

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**INFLUÊNCIA DO MONOCULTIVO NA CANA-DE-AÇÚCAR E
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM
NITOSSOLO VERMELHO E UM NEOSSOLO
QUARTZARÊNICO**

MARCELO MARQUES LOPES MÜLLER

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia - Área
de Concentração em Energia na
Agricultura.

BOTUCATU - SP
Fevereiro - 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**INFLUÊNCIA DO MONOCULTIVO NA CANA-DE-AÇÚCAR E
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM
NITOSSOLO VERMELHO E UM NEOSSOLO
QUARTZARÊNICO**

MARCELO MARQUES LOPES MÜLLER

Orientadora: Profa. Dra. Maria Helena Moraes

Co-orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção
do título de Doutor em Agronomia -
Área de Concentração em Energia na
Agricultura.

BOTUCATU - SP
Fevereiro - 2002

OFEREÇO

este meu trabalho a **Deus**, em primeiro lugar. A ele, que sempre me ensinou a enxergá-lo em tudo, mais este pequeno fruto de minha vida. Ofereço, também, a meu pai, **Urias Lopes Müller** (*in memoriam*), cuja paixão profissional creio nunca ter sido a agricultura em si, mas que, pelos revezes da vida, foi quem me mostrou a profissão a qual abraçaria com tanto amor: a de conhecer e lidar com os segredos da terra! Ofereço, ainda, ao “**verdadeiro agricultor brasileiro**”, a quem o país recorre todos os dias sem ao menos perceber, exigindo e se fartando dos frutos de seu trabalho, para enfim premiar-lhe com o descaso, na maioria das vezes. A este profissional, cuja atividade considero das mais importantes para um país, minha singela e reduzida contribuição.

DEDICO

este trabalho às pessoas que decisivamente fizeram tudo acontecer e que sempre estiveram junto a mim, ajudando, incentivando e, principalmente, inspirando e norteando minha caminhada.

À minha mãe, Celina, que sempre foi e será meu exemplo e meu orgulho, parte de minha força e minha grande proteção. Obrigado, mãe, por ter se esforçado tanto para minha formação.

À minha futura esposa, Solange, que é meu grande incentivo, minha inspiração e minha melhor companhia. A ti desejo dedicar muitas outras coisas em minha vida.

Obrigado por tanto amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Sei que seria muito difícil agradecer de forma correta às inúmeras pessoas com as quais convivi e trabalhei nestes últimos anos e que me ajudaram a chegar até aqui. Assim sendo, agradeço de coração a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

À professora Maria Helena Moraes, pela orientação, pela amizade e pelo convívio harmonioso que tanto concorreu para que estes últimos anos fossem dos melhores que já vivi, apesar do muito trabalho e das muitas dificuldades que surgiram. Obrigado pela confiança em minha capacidade e pela contribuição para o meu aprendizado.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Recursos Naturais – Ciência do Solo da FCA, em especial aos professores Dirceu Maximino Fernandes e Célia Regina Lopes Zimback, pelo convívio amigável e pelas conversas e sugestões que ajudaram a tornar melhor este trabalho, e aos funcionários Sônia e Jair, com os quais convivi mais diretamente no dia-a-dia e que muito me ajudaram durante os últimos anos.

À minha grande mestra e amiga, professora Maria de Fátima Guimarães, da Universidade Estadual de Londrina (UEL), pelo convívio amigável e prazeroso, pela co-orientação e participação ativa no presente trabalho, pelos ensinamentos e pelos exemplos profissional e pessoal positivos de como se deve conduzir as coisas.

Ao professor Cássio Tormena da Universidade Estadual de Maringá (UEM), pela grande simpatia e confiança a mim dispensadas em tão pouco tempo de convívio. Meus agradecimentos pela disponibilização da estrutura do Laboratório de Solos do Departamento de Agronomia da UEM, pela participação ativa nas atividades deste estudo, pelos ensinamentos e pelo grande exemplo profissional que a mim prestou, sendo sempre dedicado e sério em seus princípios. Ao colega Marcelo Araújo da UEM, pelo grande auxílio nas determinações relativas ao Intervalo Hídrico Ótimo.

À professora Carmem Silvia V. J. Neves da UEL, pela participação ativa neste trabalho, no estudo das raízes, e pelas sugestões apresentadas. À professora Cristiane de Conti Medina da UEL, pelo apoio e atenção numa fase difícil e pela sugestão do assunto principal desta tese, o manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar.

Aos professores e funcionários dos Departamentos de Engenharia Rural e Produção Vegetal – Agricultura e Melhoramento Vegetal, em especial ao professor Sérgio Hugo Benez, que de início assumiu oficialmente minha orientação, e ao professor Ciro Antônio Rosolem, pelas conversas sobre a Ciência do Solo e estudo de raízes, e aos funcionários Mauri (Eng. Rural), Célito, Dorival e Cirinho (Agricultura).

Aos colegas de pós-graduação com os quais trabalhei e estudei, pelos ensinamentos diversos, pela consideração e pela amizade. Aos estagiários Márcia e Jorge, pela ajuda no preparo de amostras de solo e condução de análises em laboratório. À estagiária Daniela, pelo auxílio na avaliação das imagens de raízes. À estagiária Solange, pelo auxílio condensado no período final de análises laboratoriais.

Ao pesquisador Celso Castro Filho, pelas sugestões e por disponibilizar a estrutura do laboratório de solos do IAPAR para as avaliações relativas ao estudo de agregação do solo. Ao amigo e colaborador Alexsandro Lourenço, pela ajuda na coleta e avaliação das amostras de agregados do solo.

Aos funcionários do CEMEQ da UNESP, Campus de Rubião, pela tão valorosa vontade de ajudar a resolver os problemas que enfrentei, muitas vezes inventando novas soluções com grande presteza. Ao torneiro mecânico João Vidoto, pela ajuda no desenvolvimento dos equipamentos de coleta de raízes e de amostras indeformadas de solo, sendo sempre tão inventivo e compreensivo.

Aos irmãos de república, Carlos Henrique dos Santos e José Salvador Simoneti Foloni, pela amizade e consideração, pelos ensinamentos e reflexões em torno dos assuntos de nossas vidas profissionais e pessoais, pelas eventuais vezes que ajudaram nos trabalhos deste estudo e pelas importantes discussões promovidas no “espetinho de gato”.

À Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP, Campus Lageado, e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia “Energia na Agricultura”, pela oportunidade de realização do curso.

À Usina São Manoel, pela disponibilização das áreas e informações a elas correlatas. Ao Eng. Agr. Luis Alberto Manoel e ao funcionário Binde, pela grande atenção, colaboração e interesse na realização do trabalho.

Aos funcionários da Biblioteca e da Seção de Pós-Graduação da FCA.

À FAPESP, pela concessão da bolsa de estudo.

SUMÁRIO

1 - RESUMO	1
2 - SUMMARY	3
3 - INTRODUÇÃO	5
4 - REVISÃO DE LITERATURA	9
4.1 - Origem e história da cana-de-açúcar e da indústria açucareira	9
4.2 - O monocultivo de cana-de-açúcar: efeitos nas propriedades do solo	11
4.3 - Compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar	13
4.4 - O sistema radicular da cana-de-açúcar	16
4.5 - Influência da estrutura do solo no desenvolvimento radicular das plantas e da cana-de-açúcar	18
4.6 - A agregação do solo como indicador de sua fertilidade física	20
4.7 - O intervalo hídrico ótimo do solo como indicador de sua fertilidade física.	21
5 - MATERIAL E MÉTODOS	24
5.1 - Localização da área de estudo e caracterização do meio físico	24
5.2 - Áreas estudadas: descrição e histórico	25
5.2.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	26
5.2.2 - NITOSSOLO VERMELHO	27
5.3 - Avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar	27
5.3.1 - Filmagem das raízes expostas em perfil	28
5.3.2 - Coleta de amostras de raízes	30
5.4 - Perfil cultural do solo	32
5.5 - Amostragem do solo	32
5.5.1 - Coleta de amostras de solo com estrutura deformada	32
5.5.2 - Coleta de amostras de solo com estrutura indeformada	33
5.5.3 - Coleta de amostras de agregados do solo	35
5.6 - Análises e determinações com as amostras de solo	35
5.6.1 - Análise química do solo	35
5.6.2 - Determinação da granulometria do solo	36
5.6.3 - Determinação da curva de retenção de água do solo (CRA)	37
5.6.4 - Determinação da curva de resistência do solo à penetração (CRP)	40

5.6.5 - Determinação da densidade do solo (D_s)	41
5.6.6 - Determinação do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO)	42
5.6.7 - Determinação da agregação do solo	43
5.7 - Avaliação de parâmetros morfológicos da cana-de-açúcar e produtividade	47
5.8 - Análise estatística	47
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 - Fertilidade química do solo	48
6.1.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	48
6.1.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	55
6.2 - Perfil cultural do solo	62
6.2.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	62
6.2.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	64
6.3 - Agregação do solo	66
6.3.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	66
6.3.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	69
6.4 - Intervalo hídrico ótimo (IHO)	75
6.4.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	75
6.4.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	80
6.5 - Crescimento radicular avaliado pela filmagem em perfil	84
6.5.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	84
6.5.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	87
6.6 - Crescimento radicular avaliado pela coleta das amostras	89
6.6.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	89
6.6.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	93
6.7 - Parâmetros morfológicos da cana e produtividade	96
6.7.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)	96
6.7.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)	97
7 - CONCLUSÕES	99
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNCICE	115

LISTA DE QUADROS

Quadro:	Página
1.Composição granulométrica e propriedades químicas de um NQ sob mata (NQ ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 5 (NQ ₀₅) e 25 anos (NQ ₂₅).....	49
2.Teores de micronutrientes de um NQ sob mata (NQ ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 5 (NQ ₀₅) e 25 anos (NQ ₂₅).	54
3. Composição granulométrica e propriedades químicas de um NV sob mata (NV ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV ₁₂) e 50 anos (NV ₅₀).....	56
4.Teores de micronutrientes de um NV sob mata (NV ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV ₁₂) e 50 anos (NV ₅₀).....	61
5.Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e teor de carbono orgânico (C _{orgânico}) em amostras de agregados de NQ sob mata (NQ ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 05 (NQ ₀₅) e 25 anos (NQ ₂₅).....	67
6.Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e teor de carbono orgânico (C _{orgânico}) em amostras de NV sob mata (NV ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV ₁₂) e 50 anos (NV ₅₀).....	70
7.Área e comprimento do total de raízes estimado pelo programa SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil (quadros de 0,23 x 0,23 m) nas áreas de NQ....	86
8.Área e comprimento do total de raízes estimado pelo programa SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil (quadros de 0,23 x 0,23 m) nas áreas de NV....	88
9.Densidade de comprimento radicular (DC), volume radicular (VR), área superficial radicular (AS) e massa de matéria seca (MS) de raízes em áreas de NQ cultivadas com cana-de-açúcar por 05 (NQ ₀₅) e 25 anos (NQ ₂₅).....	90
10.Densidade de comprimento radicular (DC) em áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar por 12 (NV ₁₂) e 50 anos (NV ₅₀).....	94
11.Volume radicular (VR), área superficial (AS) e massa de matéria seca (MS) de raízes em áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar.....	95
12.Número de colmos por metro de sulco de plantio, diâmetro basal, comprimento do colmo, número de entrenós do colmo e produtividade em áreas de NQ cultivadas com cana-de-açúcar (var. RB72454, 5° corte) por 5 (NQ ₀₅) e 25 anos (NQ ₂₅).....	96
13.Número de colmos por metro de sulco de plantio, diâmetro basal, comprimento do colmo, número de entrenós do colmo e produtividade em áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar (var. SP 79-1011, 3° corte) por 12 (NV ₁₂) e 50 anos (NV ₅₀).....	98
14.propriedades físicas e químicas do NQ.....	118
15.propriedades físicas e químicas do NV.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura:	Página
1. Localização do município de São Manuel na Região Centro-Oeste de São Paulo.....	25
2. Dimensões e posição das trincheiras em relação às linhas de plantio da cana.....	28
3. Exposição das raízes com rolo escarificador.....	29
4. Pintura individual das raízes com tinta látex branca.....	29
5. Filmagem em quadros devidamente identificados de 0,23x0,23m.....	29
6. Distribuição dos quadros filmados, em relação ao perfil, e totalização dos resultados por profundidade (totais A, B e C) e por distância em relação à touceira (totais 1, 2 e 3)	30
7. Amostrador de raízes (0,10 x 0,10 x 0,10 m)	31
8. Inserção do amostrador com auxílio de suporte e macaco hidráulico.....	31
9. Aparato para coleta de amostras de solo com estrutura indeformada.....	34
10. Mesa de tensão utilizada para os potenciais matriciais de -0,004 e -0,006 MPa (a). Detalhe das amostras na mesa, cobertas com plástico para evitar evaporação (b).....	39
11. Extratores de Richards utilizados na drenagem das amostras de solo para os potenciais matriciais entre -0,01 e -1,5 MPa.....	39
12. (a) Penetrômetro controlado por computador, sendo vistos o motor de passo (1) e o atuador linear (2); (b) exemplo do posicionamento da amostra durante o ensaio de resistência; (c) detalhe da célula de carga acoplada no braço mecânico do atuador; (d) registro dos dados de resistência ao longo do eixo central da amostra.....	40
13. Teor de fósforo (P_{resina}) disponível em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	51
14. Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	52
15. Boro (a), ferro e manganês (b) em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	55
16. Teor de fósforo (P_{resina}) disponível em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	58
17. Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	59
18. Boro, zinco (a), cobre e ferro (b) em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NV sob mata.	62
19. Valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função dos teores de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de agregados de um NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar. Os pontos plotados se referem a todos os dados (áreas e camadas de solo).....	68
20. Valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) (a), e de índice de estabilidade de agregados em água (IEA) (b) em função dos teores de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de agregados (camadas 0,00-0,005 e 0,05-0,10 m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	71

