúcar, a palha foi queimada e a partir da quarta colheita, a palha não foi queimada. Esta sequência de manejos na colheita influenciou nas atividades amonificante e nitrificante e das enzimas urease e fosfatase que diminuíram progressivamente até o terceiro corte da cana e depois aumentaram no quarto corte. É provável que a massa de resíduos da cana-de-açúcar depositada no solo deva ter influenciado na atividade microbiana. A cobertura morta, formada pelo acúmulo de resíduos vegetais nas camadas superficiais, diminui as oscilações da temperatura e da umidade na superfície do solo e contribui para a manutenção de temperaturas mais amenas e maior retenção de água no solo em períodos quentes (RESENDE et al., 2005). A atividade da urease pode ter sido estimulada também pela adubação com uréia após o terceiro corte.

Contudo a atividade destas enzimas foi reduzida nos cortes seguintes, embora a da fosfatase não significativamente. A atividade da urease sob o efeito da compactação foi decrescente em solo adicionado ou não de 10% de uréia (KARACA et al., 2000). Este resultado mostra que a redução da atividade da urease em solo de cana-de-açúcar pode estar sujeita ao efeito da compactação. A atividade foi reduzida de 21% até o terceiro corte. Este resultado foi consistente com a da literatura. Assim, Jordan et al. (2003) relataram redução na atividade da fosfatase ácida em ensaio em casa de

vegetação, utilizando-se solo sob compactação Tan et al. (2008) mostraram que a atividade desta enzima foi diminuída em 48% em solo de floresta sob severa compactação.

## **5.2 Efeito da compactação do solo na cultura do milho**

Atualmente os sistemas de manejos convencionais envolvem aspectos de preparo de solo, manejo de culturas, de resíduos culturais e fertilidade do solo, essas práticas podem modificar a estrutura do solo. Com a modernização da agricultura, tem-se aumentado o peso das máquinas, equipamentos e a intensidade do uso do solo. Este aumento da massa dos tratores e colheitadeiras não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus e os riscos de compactação do solo aumentaram.

A compactação do solo associada a manobras impróprias de equipamento de campo afetam negativamente as propriedades físicas do solo (LAL, 1999), e assim limitam as atividades microbianas e processos bioquímicos que são importantes para a viabilidade dos ciclos de nutrientes (LEE et al., 1996; DE NEVE e HOFMAN, 2000).

Em um sistema de plantio direto, em função do não revolvimento do solo e após os primeiros anos de implantação, pode ocorrer um aumento da densidade na camada superficial diminuindo a porosidade, o que implica menores taxas de permeabilidade. Isso influencia no sistema radicular das raízes e conseqüentemente no rendimento dos grãos de milho.

O número de bactérias totais decresceu respectivamente conforme se aumentou o nível de compactação, já a contagem de fungos totais oscilou entre os seis tratamentos, obtendo uma maior contagem no solo com densidade  $D_{1,73}$ . As contagens de bactérias nitrificantes tiveram uma redução significativa entre os solos  $D_{1,62}$  ao  $D_{1,73}$ , já o número de bactérias desnitrificantes teve uma contagem mais expressiva nos solos com densidade  $D_{1,73}$  e  $D_{1,74}$ , onde a compactação do solo era maior. Enquanto que o crescimento de plantas pode ser afetado pela diminuição de macroporos devido à compactação, alguns microrganismos se beneficiam desta condição de volumes

reduzidos de macroporos para desenvolverem suas atividades (SHESTAK e BUSSE, 2005). Quando se comparam as contagens de microrganismos entre as duas profundidades analisadas, verificou-se redução de 31% para as contagens de bactérias totais, 19% para bactérias nitrificantes e 23% para a contagem de fungos totais, porém a mesma redução não foi observada para a contagem de bactérias desnitrificantes.