21. Valores de índice de estabilidade de agregados em água (IEA) em função do pH (a); e valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função do pH (b), da saturação por bases (c) e da acidez potencial (d) em amostras de agregados (camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	72
22. Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função do teor de silte em amostras de agregados (camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.....	74
23. Valores médios (32 amostras) de densidade do solo em NQ ₀₅ e NQ ₂₅	75
24. Variação do teor de água em função da densidade do solo nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (URP) nas áreas NQ ₀₅ (a) e NQ ₂₅ (b). A área em azul representa o intervalo hídrico ótimo.	78
25. Valores de intervalo hídrico ótimo em função dos valores de densidade do solo nas áreas NQ ₀₅ e NQ ₂₅	79
26. Intervalo hídrico ótimo em NQ ₀₅ e NQ ₂₅ . Letras distintas acima das barras significam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.....	80
27. Variação do teor de água em função da densidade do solo nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (URP) na área NV ₅₀ . A área em azul representa o intervalo hídrico ótimo.	83
28. Valores de intervalo hídrico ótimo em função dos valores de densidade do solo na área NV ₅₀	84
29.(a) Área (cm ²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana estimados pelo SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas camadas de solo de 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de profundidade entre o centro do sulco de plantio e o centro da entrelinha nas áreas de NQ. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada profundidade.....	85
30.(a) Área (cm ²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana, estimados pelo SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas colunas de solo entre 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m a partir do centro do sulco de plantio nas áreas de NQ. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada distância.....	86
31.(a) Área (cm ²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana estimados pelo SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas camadas de solo de 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de profundidade entre o centro do sulco de plantio e o centro da entrelinha nas áreas de NV. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada profundidade.....	87
32.(a) Área (cm ²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana, estimados pelo SIARCS [®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas colunas de solo entre 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de distância a partir do centro do sulco de plantio nas áreas de NV. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada distância.....	88

33. Valores de (a) densidade de comprimento (DC) e volume radicular (VR) e de (b) área superficial (AS) em função de massa de matéria seca das raízes (MS) de cana nas áreas de NQ.	92
34. NQ sob vegetação nativa de cerrado.....	117
35. NV sob vegetação de mata nativa.....	119

1 - RESUMO

O presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos de diferentes tempos de monocultivo de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e químicas de dois solos e no desenvolvimento radicular da cultura. Em acordo com a Usina São Manoel S.A., município de São Manuel-SP, foram escolhidos dois solos: NITOSSOLO VERMELHO e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Três situações foram estudadas para cada classe de solo: área sob vegetação nativa (referência para as propriedades do solo antes do desmatamento); área cultivada com cana por período relativamente curto (5 anos para NQ e 12 anos para NV); área cultivada com cana por período relativamente longo (25 anos para NQ e 50 anos para NV). Foram determinadas propriedades químicas e físicas dos solos, bem como parâmetros de crescimento radicular e de produtividade da cana nos meses que antecederam à colheita da safra no ano 2000. Para o NEOSSOLO, a fertilidade química do solo foi similar nas áreas

estudadas, enquanto que, no NITOSSOLO, o monocultivo da cana por 50 anos melhorou a fertilidade em relação à área cultivada por 12 anos. O perfil cultural indicou não haver diferenças significativas entre as estruturas verificadas nas áreas de NEOSSOLO. Quanto ao NITOSSOLO, as condições estruturais foram mais favoráveis ao enraizamento na área cultivada por 50 anos. O aumento no tempo de cultivo com a cana não modificou significativamente nem a distribuição e nem a estabilidade dos agregados nos dois solos. No NEOSSOLO, o intervalo hídrico ótimo foi maior na área cultivada com cana por mais tempo. O método de filmagem de raízes mostrou que, em ambos os solos, o crescimento radicular foi melhor nas áreas cultivadas com cana por mais tempo. Entretanto, o método de coleta de raízes mostrou que somente no caso do NEOSSOLO o enraizamento foi melhor na área cultivada há mais tempo com a cana. No caso do NITOSSOLO, as diferenças entre as áreas cultivadas foi observada apenas em relação à densidade de comprimento, que foi maior na área cultivada a menos e tempo em três das sete camadas de solo estudadas. Embora a produtividade da cana tenha sido maior nas áreas cultivadas com cana por mais tempo, em ambos os solos as diferenças não foram significativa entre elas.

INFLUENCE OF MONOCULTURE ON SUGARCANE AND ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF A NITOSSOLO VERMELHO AND A NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Botucatu, 2001, p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Marcelo Marques Lopes Müller

Adviser: Maria Helena Moraes

Co-Adviser: Maria de Fátima Guimarães

2 - SUMMARY

The aim of the present study was to evaluate the effects of long-term sugarcane monoculture on crop development and on the physical and chemical properties of two soils. In agreement with São Manoel S.A. sugarcane mill, at São Paulo State, two different soils were chosen: NITOSSOLO VERMELHO and NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, respectively, Nitosol and Arenosol, according to FAO's Soil Classification System, or Alfisol and Entisol, according to Soil Taxonomy (USA). Three situations were studied for each soil class: forest plot (reference of soil properties before forest logging); plot under continuous sugarcane monoculture for a relative short period (5 years for NQ and 12 years for NV); plot under continuous sugarcane monoculture for a relative long period (25 years for NQ e 50 years for NV). Soil chemical and physical properties were determined as well as rooting and yield during the months which preceded the harvest on the year 2000. Soil chemical fertility was similar between sugarcane areas for NEOSSOLO, while for NITOSSOLO soil chemical fertility was better on the area under longer time (50 years) of monoculture. The cultural profile showed no clear difference between sugarcane areas for NEOSSOLO, while for NITOSSOLO, better structural conditions

were recorded on the older area. Time increase under cane monoculture did not significantly modify aggregate distribution and stability for both soils. The least limiting water range was higher on the area under longer time (25 years) of monoculture for NEOSSOLO. The method of root evaluation by filming the profile showed, for both soils, that root growth was better on the areas under longer time of cane monoculture. However, the method with root collecting showed that only in the case of NEOSSOLO root growth was better on the areas under longer time of cane monoculture. In the case of NITOSSOLO, differences between the cultivated areas were only observed in relation to root length density, which was higher in the area under shorter time of monoculture in three of the seven studied depths. Even though cane yield was higher on the areas under longer time of monoculture, differences between the areas were not statistically significant, for both soils.

Keywords: monoculture, sugarcane, *Saccharum* sp, soil physics, soil fertility, roots.

3 - INTRODUÇÃO

Sendo, o solo, um recurso de renovação muito lenta ou não renovável na escala de tempo humana, é necessário que se avalie os efeitos a médio e longo prazo das explorações agrícolas sobre suas propriedades. Monitorar a direção e a magnitude das modificações nas propriedades dos solos, bem como a resposta das culturas a elas, é uma importante ferramenta conservacionista, servindo como subsídio para a geração de sistemas produtivos sustentáveis.

No que se refere às atividades agrícolas, as sociedades apresentam diferentes formas de explorar o solo, o que se explica, em geral, por dois fatores básicos: tradição na atividade agrícola e tipo de cultura predominante. A junção entre estes dois fatores

define, em grande parte, o “uso” e o “manejo” do solo, os quais podem ser respectivamente entendidos como “o quê” se produz a partir do solo e “como” o solo é manejado para tal fim. Combinações variadas entre uso e manejo podem manter, melhorar ou degradar a qualidade do solo para a produção agrícola.

Nas florestas, o solo é coberto por uma camada de material vegetal que o protege do impacto direto das gotas de chuva. O solo mineral abaixo desta camada é fortemente influenciado pela matéria orgânica e, geralmente, caracterizado por alta porosidade e permeabilidade (Anderson & Spencer, 1991). Quando o homem interfere nesse sistema, há uma modificação na dinâmica da matéria orgânica (síntese e decomposição) e os efeitos desta alteração têm grande influência sobre as propriedades do solo (Nascimento & Homma, 1984).

O desmatamento e a introdução da agropecuária conduzem a modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, principalmente nas regiões tropicais (Cerri et al., 1991; Sanchez et al., 1983). Segundo Anjos et al. (1994), o cultivo provoca a degradação da estrutura do solo, expressa pelo aumento da densidade do solo e redução da porosidade total, da taxa final de infiltração e da infiltração acumulada. Em contrapartida, parâmetros de fertilidade do solo podem ser melhorados com o cultivo, dependendo do sistema de manejo utilizado (Sidiras & Pavan, 1985).

Historicamente, a produção de cana-de-açúcar sempre envolveu cultivo intensivo do solo. Presente no Brasil desde a época colonial, por muito tempo a cultura foi carente de informações que adaptassem as operações de mecanização às nossas condições, de forma a diminuir os problemas com erosão e compactação e a aumentar a produtividade (Contiero, 1997). Em relação ao que se sabe sobre as propriedades físicas do solo e seus

efeitos sobre o crescimento e a produtividade das culturas, pouco é referente à cultura da cana, o que pode ser devido ao fato de que novas variedades e aplicações de fertilizantes tendem a mascarar os efeitos negativos das propriedades físicas do solo sobre o crescimento e a produtividade da cana (Braunack, 1997).

Com a freqüente utilização de maquinaria pesada, a compactação do solo pode contribuir para a redução de produtividade da cana, uma vez que causa impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular com reflexos na absorção de água e nutrientes (Camargo, 1983; Primavesi, 1985).

Além da compactação, outro problema comum nas áreas cultivadas com a cultura é o chamado declínio produtivo da cana-de-açúcar (“sugar yield decline”). Nos vários países produtores, a cana é cultivada em áreas extensas sob sistema de monocultivo, sendo a cana replantada na mesma área em sucessão por períodos de tempo que excedem 20-30 anos. Este fenômeno também tem sido reportado nos EUA, África do Sul, Austrália e Barbados. Estudos recentes têm relacionado o declínio com infecções fúngicas do sistema radicular da cultura, apesar do declínio produtivo também ocorrer em áreas onde os patógenos não estão presentes. Outros estudos estão sendo realizados para investigar o papel das modificações em propriedades químicas do solo na produtividade da cultura, em áreas cultivadas por longos períodos (Bramley et al., 1996).

No Brasil, a pequena quantidade de informações sobre os efeitos do monocultivo de cana a longo prazo, sobre as propriedades físicas e químicas do solo, dificulta a identificação dos fatores relacionados às quedas de produtividade da cultura, bem como impede que práticas de manejo sejam aplicadas de forma adequada ao longo do tempo a fim

de manter o potencial produtivo do solo nos canaviais. Se consideradas a área colhida de cana no Brasil, cerca de 5 milhões de hectares, e a produção anual de mais de 317 milhões de toneladas de cana, gerando exportações de açúcar no valor de cerca de 4,3 milhões de dólares (Brasil, 2000), é de considerável importância, para o setor e para o país, a geração dessas informações.

Os objetivos do presente trabalho são:

- 1) investigar os efeitos a longo prazo do monocultivo de cana-de-açúcar sobre propriedades físicas e químicas de um NITOSSOLO VERMELHO e de um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO;
- 2) Avaliar a influência das propriedades dos solos em áreas com diferentes períodos de monocultivo de cana-de-açúcar no desenvolvimento radicular e na produtividade da cultura.

4 - REVISÃO DE LITERATURA

4.1 - Origem e história da cana-de-açúcar e da indústria açucareira

As variedades de cana-de-açúcar são espécies ou híbridos do gênero *Saccharum*, que, por sua vez, pertence à família *Gramineae* e à tribo *Andropogoneae*. Por séculos, *S. sinense* foi cultivada na China e *S. barberi* na Índia; porém, foi o aumento do cultivo da cana nobre *S. officinarum* que levou a indústria da cana a espalhar-se através dos trópicos e subtropicais. Provavelmente, a espécie *S. officinarum* se originou na região do Pacífico Sul, na Nova Guiné, tendo se dispersado para o mundo há mais de 10.000 anos (Blackburn, 1984).

Na época da dominação islâmica, entre 600 e 800 DC, a produção de cana já havia se espalhado da Índia para o Iran e outros países do Mediterrâneo. Por volta do século XVI, a cidade de Veneza, na Itália, já havia se tornado o centro da indústria açucareira no mundo; entretanto, era Portugal que dominava o comércio mundial do açúcar. O cultivo da cana continuou seu movimento de dispersão, chegando às Ilhas Madeira e São Tomé, depois às ilhas da Costa Atlântica da África e finalmente ao Brasil. Quando os invasores Holandeses, que controlavam a indústria do açúcar no Brasil, foram expulsos pelos Portugueses em 1654, eles emigraram para novas colônias na América Central, ajudando a formar novos canaviais. Há registros indicando que toletes foram importados de Pernambuco para servirem de mudas para novas plantações em Barbados (Blackburn, 1984).

No Brasil, a atividade sucroalcooleira, incentivada pela colonização portuguesa, espalhou-se por várias partes do país, estabelecendo-se de forma definitiva nas regiões Nordeste e Centro-Sul. No século XX, uma grande evolução da área cultivada e da produtividade ocorreram no Brasil, fazendo com que a produção de açúcar aumentasse em cinco vezes entre 1901-1951, e mais quatro vezes entre 1951-1970 (Carvalho, 1993).

Na década de 1970, a implantação do Proálcool, incentivou a expansão do cultivo da cana e o aumento da produção de álcool, fazendo com que o Brasil se tornasse detentor do maior programa mundial de energia alternativa renovável. Posteriormente, as políticas de preço e comercialização levadas ao setor pelo Proálcool provocaram a elevação substancial do estoque de álcool e açúcar no Brasil, terminando por desincentivar o setor, estagnando a produção em anos recentes (Carvalho, 1993).

4.2 - O monocultivo de cana-de-açúcar: efeitos nas propriedades do solo

Tanto no Brasil quanto em outros países produtores de cana-de-açúcar, adotou-se como padrão o sistema de monocultivo, no qual somente a cana é cultivada em determinada área. Segundo Maclean (1975), embora a Austrália também tenha adotado o monocultivo, este sistema é bastante criticável, uma vez que, praticado em vários países tropicais, freqüentemente levou a declínios na fertilidade do solo.

Estudando um Latossolo Vermelho Escuro após desmatamento e cultivo com cana por 12 e 50 anos em Piracicaba, Cerri et al. (1991) notaram a seguinte evolução das propriedades do solo com aumento no tempo de cultivo: compactação do horizonte subsuperficial; evolução da microestrutura e aumento importante do teor de água disponível entre 0,20-0,40 m de profundidade; aumento no índice de instabilidade estrutural (Is); e acidificação dos horizontes superiores, com redistribuição das bases (Ca, K e Mg) em profundidade. Os autores concluíram que estas variações estavam relacionadas com uma diminuição significativa do estoque de carbono orgânico entre 0-0,20 m de profundidade e um pequeno aumento nos teores de matéria orgânica em profundidade, advindo do crescimento radicular da cana em subsuperfície.

Segundo Silva & Ribeiro (1997), que estudaram os atributos morfológicos e físicos de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, houve diminuição no conteúdo de argila nos horizontes superficiais e aumento da disponibilidade de água nesses horizontes após 18 anos de cultivo.

O estudo de Bramley et al. (1996) mostra que, em áreas onde o monocultivo de cana é prolongado, o solo é, geralmente, mais ácido e menos fértil que em áreas há menos tempo sob monocultivo. Os autores observaram que os efeitos do monocultivo sobre as propriedades químicas do solo, ao longo do tempo, foram claros nos sítios experimentais isolados, mas apresentaram falta de consistência quando comparados entre os diferentes sítios, refletindo a influência das condições específicas de cada lugar (solo, relevo, clima, manejo, etc) nas propriedades estudadas.

Silva & Ribeiro (1995) e Silva & Ribeiro (1998), estudando os efeitos do monocultivo de cana-de-açúcar sobre as propriedades químicas de solos argilosos, concluíram que, com o passar do tempo, o cultivo de cana proporcionou melhoria da fertilidade do solo, aumentando o pH e os níveis de Ca e Mg. Quanto ao P, cujos teores naturais nos solos estudados eram muito baixos, houve aumento de disponibilidade, mas somente no horizonte superficial, resultado do efeito cumulativo do fornecimento via fertilização e da baixa mobilidade do nutriente no solo.

Primavesi (1974), estudando propriedades físicas e químicas de duas áreas de Terra Roxa Estruturada, cultivadas com cana por 5 e 28 anos, observou que, na área cultivada por 5 anos, as concentrações de P e N no solo foram maiores e a produtividade foi de $156 \text{ t}_c \text{ ha}^{-1}$, enquanto na área cultivada por 28 anos a produtividade foi de apenas $6,3 \text{ t}_c \text{ ha}^{-1}$, mesmo com teores mais elevados de Ca e K no solo. Paralelamente, observou-se que, na área cultivada por 5 anos, havia uma camada de solo compactado ocorrendo abaixo de 0,22 m de profundidade, e que, na área cultivada por 28 anos, a camada compactada estava a poucos centímetros abaixo da superfície, resultando em um sistema radicular pouco desenvolvido na

área cultivada a mais tempo, sendo ele confinado a uma camada superficial de solo, onde as concentrações de P, Ca eram menores e o pH era mais ácido que na média da camada arável.

4.3 - Compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar

Os solos ocupados com cana no Brasil antes da implantação do PROALCOOL, principalmente na região Centro-Sul do país, eram em geral os argilosos, de fertilidade média a alta, representados por Latossolos Roxos ou Terras Roxas Estruturadas. A maior limitação destes solos era de natureza física, ou seja, a compactação, agravada ao longo do tempo pela intensa mecanização e pelos sistemas de carregamento e transporte da cana. Devido à grande expansão promovida com o PROALCOOL, o cultivo passou a ocupar, também, solos menos férteis e mais arenosos, como os podzólicos, os quais necessitam de intensos cuidados com a conservação e uso de corretivos e adubos (Orlando Filho et al., 1994).

Segundo Freitas (1987), as atividades de preparo do solo e implantação da cultura de cana-de-açúcar constituem-se no primeiro passo para que a lavoura seja economicamente produtiva,

A importância da compactação do solo na cultura canavieira, hoje internacionalmente reconhecida, chamou a atenção dos cientistas primeiramente nos países onde a mecanização intensa tornou-se comum há mais tempo (Srivastava, 1984). Segundo Freitas (1987), a utilização incorreta de maquinaria agrícola e veículos de transporte cada vez mais pesados, aliada a uma rotina de tráfego cada vez mais intensa, vêm aumentando o problema de compactação dos solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil, principalmente em solos argilosos como Terras Roxas Estruturadas, Latossolos Roxos e Latossolos Vermelho-Escuros.

A princípio, a compactação se deve a dois fatores: mobilização intensa do solo nas atividades de preparo de solo e cultivo; e tráfego de máquinas e equipamentos pesados nas atividades de colheita e transporte. Combinados, tais fatores degradam a estrutura do solo, resultando na formação do “pé-de-grade” (Fernandes et al., 1981) e no adensamento do solo na camada arável (Shulka, 1974). A formação do “pé-de-grade”, que dificulta o crescimento radicular, ocorre, via de regra, mais rapidamente nos solos podzólicos que nos latossolos, e esta diferença de comportamento é devida à estrutura menos desenvolvida (ausência de microagregação) e menos estável (teor elevado de argila dispersa em água) dos podzólicos (Carvalho et al., 1991).

Nos países de clima quente e úmido, o problema de compactação tem sido atribuído à utilização de equipamentos de colheita cada vez maiores e mais pesados e às condições de alta umidade do solo durante a colheita. Segundo Trowse & Humbert (1961), a rápida mudança para colheita mecanizada na cultura canavieira no Havaí, que se tornou necessária devida à escassez de mão-de-obra durante a II Guerra Mundial, resultou em

sensíveis reduções na produtividade quando equipamentos e caminhões grandes e pesados passaram a ser operados nos campos de cana, causando compactação do solo.

A produtividade de lavouras de cana soca em Taiwan também diminuiu com o aumento do uso de maquinaria de colheita após os anos 70. No estudo de Yang (1978), a densidade do solo e a resistência à penetração aumentaram quando o tráfego de colheita foi maior, com diminuição da porosidade total. Estes resultados foram mais pronunciados para maiores teores de umidade do solo, sendo que a zona de influência da compactação se estendeu até 0,40 m de profundidade. Sob condição de estrutura massiva do solo, houve diminuição linear do crescimento de raízes e da produtividade da cana em relação ao aumento da densidade do solo. Nas áreas onde a estrutura do solo era colunar, a diminuição na produtividade da soqueira, causada pela compactação, foi apenas moderada.

Shulka & Ravalo (1976), estudando a compactação do solo devida ao tráfego de carretas de transporte de cana, concluíram que, em solos argilosos, quanto maior o teor de umidade do solo, maior foi a espessura de solo compactado, resultando em maiores valores de resistência mecânica até 0,18 m de profundidade. Segundo Georges (1980), o tráfego de colheita, associado a altos teores de umidade do solo, causou aumentos significativos de cerca de 10% na densidade do solo, resultando em redução do crescimento radicular (18%) e do comprimento dos colmos de cana (27%).

Resultados obtidos por Fernandes et al. (1983) em São Paulo, num estudo sobre os efeitos da compactação sobre a brotação das soqueiras, indicam que a compactação do solo pode, também, ser benéfica à cultura. Segundo os autores, a compactação resultante da passagem dos veículos e máquinas durante a colheita na linha de soqueira promoveu maior contato da terra com o “toco” da cana, reduzindo a evaporação da

água na superfície e contribuindo para a brotação de maior número de gemas. Não obstante, os autores fazem a ressalva de que a ocorrência de compactação em níveis elevados, pode prejudicar o desempenho das novas raízes, resultando em menor produtividade da cultura.

A fim de atenuar os efeitos da compactação, a prática de subsolagem tem sido adotada como operação de rotina em muitas destilarias (Barbieri et al., 1984). De acordo com Ricaud (1978), a subsolagem em áreas com subsolo compactado pode aumentar efetivamente a produtividade da cana, principalmente em anos de menor precipitação. Seus resultados mostram que a subsolagem a 0,61 m de profundidade elevou a produtividade da cana em 19,3% e 39,9%, usando-se um subsolador de hastes parabólicas e um subsolador de hastes verticais, respectivamente.

Avaliando agrônomicamente e economicamente sistemas de preparo de solo para a cana-de-açúcar, Barbieri et al. (1997) concluíram que, tanto para um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, quanto para um Latossolo Roxo textura muito argilosa, os sistemas convencionais (gradagem), resultaram em produções e margens de contribuição (receitas - despesas) maiores que os sistemas com preparo reduzido (subsolagem), não havendo incremento da produção com a introdução do uso do subsolador. Apesar de ser uma prática onerosa, sua necessidade, intensidade e eficiência não têm sido avaliadas de maneira detalhada, não se sabendo, ao certo, para quais situações ela é eficaz.

4.4 - O sistema radicular da cana-de-açúcar

Segundo Fernandes et al. (1983), em seus primeiros estádios de crescimento, a planta de cana-de-açúcar conta com dois sistemas radiculares, tanto no caso da

cana-planta, quando se têm as raízes dos toletes e dos perfilhos que dele brotam posteriormente, quanto no caso da cana-soca, quando há raízes que pertencem à planta já colhida e raízes dos perfilhos de rebrote. Sabe-se que a planta se beneficia dos dois sistemas radiculares por um período que vai de 90 a 120 dias, após o qual as raízes do primeiro sistema (mais antigo) morrem. No entanto, a cultura depende mais intensamente das raízes definitivas para que haja um bom crescimento e uma boa produtividade.

Morfologicamente, o sistema radicular da cana apresenta três grupos de raízes: as superficiais, as de suporte e as em cordas. Os dois últimos grupos crescem em maior proporção que o primeiro nas camadas mais profundas do solo e geram maior resistência da planta à seca, estando cada vez menos presentes nas variedades mais novas e de potenciais produtivos maiores. Assim, há uma tendência de predominar o grupo mais superficial de raízes nas variedades mais modernas, o que deixa as plantas mais sensíveis às condições de clima e de solo nas camadas mais próximas à superfície (Dillewijn, 1952, apud Contiero, 1997).