Enquanto a diminuição das contagens de bactérias totais e bactérias nitrificantes foram progressiva e bastante acentuadas, variando entre 26 e 21%, respectivamente, entre o primeiro ao sexto tratamento, houve um aumento do NMP de bactérias desnitrificantes (48%) e dos fungos totais (74%), onde nos tratamentos mais compactados se observou maiores contagens. Esta redução nas contagens de microrganismos pode ser atribuída ao aumento da compactação do solo e à limitação do brotamento e crescimento das raízes (GROLEAU-RENAUD et al., 1998). Com isso, há redução da produtividade e da secreção de exsudatos necessários acompanhada pela diminuição do crescimento microbiano (CANBOLAT et al., 2006). A diminuição da difusão de oxigênio é outro fator que contribuiria para a redução dos microrganismos aeróbios (SCHNURR-PÜT et al., 2006). A compactação do solo reduz o volume total de poros do solo e aumenta a probabilidade de condições anaeróbias (JORDAN et al., 2003), este pode ter sido o motivo para o aumento das bactérias desnitrificantes nos solos que se apresentavam mais compactados  $D_{1,73}$  e  $D_{1,74}$ . A compactação também pode influenciar na redução da população de bactérias do solo, resultando numa baixa relação microbiana C-N, devido à criação de condições anaeróbias, aumentando a umidade do solo (LI et al., 2003).

A enzima desidrogenase é uma enzima relacionada com a atividade metabólica intracelular e reflete o crescimento microbiano (TAN et al., 2008). Esta enzima se correlacionou diminuindo conforme o ocorrido com as bactérias totais.

Contudo a atividade das enzimas desidrogenase e fosfatase ácida, foram reduzidas conforme se aumentou o nível de compactação, embora a atividade da urease não significativamente, estes resultados mostram que a redução destas atividades pode estar sujeita ao efeito da compactação do solo. Conforme Pengthamkeerati et al. (2006), com a compactação, a aeração do solo fica reduzida e

os processos microbiológicos podem ser restringidos. Já Brzezínska et al. (2001), afirma que variações de umidade e do nível de compactação podem alterar a atividade da desidrogenase do solo, isso devido à forte influência de fatores físicos. Jordan et al. (2003), em um estudo em casa de vegetação verificaram que a compactação severa do solo reduziu a atividade da fosfatase ácida. Contudo, a atividade da urease sob o efeito da compactação acompanhou os valores do obtidos no pH do solo, diminuindo no solo com densidade D1,35 ao D1,66 e depois nas densidades D<sub>1,70</sub> ao D<sub>1,74</sub>.

Não houve uma diferença entre os tratamentos para o teor de matéria orgânica, mas uma maior quantidade foi encontrada na camada de 0 – 10 cm, isto pela fácil incorporação de material orgânico no solo. Outro fator físico foi o teor de umidade que também não variou significativamente entre os tratamentos mas uma maior quantidade de água, devido a sua penetração foi observada na camada mais profunda de 10 – 20 cm, nesta camada também teve um maior valor do pH que não variou entre os tratamentos estudados. Estas três variáveis não sofreram variações significativas com o aumento da compactação do solo.

## 6. CONCLUSÃO

Conclui-se deste trabalho que o efeito de seis cortes sucessivos de cultura da cana-de-açúcar acarretou diminuição no número de bactérias totais, na atividade respiratória, no C da biomassa microbiana e na atividade da desidrogenase do solo.

O manejo da cultura, incluindo o efeito dos resíduos vegetais depositados no solo pela não queima da palha e as adubações influenciaram no número de fungos totais, nas atividades, nitrificante, amonificante e solubilizadora e nas enzimas urease e fosfatase ácida.

A compactação do solo sob milho inibiu o crescimento das populações das bactérias totais e nitrificantes, porém favoreceu as dos fungos totais e bactérias desnitrificantes.

Com o aumento da densidade do solo ocorreu uma redução contínua na atividade da desidrogenase e da fosfatase ácida, mas não da urease.

As contagens das bactérias e fungos totais e a atividade das enzimas desidrogenase e fosfatase bem como o conteúdo de matéria orgânica e o pH do solo foram maiores na camada de solo 0-10 cm em relação à de 10-20 cm. O inverso foi observado com referência às contagens das bactérias desnitrificantes e a umidade do solo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER, M. Denitrifying bacteria. In: Page, A. L; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis. Part 2.** Chemical and microbiological properties. 2<sup>nd</sup> ed. Madison, American. Society Agronomy, p.1485-1489, 1965.

ALEXANDER, M. Most probable number method for microbial populations. In: Page, A.L; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis. Part 2.** Chemical and microbiological properties. 2<sup>nd</sup> ed. Madison, American. Society Agronomy, p.815-820, 1982.