De acordo com Fernandes (1979), que estudou o sistema radicular da cana-soca em diferentes níveis de densidade do solo em um Latossolo Vermelho-Escuro, aproximadamente 60% das raízes se concentraram na região compreendida entre a distância lateral de 0,30 m em relação à planta e a profundidade de 0,40 m no solo. Segundo o autor, nas condições do estudo, o crescimento das raízes mostrou sofrer pouca influência do aumento da densidade do solo em termos de acúmulo de matéria seca; entretanto, a eficiência das raízes em suprir a parte aérea com água e nutrientes foi prejudicada nos maiores níveis de compactação.

4.5 - Influência da estrutura do solo no desenvolvimento radicular das plantas e da cana-de-açúcar

A estrutura do solo influencia o crescimento das plantas de várias formas, sendo os efeitos sobre a elongação radicular os mais claros e determinantes na habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. Excluindo-se as fissuras, os macroporos e os poros biológicos, os quais formam nichos para o crescimento das raízes, a elongação radicular no solo só é possível quando a pressão radicular é maior que a impedância mecânica. Existem, ainda, outros fatores interrelacionados que influem no crescimento radicular, como a continuidade dos macroporos, a fertilidade química, a presença de microorganismos patogênicos ou simbióticos nos macroporos, a oxigenação do solo e a quantidade de água disponível (Passioura, 1991).

Em solo compactado, o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em condição de solo seco, resulta em maior resistência ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial mátrico da água e, em condição de solo úmido, gera falta de oxigênio e elevadas concentrações de etileno na zona radicular, como efeito da menor aeração (Marschner, 1995). O resultado de todas essas alterações no solo compactado é que as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, às vezes específicas a cada genótipo, a fim de se adaptarem e cumprirem seu papel de absorção de água e nutrientes.

Normalmente, a resistência mecânica do solo causa aumento de diâmetro das raízes na camada adensada (Materechera et al., 1992), e indicações conflitantes de que as raízes diminuem de diâmetro para penetrar pequenos poros devem-se,

provavelmente, ao fato de que a resistência mecânica do solo também provoca a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas (Russel & Goss, 1974). Para Merotto Jr. & Mundstock (1999), as raízes podem crescer através dos poros e pontos de menor resistência, mas são incapazes de reduzir seu diâmetro para penetrar em poros menores.

A compactação do solo reduz a infiltração de água no solo e aumenta o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional nas plantas, fazendo com que as raízes se desenvolvam superficialmente (Moraes et al., 1995; Rosolem et al., 1994). Em solos onde as raízes finas podem explorar canais radiculares e fissuras existentes, culturas com raízes pivotantes são mais afetadas pela compactação que aquelas com raízes fasciculadas mais finas (Whiteley & Dexter, 1982). Entretanto, raízes de maior diâmetro apresentam maior resistência ao encurvamento quando entram em solo compactado (Whiteley & Dexter, 1984), o que é importante em solos deficientes em macroporos, onde as raízes necessitam mais deformar o solo do que explorar fissuras (Henderson, 1989).

Como regra, as pesquisas revelam que o sistema radicular da cana não encontra obstáculos para se desenvolver em solos com densidades até $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que valores de densidade acima de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ costumam resultar em mal suprimento da parte aérea das plantas com nutrientes. Considera-se níveis de macroporosidade entre 15-25% como uma condição física do solo ótima para a cana, razão pela qual a cultura se comporta bem, produtivamente, em solos arenosos, desde que sejam fornecidos água e nutrientes nas proporções necessárias (Fernandes et al., 1983).

4.6 - A agregação do solo como indicador de sua fertilidade física

É fato comprovado, em muitas partes do mundo, que o manejo agrícola inapropriado resulta na deterioração da qualidade do solo (Dexter, 1988). A quantificação das mudanças em algumas propriedades básicas do solo, como resultado de diferentes sistemas de manejo, é essencial para diagnosticar esta deterioração e para elaborar ações que possam remediar os problemas causados. A estabilidade da estrutura do solo é uma das mais importantes propriedades a serem estudadas neste sentido, uma vez que ela descreve a habilidade do solo em manter o arranjo espacial de suas partículas e espaços vazios (“voids”) quando exposto a diferentes tipos de estresse (Kay, 1990).

O estudo da estabilidade e da distribuição dos agregados em água é um dos métodos mais utilizados para se avaliar a estabilidade estrutural dos solos. Segundo Castro Filho (1988), a agregação do solo é influenciada pelos seguintes fatores: natureza dos cátions e seu poder de floculação; química do alumínio em função do pH; mineralogia; tipos de ácidos orgânicos; formação de pontes de ligação entre partículas de argila, cátions polivalentes e matéria orgânica humificada; e atividade microbiológica.

A matéria orgânica é um dos mais relevantes fatores na estabilização dos agregados do solo (Oades, 1984; Roth et al., 1991; Beare et al., 1994a, b). Uma vez que o desmatamento e o cultivo afetam profundamente a dinâmica da matéria orgânica (Nye & Greenland, 1964), terminando por diminuir seus teores no solo, é natural, portanto, que o cultivo provoque diminuição da estabilidade dos agregados. Watts et al. (1996 a,b) mostraram, a partir de experimentos de laboratório e de campo, que o cultivo pode desestabilizar a estrutura do solo.

Roth et al. (1991), estudando a agregação do solo sob mata nativa e sob cultivo em semeadura direta, observaram que sob condição de mata, onde o teor de matéria orgânica foi maior, o índice de estabilidade dos agregados foi maior. O diâmetro médio dos agregados, no entanto, foi maior na área cultivada.

Comparando a estabilidade estrutural de dois solos, um Latossolo Roxo e um Podzólico Vermelho-Amarelo, sob vegetação natural e sob cultivo prolongado de cana (20 anos), Caron et al. (1996) concluíram que, para ambos os solos, o cultivo do solo com a cana diminuiu a estabilidade dos agregados, o que foi devido, principalmente, à diminuição dos teores de matéria orgânica.

No entanto, o cultivo de cana, em algumas situações, pode ser benéfico para os índices de agregação. De acordo com Cerri et al. (1991), apesar de haver diminuição do estoque orgânico nas camadas de solo mais superficiais, diminuindo a estabilidade estrutural, o cultivo prolongado de cana pode aumentar os teores de matéria orgânica em camadas de solo mais profundas. Segundo Gallego et al. (1987), as frações apolares do húmus, favorecidas pelo cultivo da cana, influem positivamente na formação de agregados estáveis em água nas camadas superficiais de solos ferralíticos e vérticos.

4.7 - O intervalo hídrico ótimo do solo como indicador de sua fertilidade física

O “Least Limiting Water Range” ou intervalo hídrico ótimo (IHO) - conforme tradução de Orellana et al. (1997), é definido como sendo a faixa de teores de água do solo na qual são mínimas as limitações ao crescimento das plantas associadas ao potencial de água do solo, à aeração e à resistência do solo à penetração (Silva et al., 1994), tendo sido

proposto como um índice da qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas (Silva et al., 1994; Topp et al., 1994, apud Tormena et al., 1999).

O conceito de água disponível (AD) é parte integrante do conceito de IHO. O valor de água disponível é calculado por meio da diferença entre dois valores que representam um limite superior e um inferior, respectivamente o teor de água do solo na condição de capacidade de campo (Haise et al., 1955) e o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente (Richards & Weaver, 1944; Savage et al., 1996). No caso do IHO também há dois limites, um superior e um inferior, entretanto, cada limite não assume somente um valor fixo. No caso do IHO o limite superior pode ser o teor de água do solo na condição de capacidade de campo (θ_{CC}) ou o teor de água do solo em que a porosidade de aeração se encontra no valor de 10% (θ_{PA}), tido como valor mínimo para um bom crescimento das raízes (Grable & Siemer, 1968). Para o limite inferior, o valor pode ser o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou o teor de água no solo em que a resistência do solo à penetração seja igual a 2,0 MPa (θ_{RP}), tido como um valor geral máximo para um bom crescimento das raízes (Taylor et al., 1966).

Resultados demonstram que o IHO é positivamente correlacionado com o teor de matéria orgânica do solo e negativamente correlacionado com a densidade e com o teor de argila dos solos (Silva & Kay, 1997; Kay et al., 1997). Segundo Letey (1985), a degradação da estrutura do solo resulta numa redução do IHO, aumentando a probabilidade das raízes das culturas serem expostas a condições de insuficiente aeração ou excessiva resistência do solo (Kay, 1990).

Silva & Kay (1996) verificaram que o crescimento do milho correlacionou-se positivamente com o IHO, e que a ocorrência de teores de água do solo fora dos limites do IHO foi negativa para o crescimento da cultura. Stirzaker (1997) demonstrou que, com o aumento da compactação, ou seja, com o aumento da densidade do solo, ocorreu redução do IHO e do crescimento vegetativo de plantas de tomate.

Tormena et al. (1999) concluíram que o uso do conceito de IHO possibilitou identificar fatores físicos que controlam a qualidade física do solo em relação ao crescimento das plantas. Nos dois sistemas de manejo comparados no estudo, plantio direto e plantio convencional, a resistência do solo foi o fator que limitou o IHO, embora sejam necessários estudos para estabelecer melhor a relação entre resistência à penetração e crescimento das plantas, principalmente para as condições de solos tropicais.

5 - MATERIAL E MÉTODOS

5.1 - Localização da área de estudo e caracterização do meio físico

O estudo foi realizado entre os meses de janeiro e novembro de 2000, em áreas de produção de cana-de-açúcar da usina São Manoel, localizada no município de São Manuel-SP (Figura 1), cuja sede administrativa tem as seguintes coordenadas geográficas: 22°46' de latitude Sul; 48°34' de longitude Oeste; altitude de 740 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa - clima mesotérmico úmido, com inverno frio e seco e verão quente e úmido. A temperatura média do mês mais quente é maior que 22 °C, ocorrendo no mês mais seco precipitação superior a 30 mm. A precipitação média anual está entre 1100 e 1700 mm (Brasil, 1960).



Figura 1. Localização do município de São Manuel na Região Centro-Oeste de São Paulo.

Na região ocorrem as Formações Geológicas Botucatu e Serra Geral, pertencentes ao Grupo São Bento, o qual acha-se incluído na Bacia do Paraná (IPT, 1981). Para cada formação escolheu-se uma classe de solo, sendo a classe NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ) representante da Formação Botucatu e a classe NITOSSOLO VERMELHO (NV) representante da formação Serra Geral.

5.2 - Áreas estudadas: descrição e histórico

Por se originarem de materiais distintos e possuírem propriedades naturalmente contrastantes, não havendo sentido em compará-las de forma direta, as classes de solo foram estudadas separadamente. Para cada classe foram escolhidas três áreas de estudo,

sendo uma não cultivada (vegetação nativa) e duas cultivadas com a mesma variedade de cana-de-açúcar, com o mesmo número de cortes (soca), diferindo apenas quanto ao tempo de cultivo com a cana. Assim, foram estudadas seis áreas no total, sendo que nas duas áreas sob vegetação nativa foram abertas trincheiras para descrição e caracterização das classes de solo (Apêndice).

5.2.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

- **ÁREA NQ₀**: área de preservação ambiental. Localizada próxima à área NQ₂₅, serviu de referência para as propriedades do solo sem cultivo. É importante ressaltar que, apesar de ser uma área de preservação sob vegetação de cerrado, foram constatados sinais de alteração, ou seja, de interferência antrópica. Em alguns pontos foram encontrados vestígios de retirada de árvores e presença de colméias de apicultura.
- **ÁREA NQ₀₅**: área cultivada com cana-de-açúcar por 5 anos, variedade RB72454. Sequência de uso: desmatamento → pastagem → cana.
- **ÁREA NQ₂₅**: área cultivada com cana-de-açúcar por 25 anos, variedade RB72454. Sequência de uso: desmatamento → pastagem → cana.

Anteriormente ao plantio, realizado em novembro de 1994 em NQ₀₅ e NQ₂₅, fez-se a aplicação 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 2 t ha⁻¹ de gesso agrícola, seguida de incorporação com grade na camada de 0,0-0,2 m de profundidade. No sulco de plantio, ambas as áreas receberam 30 t ha⁻¹ de torta de filtro e 1,2 t ha⁻¹ da fórmula 17-05-10. Em pós-colheita, ambas as áreas receberam 0,93 t ha⁻¹ da fórmula 7,5-00-10,5 em 1998, diminuindo para 0,67 t ha⁻¹ da mesma fórmula em 1999, sempre por meio da chamada “tríplice operação”

(subsolagem+adubação+nivelamento). No período de coleta de amostras e avaliações no campo, janeiro a outubro de 2000, a cana estava no quinto corte.

5.2.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

- **ÁREA NV₀**: área de preservação ambiental. Localizada próxima à área NV₁₂, serviu de referência para as propriedades do solo sem cultivo. Novamente, é importante ressaltar que, apesar de ser uma área de preservação sob mata, foram constatados sinais de alteração. Em alguns pontos foram encontrados vestígios de retirada de árvores.
- **ÁREA NV₁₂**: área cultivada com cana-de-açúcar por 12 anos, variedade SP79-1011. Sequência de uso: desmatamento → café → cana.
- **ÁREA NV₅₀**: área cultivada com cana-de-açúcar por 50 anos, variedade SP79-1011. Sequência de uso: desmatamento → café → cana.

No plantio, realizado em outubro de 1996 em NV₁₂ e NV₅₀, ambas as áreas receberam 1,2 t ha⁻¹ da fórmula 33-10-10 no sulco. Em pós-colheita, também por meio da “tríplice operação”, as áreas receberam 1,3 t ha⁻¹ da fórmula 7,5-00-10,5, no ano de 1998. Em 1999, utilizando-se a mesma fórmula, NV₁₂ recebeu 1,35 t ha⁻¹ e NV₅₀ recebeu 1,1 t ha⁻¹. No período de coleta de amostras e avaliações no campo, janeiro a outubro de 2000, a cana estava no terceiro corte.

5.3 - Avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar

A avaliação do desenvolvimento e da distribuição das raízes da cana no solo foi feita em parede de trincheira ou perfil – “profile wall” (Böhm, 1979). Em cada área

com cana foram abertas três trincheiras transversais à direção do preparo do solo, com dimensões aproximadas de 1,8 m de largura, 1,0 m de profundidade e 1,5 m de comprimento (Figura 2). A distância média entre as trincheiras foi de 30 a 50 metros, mantendo-se o nível em relação à pendente do terreno.

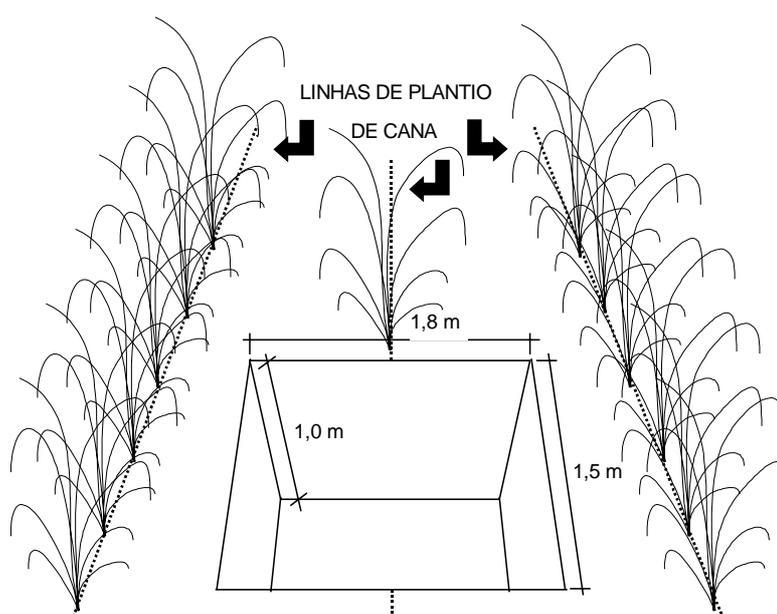


Figura 2. Dimensões e posição das trincheiras em relação às linhas de plantio da cana.

Visando uma melhor qualidade das informações geradas pelo estudo de raízes, as avaliações foram feitas por meio de dois métodos diferentes em etapas consecutivas, sendo eles: filmagem de raízes expostas em perfil e coleta de amostras de raízes.

5.3.1 - Filmagem de raízes expostas em perfil

Após a preparação cuidadosa do perfil em cada trincheira, a uma distância de cerca de 0,10 m da base da touceira de cana, procedeu-se um corte de nivelamento

das raízes rente ao solo para, em seguida, realizar a exposição das mesmas no perfil com o rolo escarificador (Figura 3), retirando uma camada de solo de cerca de 0,01 m de espessura. As raízes expostas foram, então, pintadas individualmente com pincel e tinta látex branca (Figura 4) e filmadas com câmera VHS (Figura 5).



Figura 3. Exposição das raízes com rolo escarificador.

Figura 4. Pintura individual das raízes com tinta látex branca.

Figura 5. Filmagem em quadros devidamente identificados de 0,23 x 0,23 m.

A área de perfil considerada para esta avaliação foi de 1,4 m de largura, correspondente ao espaçamento da cultura (0,7 m para cada lado da touceira), por 0,7 m de profundidade. Para permitir uma boa definição nas imagens bem como a calibração das mesmas com dimensões reais, a filmagem foi feita em pequenos quadros de 0,23 x 0,23 m delimitados por fio de nylon, totalizando 18 quadros por perfil, conforme ilustra a Figura 6.

As imagens gravadas foram digitalizadas e analisadas no laboratório de imagens do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina por meio do programa de computador SIARCS[®] (Crestana et al., 1994), sendo avaliados o comprimento

e a área radiculares. Com os resultados de cada quadro, fez-se a totalização dos dados por profundidade (0,00-0,23; 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m) e por distância em relação à touceira (0,00-0,23; 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m), nas metades esquerda e direita do perfil (figura 6). Com os valores das duas metades foram calculados valores médios para representar os resultados de cada trincheira.

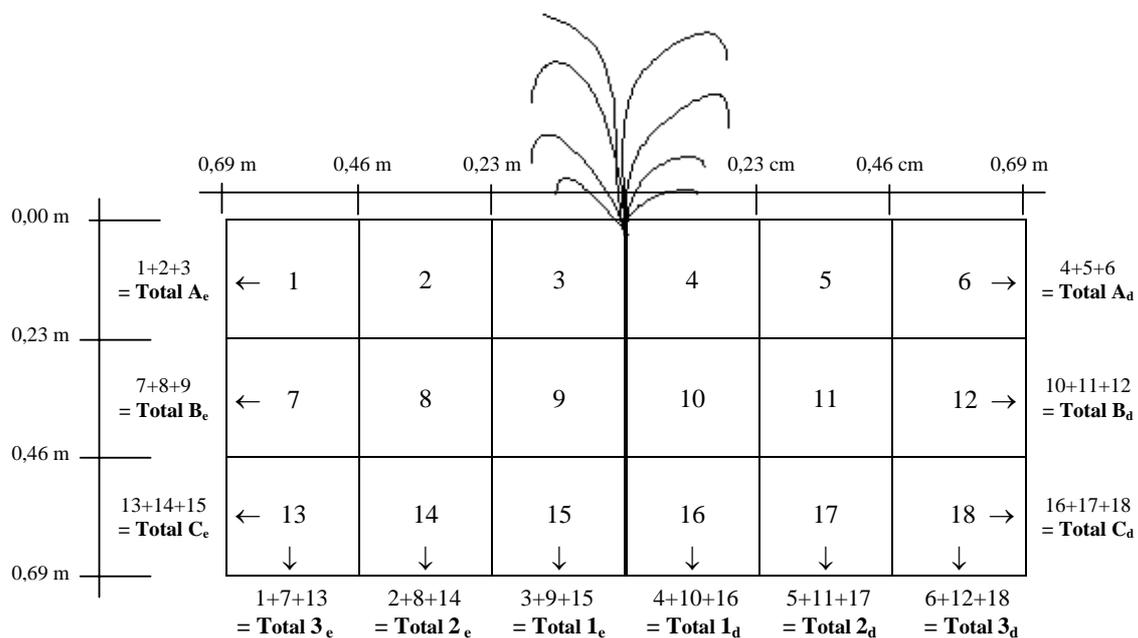


Figura 6. Distribuição dos quadros filmados, em relação ao perfil, e totalização dos resultados por profundidade (totais A, B e C) e por distância em relação à touceira (totais 1, 2 e 3).

5.3.2 - Coleta de amostras de raízes

Utilizando-se amostradores cúbicos de medidas 0,10 x 0,10 x 0,10 m, confeccionados especificamente para este estudo (Figuras 7 e 8), foram coletadas amostras de raízes de acordo com a seguinte estratificação: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,60 e 0,60-0,70 m de profundidade. Foram dois pontos de coleta em cada

trincheira, um à esquerda e outro à direita da touceira, guardando-se uma distância aproximada de 0,25 m entre o ponto de amostragem e os colmos de cana.



Figura 7. Amostrador de raízes (0,10 x 0,10 x 0,10 m). Figura 8. Inserção do amostrador com auxílio de suporte e macaco hidráulico.

As amostras obtidas (solo + raízes) foram colocadas em baldes com água, onde promoveu-se a dispersão do solo manualmente. Após um período de espera de 30 minutos, visando facilitar a separação das raízes, o conteúdo dos baldes foi despejado sobre peneira com malha de 0,0005 m e lavado com jatos de água, até a eliminação do solo. Detritos (pedaços de palha, carvão, sementes, etc) foram retirados com pinça, até restarem somente as raízes, as quais foram transferidas para frascos de estocagem, contendo uma solução composta por 70% de água destilada e 30% de álcool absoluto, e mantidas sob refrigeração (± 5 °C).

No momento da análise, as amostras foram retiradas dos frascos, colocadas sobre papel toalha, para eliminar o excesso da solução com álcool, e transferidas para bandejas de acrílico, confeccionadas nas dimensões exatas para uso com “scanner” (modelo HP Scanjet 4C/T¹). Encaixadas na superfície de digitalização do “scanner”, as bandejas receberam água suficiente para produzir um filme de cerca de 0,005 m de altura, o

¹ Hewlett Packard Company. www.hp.com

qual facilitou a distribuição das raízes na superfície da bandeja, evitando-se sobreposições, e diminuiu o aparecimento de sombras nas imagens. Com o programa de computador Win Mac Rhizo² (versão 3.8-b), as imagens das amostras foram digitalizadas e analisadas, sendo quantificados: o comprimento radicular; o diâmetro radicular médio; o volume radicular; e a área superficial radicular. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a ± 60 °C por 48 horas, para quantificação da massa da matéria seca radicular.

5.4 - Perfil cultural do solo

Em cada trincheira aberta para a avaliação das raízes, procedeu-se, também, o estudo das estruturas do solo por meio do método do perfil cultural (Gautronneau & Manichon, 1987) a partir da metodologia adaptada por Tavares Filho et al. (1999). Com este método foram descritos os tipos de estruturas do solo.

5.5 - Amostragem do solo

5.5.1 - Coleta de amostras de solo com estrutura deformada

As amostras de solo com estrutura deformada foram coletadas com trado nas seguintes profundidades: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m. Foram 15 pontos de amostragem distribuídos ao acaso no centro das entrelinhas de plantio da cultura, ao longo do eixo formado pelas três trincheiras. As 15 amostras de cada profundidade

² REGENT INSTRUMENTS INC. 165, Fatima Ave., Quebec, Qc. G1P 2C7, Canadá.

foram homogeneizadas em uma amostra composta, da qual foram retiradas alíquotas para a realização das análises química e granulométrica. Vale ressaltar que, no ano de 2000, o clima na região de estudo foi, atipicamente, seco, imprimindo uma condição de baixo teor de água no solo por vários meses, o que pode ter afetado a disponibilidade de alguns nutrientes.

5.5.2 - Coleta de amostras de solo com estrutura indeformada

As amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas com um aparato desenvolvido especialmente para este estudo, constituído basicamente de um macaco hidráulico, um anteparo, dois alicerces para lastragem e um acoplador tipo “castelo” para os cilindros amostradores (Figura 9). A confecção deste equipamento teve por objetivos melhorar a qualidade das amostras, diminuindo deformações e compactação do solo dentro dos cilindros no caso do NITOSSOLO VERMELHO, e reduzir a perda de amostras por falhas na coleta no caso do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, cuja estrutura é tão frágil que raramente suporta a inserção do cilindro no solo a golpes de marreta, como é usual.

Os cilindros amostradores, confeccionados em aço inoxidável, tinham aproximadamente de 53 mm de altura e 48 mm de diâmetro interno. Com eles foram coletadas 32 amostras em cada área, na profundidade de 0,10 - 0,20 m de profundidade, utilizadas para determinar as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração, a densidade do solo e o intervalo hídrico ótimo. A distribuição dos pontos de coleta deu-se de forma aleatória, nas linhas e entrelinhas de plantio da cultura próximas às trincheiras.

A razão para que esta coleta fosse feita somente em uma profundidade, foi a quantidade elevada de amostras. Com 32 amostras em quatro áreas, foram 128 amostras no total, número relativamente alto para determinação das curvas de retenção de água, se considerada a capacidade de processamento destas amostras na FCA/UNESP. A escolha da profundidade de 0,10-0,20 m para a coleta deveu-se ao fato de esta ser uma profundidade na qual grande parte do sistema radicular das plantas se desenvolve.