AMADOR, J.A.; GLUCKSMAN, A.M.; LYONS, J.B. & GÖRRES, J.H. Spatial distribution of soil phosphatase activity within a riparian forest. **Soil Science**, v.11, p.808-825, 1997.

ARAÚJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal** (UFU), v. 23, p. 66-75, 2007.

ARIZONO, H.; MATSUOKA, S.; GHELLER, A.C.A.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H.P.; BASSINELLO, A.I.; MENESES, L.L. Alternativas para avaliação de produção de cana-de-açúcar. In: **STAB: Açúcar, álcool e subprodutos**, v.19, n.5, p. 20, 1998.

BALASTREIRE, L. A. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **STAB**. v.16, p..22, 1998.

BERGSTROM, D.W.; MONREAL, C.M.; MILLETTE, J.A. & KING, D.J. Spatial dependence of soil enzyme activities along a slope. **Soil Science Society of America Journal**, v., p.62: 1302–1308, 1998.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugarcane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland. Australia, **Soil and Tillage Research**, v.55, p.183-191, 2000.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v.89, p.103-121, 2006.

BREZEŹÍŃSKA, M. & STEPNIEWSKI, W. & STEPNIEWSKA, Z. & PRZYWARA, G. & WLODARCZYK, T. Effect of oxygen deficiency on soil dehydrogenase activity in a pot experiment with triticale cv. Jago vegetation, *Int. Agrophys*, v.15, p.145-149, 2001.

BUCK C.; LANGMAACK M.; SCHRADER S. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. **Applied Soil Ecology**, v.14, p.223-229, 2000.

BUNT, J.S.; ROVIRA, A.D. Microbiological studies of some subantartic soils. **Journal of Soil Science**, v.6, p.119-128, 1955.

CALDERÓN, F.J.; JACKSON, L.E.; SCOW, K.M.; ROLSTON, D.E. Short-term dynamics of nitrogen, microbial activity, and phospholipid fatty acids after tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.118-126, 2001.

CANBOLAT, M.Y.; BILEN, S.; ÇAKMAKÇER, R.; ŞAHİN, F.; AYDN, A. Effect of plant growth-promoting bacteria and soil compaction on barley seedling growth, nutrient uptake, soil properties and rhizosphere microflora. **Biology and Fertility of Soils**, v.42, p.350–357, 2006.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. Compactação do solo em cafeicultura irrigada. Uberaba: **Universidade de Uberaba**, p.44, 2004.

CASIDA JR., L.E., Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations. **Applied and Environmental Microbiology**, v.34, p.630-636, 1977.

CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER, A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influence of sugarcane cultivation and clay mineralogy in physical properties of rhodic oxisols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.199-209, 2007.

CLAYTON, H. & Mc TAGGARTT, I.P. & PARKER, J. & SWAN, L. & SMITH, A. Nitrous oxide emissions from fertilized grassland: A 2-year study of the effects of N fertilizer form and environmental conditions. **Biology and fertility of soils**, v.25, p.252-260, 1997.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Desafios para obtenção de altas produtividades. Sete Lagoas: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, p.20, 2004.

COUTO, L.; RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Importância do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). A cultura do milho irrigado. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, p.17-30, 2003.

DE NEVE, S.; HOFMAN, G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. **Biology and Fertility of Soils** v.30, p.544–549, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S. D. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SHAEFER, C.E.E.R. (Ed.). Tópicos em Ciências do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciências do solo**, p.55-94, 2000.

DICK, R.P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F., STEWART, B.A. (Eds.) Defining Soil Quality for a

Sustainable Environment. **Soil Science Society of America**, Madison, p.107–124, 1994.

DICK, R.P.; MYROLD, D.D.; KERLE, E.A. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils. **Soil Science Society of American Journal**. v.52, p.512–516, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. Embrapa/CNPS. p.412, 1999.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf), Campinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.329-333, 1983.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Online), v.31, p.627-636, 2007.

GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A.C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.863-873, 2007.

GLINSKI, J.; STEPNIEWKA, Z.; BREZEZINSKA, M. Characterization of the dehydrogenase and catalase activity of the soils of two natural sites with respect to the soil oxygenation status. **Polony Journal Soil Scienci**, v.19, p.47-52, 1986.