A umidade do solo durante a coleta das amostras foi distinta para as classes de solo. Enquanto para o NEOSSOLO as amostras foram coletadas após a chuva, com solo úmido para facilitar a retenção do solo dentro dos cilindros, mas sem problemas de deformação da estrutura, para o NITOSSOLO, encontrar o teor de água favorável à coleta foi mais difícil. Nas áreas de NITOSSOLO foi necessário esperar a condição friável da estrutura do solo, passando-se entre 2 e 6 dias após uma chuva (dependendo da precipitação).



Figura 9. Aparato para coleta de amostras de solo com estrutura indeformada.

5.5.3 - Coleta de amostras de agregados do solo

As amostras de agregados foram coletadas com o auxílio de pá-reta (“vanga”) e de pá de jardinagem. Em cada área foram seis pontos de amostragem, distribuídos aleatoriamente nas entrelinhas de plantio da cultura próximas às trincheiras, considerando as seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. As amostras, com cerca de 1 kg, foram embaladas em sacos plásticos grossos e acomodadas em caixas de transporte com uma camada de pó-de-serra no fundo, a fim de evitar modificações nos agregados durante o transporte até o laboratório.

O teor de água do solo na coleta das amostras foi, também, distinto entre as classes de solo. Nas áreas de NEOSSOLO os agregados foram coletados com solo seco, pois quando úmido o NEOSSOLO apresentou coesão muito fraca. Assim, se as amostras fossem coletadas úmidas, a maioria dos agregados seriam eliminados no transporte. Para o NITOSSOLO, que apresentou coesão e plasticidade muito fortes, buscou-se a condição friável após a ocorrência de chuva (2-6 dias).

5.6 - Análises e determinações com as amostras de solo

5.6.1 - Análise química do solo

Para a análise química do solo foram utilizados os métodos descritos por Raij et al. (2001), quer sejam: pH determinado em CaCl_2 ; Al extraído por KCl e determinado por titulometria; H+Al determinada por solução SMP; matéria orgânica

determinada por digestão ácida (dicromato de sódio + H₂SO₄) e determinação por espectrofotometria; P, K, Ca e Mg extraídos por resina trocadora e determinação por espectrofotometria; N por digestão ácida (H₂SO₄ + HCl), destilação e determinação por titulometria; B extraído em água quente, Cu, Fe, Mn e Zn extraídos por DTPA, todos determinados por espectrofotometria.

5.6.2 - Determinação da granulometria do solo

A análise granulométrica das amostras foi realizada pelo método do hidrômetro ou densímetro. Inicialmente, adotou-se a metodologia descrita em Embrapa (1997), com agitação rápida das amostras em agitador tipo “stirrer” por 15 minutos; mas, devido à observação de valores muito elevados de silte nos resultados iniciais, referentes às amostras do NITOSSOLO, resolveu-se averiguar se havia problemas quanto à dispersão.

Uma pequena revisão bibliográfica revelou que o agitador “stirrer” é tido como menos eficiente que outros mais lentos na dispersão da argila. Trabalhos como os de Grohmann & Raij (1974) e Carvalho et al. (1988) mostram um consenso de que a agitação lenta é mais eficiente e que, para alguns solos, a desagregação mecânica é mais importante, deixando em segundo plano a dispersão química. Por este motivo, testou-se a agitação lenta com agitador recíproco por períodos de 6 e 12 horas e volumes de água destilada de 100, 150 e 200 ml. Os resultados mostraram uma diminuição do teor de silte e um aumento no teor de argila em relação aos resultados obtidos com o “stirrer”, sendo que a combinação entre o período de 12 horas e o volume de 150 ml de água destilada foi a mais eficiente na dispersão.

Por fim, os passos para a análise granulométrica foram: pesar alíquotas de TFSA de 50 g para o NITOSSOLO e de 100 g para o NEOSSOLO em beakers de 250 ml,

mais 20 gramas de TFSA em latas de alumínio para determinação de umidade; adicionar às amostras contidas nos beckers 50 ml de solução de NaOH 1N e 100 ml de água destilada, promovendo mistura com bastão de vidro; transferir os volumes para os frascos de agitação, lavando os beckers com 50 ml de água destilada; agitar as amostras por 12 horas a 150 rpm; passar o volume por peneira de malha 0,053 mm e coletar em proveta de 1000 ml; lavar o material retido com água destilada até restar somente areia; completar o volume da proveta para 1000 ml; deixar uniformizar a temperatura das provetas por algumas horas; agitar a suspensão com bastão próprio, realizando 60 ciclos de subida e descida num tempo de 30 segundos; realizar a primeira leitura com o densímetro 40 segundos depois da agitação (silte + argila); medir a temperatura da suspensão; realizar a segunda leitura com o densímetro 2 horas após o término da agitação; medir a temperatura da suspensão novamente. Uma prova em branco deve ser preparada, adicionando 50 ml da solução 1 N de NaOH numa proveta e completando o volume até 1000 ml. A densidade e a temperatura da prova em branco devem ser medidas da mesma forma e nos mesmos tempos aplicados para as suspensões com solo.

5.6.3 - Determinação da curva de retenção de água do solo (CRA)

Após a coleta, as amostras indeformadas receberam um pedaço de tecido sintético na extremidade inferior, fixado com atilho de borracha, e foram recobertas com papel alumínio e filme plástico de PVC, a fim de atenuar o ressecamento durante o período de armazenagem, tempo em que foram mantidas em refrigeração a ± 5 °C para inibir eventos que pudessem modificar as amostras, como a germinação de sementes, a brotação de raízes ou atividades de insetos e microrganismos.

O processamento das amostras iniciou-se pela saturação, realizada pela elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja até atingir cerca de $\frac{2}{3}$ da altura das amostras, assim permanecendo por um período de 24-48 horas. As curvas de retenção de água foram elaboradas adotando-se o procedimento descrito por Silva et al. (1994). Determinou-se que as curvas seriam estimadas a partir de um conjunto de oito potenciais matriciais: $-0,004$, $-0,006$, $-0,01$, $-0,033$, $-0,07$, $-0,1$, $-0,5$ e $-1,5$ MPa, cada um com quatro repetições, totalizando 32 amostras. Desta forma, oito grupos de quatro amostras foram simultaneamente submetidos aos diferentes potenciais matriciais. Atingido o equilíbrio, as amostras foram pesadas (balança com precisão de centésimos de grama) e utilizadas para determinar a resistência à penetração (ítem 5.9), sendo secas em estufa, em seguida, para determinação do teor de água e da densidade do solo (ítem 5.10).

Para os dois maiores potenciais matriciais, $-0,004$ e $-0,006$ MPa, utilizou-se uma “mesa de tensão” (Figura 10), desenvolvida para este estudo segundo Oliveira (1968), enquanto que placas porosas e extratores de Richards (Figura 11) foram utilizados nos demais potenciais (Klute, 1986; Reeve & Carter, 1991; Topp et al., 1993).

A relação funcional entre potencial matricial (ψ) e o teor volumétrico de água (θ_v) foi ajustada com os dados obtidos até esta fase por meio da equação 2, empregada por Silva et al. (1994):

$$\theta_v = a |\psi|^b \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: θ_v = teor volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$); ψ = potencial matricial (m); a, b = constantes estimadas no ajuste da função.



Figura 10. Mesa de tensão utilizada para os potenciais matriciais de $\bar{\psi}$ 0,004 e $\bar{\psi}$ 0,006 MPa (a).
Detalhe das amostras na mesa, cobertas com plástico para evitar evaporação (b).

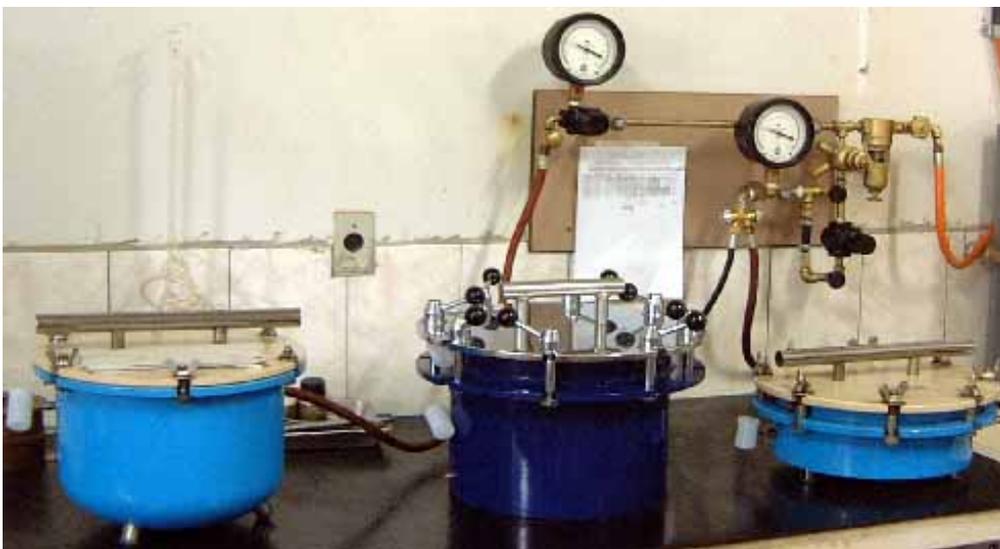


Figura 11. Extratores de Richards utilizados na drenagem das amostras de solo para os potenciais matriciais entre $\bar{\psi}$ 0,01 e $\bar{\psi}$ 1,5 MPa.

5.6.4 - Determinação da curva de resistência do solo à penetração (CRP)

A resistência do solo à penetração foi determinada em cada amostra utilizando um penetrômetro controlado por computador, desenvolvido no Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Maringá (Figura 12) e composto por: atuador linear elétrico com motor de passo; base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra; célula de carga com capacidade nominal de 20 Kg acoplada na extremidade do braço mecânico do atuador; e uma haste metálica com ponta cônica de 4 milímetros de diâmetro e semi-ângulo de 30° acoplada na célula de carga.

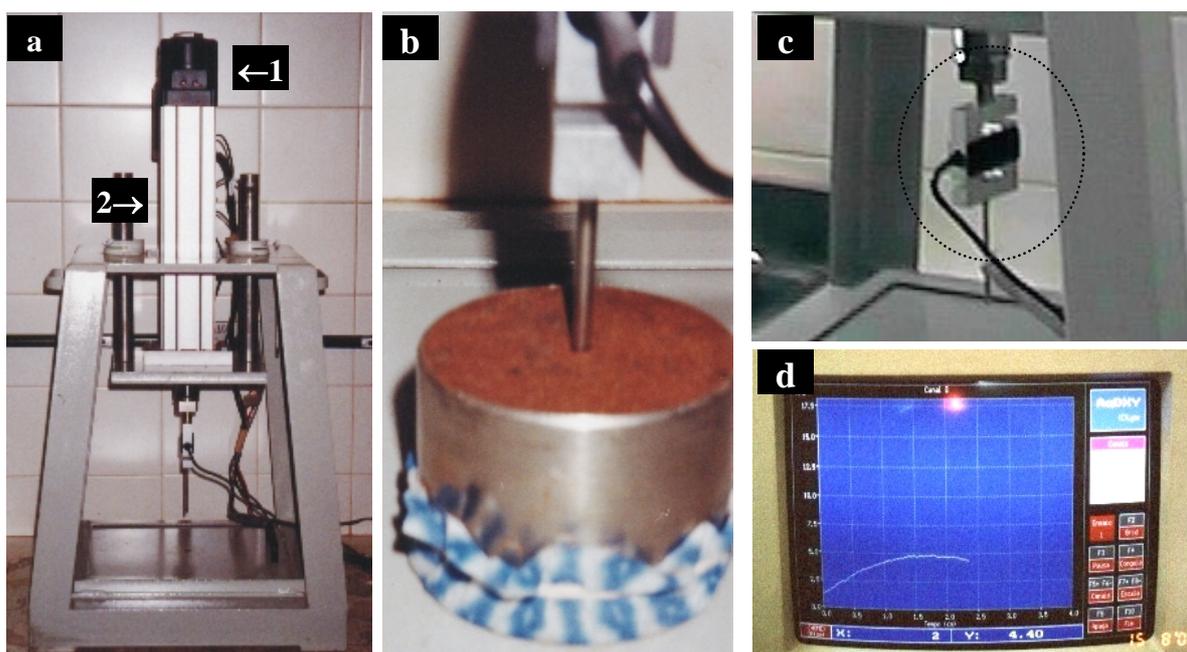


Figura 12. (a) Penetrômetro controlado por computador, sendo vistos o motor de passo (1) e o atuador linear (2); (b) exemplo do posicionamento da amostra durante o ensaio de resistência; (c) detalhe da célula de carga acoplada no braço mecânico do atuador; (d) registro dos dados de resistência ao longo do eixo central da amostra.

O valor de resistência das amostras resultou de medições feitas ao longo do eixo longitudinal no centro dos cilindros, com velocidade de penetração de 0,01 m por minuto até a profundidade de 0,04 m, descartando-se as medidas obtidas entre a superfície e 0,01 m de profundidade. A frequência de medida de resistência foi de um valor a cada 0,75 segundo, sendo o valor final a média de um total de 240 leituras. Momentos antes da determinação de resistência, cada amostra foi pesada, a fim de se determinar a umidade do solo no momento exato do ensaio. A relação funcional entre resistência do solo à penetração (RP), teor volumétrico de água (θ_v) e densidade do solo (D_s) foi ajustada por meio da equação 3 (não linear), proposta por Busscher (1990):

$$RP = c \theta_v^d D_s^e \quad (Eq. 3)$$

Onde: RP = resistência à penetração (MPa); θ_v = teor volumétrico de água da amostra ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); c , d , e = constantes.

Os ajustes das curvas de resistência à penetração, bem como de retenção de água, foram feitos através da rotina PROC REG e PROC GLM (Statistical Analysis System Institute, 1986).

5.6.5 - Determinação da densidade do solo (D_s)

A densidade do solo (D_s) foi determinada a partir das mesmas amostras utilizadas para determinar as curvas de retenção de água e resistência à penetração.

Após a determinação da resistência do solo à penetração, as amostras foram levadas para estufa a ± 105 °C por 24-36 horas, dependendo do teor de água, e transferidas para dessecadores para depois serem pesadas. A partir do peso do solo seco e do volume calculado para cada cilindro, calculou-se a densidade por meio da equação 1 (Blake & Hartge, 1986).

$$D_s = M_s/V_t \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: D_s = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); M_s = massa do solo seco em estufa (Mg); V_t = volume total da amostra (m^3).

5.6.6 - Determinação do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO)

O IHO foi determinado conforme descrito em Silva et al. (1994), sendo calculado um valor de IHO para cada amostra, com valor conhecido de densidade. Os valores críticos para o crescimento das plantas associados com o potencial mátrico, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo, ou o teor de água do solo no potencial de $\sim 0,01$ MPa (θ_{CC}) (Haise et al., 1955), o ponto de murcha permanente, ou o teor de água do solo no potencial de $\sim 1,5$ MPa (θ_{PMP}) (Richards & Weaver, 1944; Savage et al., 1996), o teor de água do solo em que a resistência à penetração (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (Taylor et al., 1966) e o teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é 10% (Grable & Siemer, 1968). Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidos substituindo-se ψ no modelo de retenção de água ajustado aos dados pelos potenciais de $\sim 0,01$ e $\sim 1,5$ MPa, respectivamente. O valor de θ_{RP} foi obtido substituindo-se RP no modelo de

resistência ajustado aos dados pelo valor 2,0 MPa. O valor de θ_{PA} foi obtido por meio da equação 4.

$$\theta_{PA} = \theta_{SAT} - 0,1 \quad (Eq. 4)$$

Onde: θ_{PA} = teor de água do solo em que a porosidade de aeração é igual a 10% (m^3m^{-3});
 $\theta_{SAT} = (1-Ds/2,65)$, sendo Ds o valor da densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e 2,65 o valor da densidade média das partículas neste solo ($Mg m^{-3}$) (Imhoff et al., 2001).

O IHO foi calculado como a diferença entre os limites superior e inferior dos teores de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados, sendo o limite superior o menor valor de θ entre θ_{CC} e θ_{PA} , e o limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} .

5.6.7 - Determinação da agregação do solo

Sendo as duas classes de solo bastante distintas quanto à agregação, resultado da discrepância entre os materiais de origem, foram utilizadas duas metodologias distintas para a determinação da agregação. Para o NEOSSOLO, sem coesão entre as partículas primárias quando imerso em água, determinou-se a distribuição dos agregados a seco, enquanto que para o NITOSSOLO determinou-se a distribuição e estabilidade dos agregados em água.

Em laboratório, as amostras de NEOSSOLO foram secas ao ar para aumentar a coesão entre as partículas, e tamisadas num jogo de duas peneiras com malhas de 0,008 e 0,004 m, preservando-se os agregados retidos na peneira com malha de 0,004 m (Embrapa, 1997). O tamisamento a seco foi realizado em agitador de peneiras tipo magnético (marca Bertel) com três conjuntos de peneiras para que cada amostra fosse analisada em triplicata (3 subamostras), obtendo-se uma média final para cada amostra. Cada conjunto no agitador foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 0,002; 0,001; 0,0005; 0,00025 e 0,000125 m. Considerando-se a fração de solo retida no fundo coletor, abaixo da última peneira (0,000125 m), foram seis classes de agregados.

Quatro subamostras de 50 gramas foram retiradas de cada amostra, três para o tamisamento e uma para determinar o teor de água do solo. Colocadas nos conjuntos de peneiras, as subamostras foram tamisadas por 15 minutos, com o aparelho regulado em potência máxima. Em seguida, o solo de cada classe de agregados foi transferido para recipientes de pesagem, com auxílio de pincel, e pesado em balança com precisão de centésimos de grama. Os pesos foram então corrigidos para peso de solo seco por meio do teor de água determinado em cada amostra. Uma pequena alíquota de cada amostra também foi separada para determinar o teor de matéria orgânica, conforme a metodologia descrita no item 5.6.1 – Análise química do solo.

Os valores obtidos foram, então, usados para calcular o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG), utilizando as equações 5 e 6 (Castro Filho et al., 1998), respectivamente.

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: x_i = diâmetro médio das classes (m); w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$\text{DMG} = \text{EXP} \frac{\sum_{i=1}^n w_p \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde: w_p = peso dos agregados de cada classe (g).

No caso do NITOSSOLO, as amostras trazidas do campo foram tamisadas num conjunto de duas peneira com malhas de 0,019 e 0,004 m, preservando-se os agregados retidos na peneira com malha de 0,004 m, conforme descrito em Castro Filho et al. (2002). O tamisamento a úmido foi realizado pelo método Yoder (Yoder, 1936), utilizando-se um aparelho que movimentava verticalmente três conjuntos de peneiras imersos em água, possibilitando a análise das amostras em triplicata e a obtenção de uma média final por amostra. Cada conjunto no aparelho foi composto por 6 peneiras com as seguintes malhas: 0,008; 0,004; 0,002; 0,001; 0,0005; e 0,00025 m. O solo que passou pela última peneira do conjunto (0,00025 m), ficando disperso na água, foi quantificado por diferença entre o peso total da subamostra e a somatória dos pesos do solo retido em cada peneira, totalizando sete classes de agregados.

Quatro subamostras de 50 gramas foram retiradas de cada amostra, três para o tamisamento e uma para determinar o teor de água do solo. Sobre as peneiras superiores (0,008 m) de cada conjunto foram colocados disco de papel filtro, sobre os quais as amostras foram depositadas. Com os conjuntos de peneiras na posição superior, em relação ao curso de movimentação, o nível da água no tanque de imersão foi elevado até o contato com o papel filtro, assim permanecendo por 15 minutos para que o solo fosse saturado por capilaridade. Em seguida, os discos de papel filtro foram retirados, o aparelho foi acionado e as amostras foram tamisadas por 15 minutos. O curso de deslocamento das peneiras foi de 0,04 m e a frequência ajustada para 30 ciclos por minuto. É importante frisar que não deve ocorrer queda de água sobre as amostras pela borda da peneira superior, o que ocorre caso o nível da água esteja elevado ou o curso de deslocamento seja maior que os 0,04 m. Uma pequena alíquota de cada amostra também foi separada para determinar o teor de matéria orgânica, conforme a metodologia descrita no ítem 5.6.1 – Análise química do solo.

O solo retido em cada peneira foi transferido para frascos com auxílio de jatos fracos de água, os quais foram levados para secagem em estufa a ± 105 °C por 24 horas, sendo então pesados em balança com precisão de centésimos de grama. Obtidos o peso seco de solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, por meio da determinação do teor de água do solo, os valores de DMP e DMG foram calculados através das equações 5 e 6, respectivamente. Calculou-se, também, para o NITOSSOLO, o índice de estabilidade dos agregados, utilizando a equação 7 (Castro Filho et al., 1998).

$$IEA = \left[\frac{\text{Peso da amostra seca} - wp\ 25}{\text{Peso da amostra seca}} \right] \cdot 100 \quad (Eq. 7)$$

Onde: wp 25 = peso dos agregados de cada classe <0, 0,00025 m.

5.7 - Avaliação de parâmetros morfológicos da cana e produtividade

Antes da colheita da cana, foram delimitadas 5 parcelas em cada área de estudo para avaliação da produtividade. As parcelas foram dimensionadas com 4 linhas de plantio de 4 metros de comprimento cada, resultando em 16 metros lineares de plantio por parcela. Em cada parcela fez-se a contagem e o corte de todos os colmos, os quais, após a eliminação das folhas e dos ponteiros, foram pesados. Em seguida, foram separados 5 colmos por linha de plantio (20 colmos por parcela), nos quais foram medidos o diâmetro basal, no meio do 1º entrenó acima do corte, o comprimento do colmo, por meio da distância entre o 1º nó basal e o último nó apical, e o número de entrenós.

5.8 - Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias encontradas foram comparadas estatisticamente pelo teste T, no nível de 5% de probabilidade, no caso de duas áreas comparadas, ou pelo teste de Tukey, também no nível de 5%, no caso de três áreas comparadas (Statistical Analysis System Institute, 1986).

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Fertilidade Química do Solo

6.1.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

A composição granulométrica e as principais propriedades químicas do NQ nas áreas estudadas encontram-se no Quadro 1. A textura do solo foi bastante similar nas diferentes áreas estudadas (arenosa), mostrando ser válida a comparação entre as mesmas. Nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, entretanto, a área de mata (NQ₀) apresentou teores de argila ligeiramente maiores que nas áreas cultivadas.

A comparação dos teores de carbono orgânico (C_{orgânico}) e nitrogênio total (N_{total}) entre a área de mata (NQ₀) e as áreas cultivadas (NQ₀₅ e NQ₂₅) indica que, com o cultivo, houve decréscimo no teor de matéria orgânica (MO) na camada superficial do solo,

Quadro 1. Composição granulométrica e propriedades químicas de um NQ sob mata (NQ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 5 (NQ₀₅) e 25 anos (NQ₂₅)¹.

Camada (m)	Área	Areia	Silte	Argila	C _{orgânico} ⁽²⁾	N _{total}	C/N	pH	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
	NQ ₀	850	10	140	14	1,5	9	4,1	6	9	61	0,9	7	3	11	72	15
0,00 - 0,10	NQ ₀₅	920	0	80	7	0,5	14	6,0	3	1	11	0,4	16	9	25	36	69
	NQ ₂₅	920	0	80	8	0,5	16	5,8	4	1	16	0,2	19	8	27	43	63
	NQ ₀	860	10	130	9	0,8	11	4,2	5	7	40	0,5	4	2	6	46	13
0,10 - 0,20	NQ ₀₅	900	0	100	6	0,4	15	5,0	1	1	14	1,0	9	4	14	28	50
	NQ ₂₅	900	10	90	7	0,4	17	5,5	2	1	21	0,2	16	8	24	45	53
	NQ ₀	860	10	130	7	0,6	12	4,1	2	8	42	0,3	3	1	4	46	9
0,20 - 0,40	NQ ₀₅	880	0	120	5	0,3	17	4,4	1	4	16	0,8	4	2	7	23	30
	NQ ₂₅	890	0	110	5	0,2	25	4,5	0	2	25	0,4	6	3	9	34	26
	NQ ₀	880	0	120	5	0,3	17	4,2	1	8	26	0,2	2	0	2	28	7
0,40 - 0,60	NQ ₀₅	880	0	120	6	0,3	20	4,2	0	6	24	0,5	2	1	3	27	11
	NQ ₂₅	890	0	110	4	0,2	20	4,3	0	4	22	0,3	3	1	4	26	15
	NQ ₀	880	10	110	5	0,3	17	4,2	1	8	28	0,1	2	0	2	30	7
0,60 - 0,80	NQ ₀₅	880	0	120	5	0,2	25	4,2	0	6	24	0,4	2	1	3	27	11
	NQ ₂₅	880	10	110	3	0,1	30	4,2	0	5	22	0,2	2	1	3	25	12

¹ Dados referentes a uma amostra composta, resultante de 15 pontos de amostragem;

² C_{orgânico} = MO+1,724.

principalmente entre 0,00-0,10 m, o que está em concordância com os resultados de Moraes (1991). Segundo este autor, o carbono e o nitrogênio são bastante sensíveis a modificações do solo por estarem concentrados na camada superficial. O preparo do solo nas áreas cultivadas, que no caso da cana pode chegar a 0,4 m, mistura a camada superficial, rica em matéria orgânica, com as camadas mais profundas, diluindo os teores de MO. Entre as áreas cultivadas, as diferenças nos teores de $C_{\text{orgânico}}$ e N_{total} foram pequenas.