GOMES JÚNIOR, R.N. Degradação dos solos de tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25, v.3, Viçosa. Resumos Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, p.1956-1957, 1995.

GOMEZ A., POWERS R.F., SINGER M.J., HORWATH W.R. Soil compaction effects on growth of young Ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. **Soil Science Society of American Journal**. v.66, p.1334–1343, 2002.

GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponic conditions. **Plant Soil**, v.201, p.231–239, 1998.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, p. 167-179, 1998.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Anuários e Dados Estatísticos. Disponível em [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Vários acessos.

JORDAN, D.; PONDER, F. Jr.; HUBBARD, V.C. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. **Applied Soil Ecology**, v.23, p.33-41, 2003.

KARACA, A.; ABDULLAH, B., KORAY, H. The Effect of Compaction on Urease Enzyme Activity, Carbon Dioxide Evaluation and Nitrogen Mineralization. Turkish **Journal of Agriculture and Forestry**, v.24, p.437-442, 2000.

KEENEY, D.R.; NELSON, D.W. Nitrogen-inorganic forms. **Methods of Soil Analysis**, v.2, p.643-698, 1982.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.19, p.45-54, 1998.

KREMER, R.J. & LI, J. Developing weed-suppressive soils through improved soil quality management. **Soil & Tillage Research**, v.72, p.193-202, 2003.

LANZANOVA, M.E. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do. Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.

LEE, W.J.; WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; ENTRY, J.A. & RAPER, R.L. Interactive effects of wheel-traffic and tillage system on soil carbon and nitrogen. **Soil Science plant Anal.** V.27, p.3027–3043, 1996.

LI, C. H.; MA, B.L.; ZHANG, T.Q. Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (*Zea mays* L.) planted in large pots under field exposure. **Canadian Journal of Plant Science**, v.82, p.147–154, 2002.

LI, Q.; ALLEN, H.L.; WILSON, C.A. Nitrogen mineralization dynamics following the establishment of a loblolly pine plantation. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p.364-374, 2003.

LIMA, A. F. Processamento da pasta celulósica. In: Celulose e Papel, Vol. 1 – Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2ª. (Ed.). IPT São Paulo. 1988.

MARTIN, J.P. Use of acid, rose bengal and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. **Soil Science**, v.69, p.215–232, 1950.

MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B.; RONCHI, V.; BAUER, C. Kinetic parameters of dehydrogenase in the assessment of the response of soil to vermicompost and inorganic fertilisers. **Biology and fertility of soils**, v.32, p.479-483, 2000.

McGARITY, J.W.; MYERS, M.G. A survey of urease activity in soils of Northern New South Wales. **Plant and Soil**, v.27, p.217-238, 1967.

MIRANSARI, M.; BAHRAMI, H.A.; REJALI, F.; MALAKOUTI, M.J. & TORABI, H. Using arbuscular mycorrhiza to reduce the stressful effects of soil compaction on corn (*Zea mays* L.) growth. **Soil Biology & Biochemistry**, v.39, p.2014–2026, 2007.

PAGLIAI, M.; DE NOBILI, M. Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity in cultivated soils. **Geoderma**, v.56, p.243-256, 1993.

PENGTHAMKEERATI, P.; MOTAVALLI, P.P.; KREMER, R.J.; ANDERSON, S.H. Soil compaction and poultry litter effects on factors affecting nitrogen availability in a clay pan soil, **Soil and Tillage Research**, v.91, p.109-119, 2006.

PRITCHETT, W.L.; FISHER, R.F. Properties and Management of Forest Soils. Wiley, New York, p.165-174, 1987.

RAIJ, B.V.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análises de solos para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, (Boletim Técnico, 81), p.31, 1983.

RAIJ, B.V.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIN, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, p.170, 1987.

RESENDE, F.V.; SOUZA, L.S.; OLIVEIRA, P.S.R.; GUALBERTO, R.. Uso de cobertura morta no controle da umidade e temperatura do solo, na incidência de plantas invasoras e na produção da cenoura em cultivo de verão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras - MG, v.29, n.1, p.100-105, 2005.

REZENDE, L.A.; ASSIS, L.C.; NAHAS, E. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization in two soils amended with distillery yeast. **Bioresource Technology**, v.94, n.2, p.159-167, 2004.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J.C. Emission of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting, **Soil Biology & Biochemistry**, v.38, p.263–274, 2006.

SAS INSTITUTE. **Statistical Analysis System**, SAS/STAT use's guide (Version 6). 3rd ed. Cary, p.705, 1990.

SCHMIDT, E.L.; BELSER, L.W. Autotrophic nitrifying bacteria. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, S.; BOTTOMELY, D.; SMITH, S. TABATABAI, A.; WOLLUM, A., (Eds) *Methods of Soils Analysis*, part 2. Madison: Microbiological and biochemical properties, SSSA Book, series n° 5, **Soil Science Society of America**, p.159-177, 1994.

SCHMIDT, E.L.; BELSER, L.W. Nitrifying bacteria. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds). *Methods of Soil Analysis*, part 2. Madison: Chemical and microbiological properties. **American Society of Agronomy**, p.1027-1042, 1982.

SCHNURR-PÜTZ, S.; BAATH, E.; GUGGENBERGER, G.; DRAKE, H.L.; KÜSELL, K. Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes. **FEMS Microbiology Ecology**, v.58, p.503-516, 2006.

SHESTAK, C.J.; BUSSE, M.D. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.236–246, 2005.

SILVIA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetado pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000a.

SILVIA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Sustentabilidade à compactação de um latossolo vermelho escuro e de um podzólico vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.239-249, 2000b.

SMELTZER, D.L.K.; BERGDHAL, D.R.; DONNELLY, J.R. Forest ecosystem responses to artificially induced soil compaction. II. Selected soil microorganism populations. **Canadian Journal of Forest Research**, v.16, p.870-872, 1996.

STARTSEV, N.A.; McNABB, D.H.; STARTSEV, A.D. Soil biological activity in recent clearcuts in west-central Alberta. **Canadian Journal Soil Science**, v.78, p.69–76, 1998.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.755-760, 2004.

SYLVIA, D.M.; FURHMANN, J.J.; HARTEL, G.P.; ZUBERER, D.A. **Principles and Applications of Soil Microbiology**, Prentice-Hall, Upper Saddle River, p.61-62, 1998.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v.1, p.301– 307, 1969.

TABOADA, M.A. & ALVAREZ, C.R. Root abundance of maize in conventionally-tilled and zero-tilled soils of Argentina. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, p.769-779, 2008.

TAN, X.; CHANG, S.X.; KABZEMS, R. Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. **Biology Fertility of Soils**, v.44, p.471–479, 2008.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.725-730, 2001.

TAYLOR, J.P.; WILSON, B.; MILLS, M.S.; BURNS, R.G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoil various techniques. **Soil Biology & Biochemistry**, v.34, p.387-401, 2002.

TEEP, R.; BRUMME R.; BEESE F.; LUDWING B. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society American Journal**, v.68, p.605-611, 2004.

TORBERT, H.A.; WOOD, C.W. Effects of soil compaction and water-filled pore-space on soil microbial activity and N losses. Commun. **Soil Science Plant Anal**, v.23, p.1321–1331, 1992.

VAIDYA, G. S.; KESHAB, S.; KHADGE, B. R.; JOHNSON, N. C. & WALLANDER, H. Organic matter stimulates bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in *Bauhinia purpurea* and *Leucaena diversifolia* plantations on eroded slopes in Nepal, **Restoration Ecology**, v.16, p.79-87, 2008.

VIEIRA, F. C. S.; NAHAS, E. Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures. **Microbiological Research**, v.160, p. 197-202, 2005.

WATANABE, F.S.; OLSEN, S.R. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and  $\text{NaHCO}_3$  extracts from soils. **Soil Science Society American Procedures**, v.29, p.677-678, 1965.

WHALLEY, W.R., DUMITRU, E.; DEXTER A.R. Biological effects of soil compaction. **Soil Tillage Research**. 35, 53–68, 1995.

WOLLUM, II, A.G. Cultural methods for soil microorganisms. In: Page, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Madison: Wisconsin, p.781-802, 1982.

WRONSKI, E.B.; MURPHY, G. Responses of forest crops to soil compaction In: SLOANE, B.D., OUWERKERK, C.V. (Eds.), Soil Compaction in Crop Production. Amsterdam, **Elsevier**, p.317–342, 1994.