A relação C/N foi sempre maior nas áreas cultivadas que em NQ_0 . Nas camadas entre 0,00-0,40m, isto foi devido a uma maior disponibilidade de N em NQ_0 , compensando até os maiores teores de C desta área. Nas camadas entre 0,40 e 0,80, onde os teores de N em NQ_0 e nas áreas cultivadas foram mais próximos, foi o aumento relativo dos teores de C nas áreas cultivadas, agora compatíveis àqueles de NQ_0 , que fizeram a relação C/N continuar maior nas áreas cultivadas. Entre NQ_{05} e NQ_{25} , não houve grande diferença para a relação C/N, sendo esta ligeiramente mais elevada em NQ_{25} , nas camadas 0,20-0,40 e 0,60-0,80 m. Este resultado, analisado em conjunto com a inexistência de diferenças entre NQ_{05} e NQ_{25} para os teores isolados de C e N, leva a concluir que as principais modificações nos teores de matéria orgânica do solo ocorreram devido ao desmatamento, e não ao aumento do tempo de cultivo da cana.

A acidez do solo mostrou-se alta sob condições naturais. Verifica-se que o pH do solo em NQ_0 permaneceu semelhante em todo o perfil do solo, sempre entre 4,1-4,2 até 0,80m de profundidade. Nas áreas cultivadas, o pH foi claramente maior que em NQ_0 até 0,40m de profundidade. De fato, o pH mostrou-se excessivamente elevado na camada de 0,00-0,10m nas áreas cultivadas, efeito provável do uso de 3 t ha^{-1} de calcário e 2 t ha^{-1} de

gesso agrícola em superfície no plantio da cana. Comparando-se as áreas cultivadas, nota-se que somente na camada de 0,10-0,20m houve diferença, sendo o pH mais elevado em NQ₂₅.

Em concordância com os dados de pH, os teores de alumínio trocável (Al^{3+}) aumentaram em profundidade e foram sempre mais elevados em NQ₀ que nas áreas cultivadas, principalmente na camada entre 0,00-0,40m. Entre NQ₀₅ e NQ₂₅, os teores de Al^{3+} foram sempre similares e baixos, não chegando a níveis tóxicos para a cana que é considerada uma cultura tolerante à acidez (Raij et al., 1996).

Tomando-se como referência os teores de fósforo em NQ₀, nota-se que o solo é naturalmente bastante pobre em fósforo para as exigências da cana-de-açúcar (Raij et al., 1996). Apesar de possuir teores de Al^{3+} sempre maiores que os das áreas cultivadas, os teores de fósforo (P) em NQ₀ foram também sempre maiores, o que pode ser associado aos maiores teores de matéria orgânica (Figura 13) e ao fato de não haver exportação do nutriente com cultivos e colheitas. Entre as áreas cultivadas, os teores de P foram bastante similares, decrescendo com o aumento da profundidade a exemplo do que ocorreu para NQ₀.

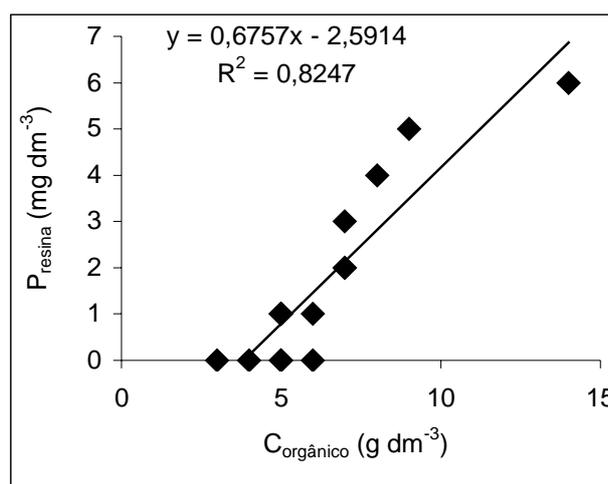


Figura 13. Teor de fósforo (P_{resina}) disponível em função do teor de carbono orgânico ($C_{orgânico}$) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

A CTC foi sempre maior em NQ₀ que nas áreas cultivadas, principalmente até 0,40 m de profundidade, resultado dos maiores teores de MO, sendo que a diminuição dos teores de MO com o aumento da profundidade foi acompanhada pela diminuição dos valores de CTC. A Figura 14 mostra que houve relação direta entre os valores de CTC e os teores de MO para as três áreas estudadas. Somente na camada de solo entre 0,20-0,40 m houve diferença significativa entre as áreas cultivadas, sendo maior o valor de CTC em NQ₂₅.

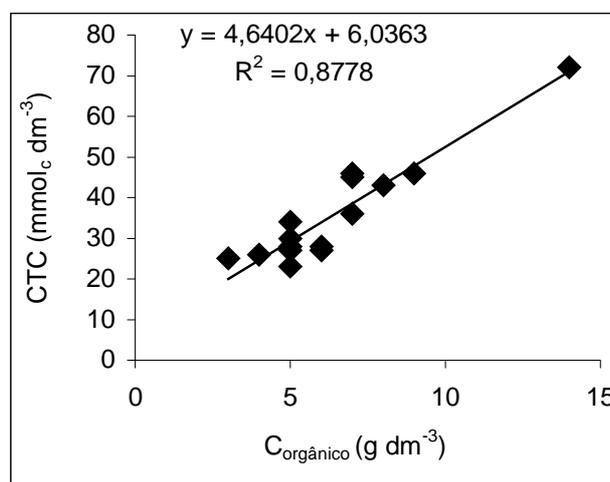


Figura 14. Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do teor de carbono orgânico (C_{orgânico}) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

Quanto às bases trocáveis, os teores de potássio (K) mostraram-se sempre baixos em todas as áreas, diminuindo em profundidade a partir da camada superficial em NQ₀, e concentrando-se nas camadas intermediárias (0,10-0,20 e 0,20-0,40m) no caso das áreas cultivadas. Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) até 0,20m de profundidade

mostraram-se maiores nas áreas cultivadas que em NQ₀, sendo que, na camada de 0,10-0,20m, ambos os teores foram maiores em NQ₂₅ que em NQ₀₅. Este resultado mostra, também, o efeito da calagem e da gessagem em superfície no plantio da cana, enriquecendo o solo com Ca e Mg nas camadas mais superficiais do solo nas áreas cultivadas.

Apesar de apresentar os maiores valores de CTC, a pequena quantidade de bases (SB) em NQ₀ faz com que a fertilidade do solo seja muito baixa. Nas áreas cultivadas, quantidades superiores de bases trocáveis, principalmente cálcio (Ca) e magnésio (Mg) até 0,20 m, e menores valores de CTC resultam em índices de saturação por bases (V%) sempre maiores, o que mostra que o cultivo melhorou a fertilidade do solo. Entre as áreas cultivadas, NQ₂₅ mostrou maiores valores de CTC até 0,40m de profundidade e maiores valores de SB na camada de 0,10-0,20m. Já os valores de V% foram semelhantes entre NQ₀₅ e NQ₂₅ em todo o perfil. Este resultado indica que não houve degradação da fertilidade com o aumento no tempo de monocultivo de cana, podendo haver, pelo contrário, maior disponibilidade de bases (Ca e Mg) na área cultivada há mais tempo.

O resultado da análise química do solo para micronutrientes nas áreas de NQ encontra-se no Quadro 2. Observa-se que os teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram predominantemente maiores em NQ₀ que nas áreas cultivadas, principalmente nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m, onde os teores de C_{orgânico} em NQ₀ foram, também, maiores. A Figura 15 exemplifica que houve relação direta entre os teores de B, Fe e Mn e os teores de C_{orgânico}, o que, por si só, já explicaria o fato dos teores dos micronutrientes avaliados serem maiores em NQ₀. Entretanto, outro fator também explica este resultado, quer seja o fato de, em NQ₀, não haver exportação de nutrientes com as colheitas, como no caso das áreas cultivadas.

Quadro 2. Teores de micronutrientes de um NQ sob mata (NQ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 5 (NQ₀₅) e 25 anos (NQ₂₅)¹.

Camada (m)	Área	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		mg dm ⁻³				
0,00 - 0,10	NQ ₀	0,34	0,9	87	19	0,7
	NQ ₀₅	0,13	0,3	10	6	0,2
	NQ ₂₅	0,15	0,1	17	3	0,1
0,10 - 0,20	NQ ₀	0,28	0,9	61	10	0,5
	NQ ₀₅	0,11	0,2	21	3	0,1
	NQ ₂₅	0,14	0,3	25	2	0,0
0,20 - 0,40	NQ ₀	0,26	0,9	47	7	0,3
	NQ ₀₅	0,10	0,2	31	5	0,1
	NQ ₂₅	0,12	0,1	30	1	0,0
0,40 - 0,60	NQ ₀	0,14	0,7	31	3	0,3
	NQ ₀₅	0,19	0,3	32	8	0,1
	NQ ₂₅	0,07	0,2	21	1	0,1
0,60 - 0,80	NQ ₀	0,14	0,8	31	2	0,3
	NQ ₀₅	0,10	0,2	16	6	0,1
	NQ ₂₅	0,08	0,2	19	2	0,1

¹Dados referentes a uma amostra composta, resultante de 15 pontos de amostragem;

Comparando-se as áreas cultivadas, houve equilíbrio entre NQ₀₅ e NQ₂₅ para todos os micronutrientes avaliados, com exceção à camada de 0,40-0,60m, em que os teores de B, Fe e Mn foram maiores em NQ₀₅, sendo que nesta camada o teor de MO foi também maior em NQ₀₅ (6 g dm⁻³) que em NQ₂₅ (4 g dm⁻³).

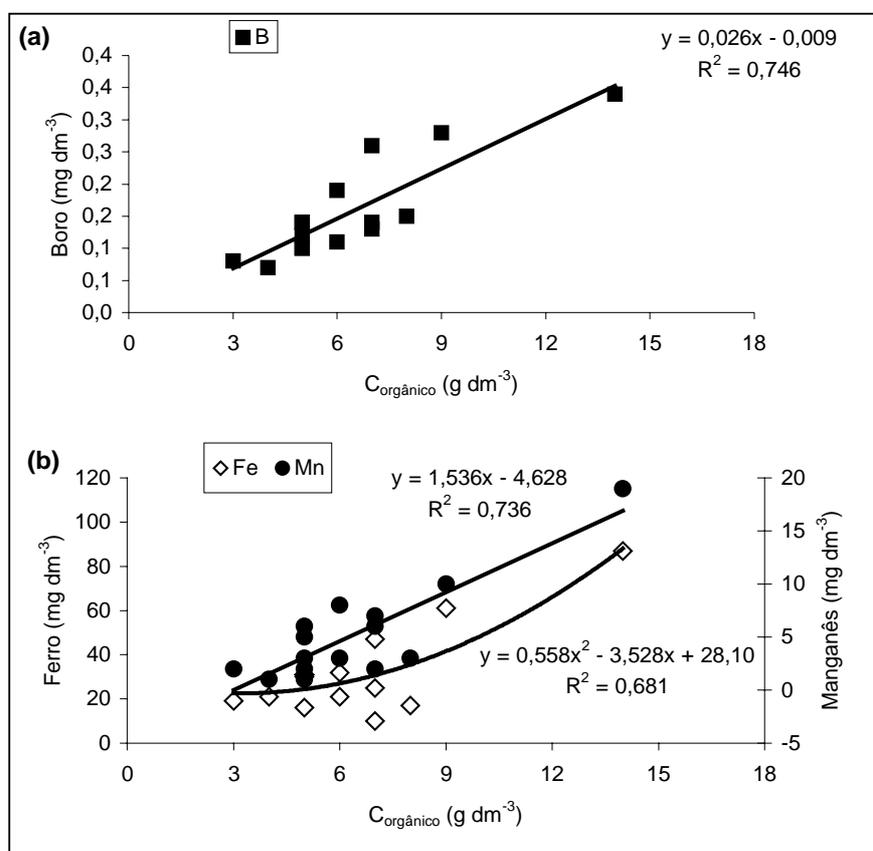


Figura 15. Boro (a), ferro e manganês (b) em função do teor de carbono orgânico ($C_{\text{orgânico}}$) em amostras de NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

6.1.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

A composição granulométrica e as principais propriedades químicas do NV nas áreas estudadas encontram-se no Quadro 3. A granulometria do solo foi similar nas diferentes áreas e camadas estudadas, mostrando ser válida a comparação entre as mesmas. Predominantemente, a textura foi muito argilosa (>60% argila), com exceção às áreas NV₀ e NV₁₂ nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, em que a textura foi argilosa (<60% argila).

Quadro 3. Composição granulométrica e propriedades químicas de um NV sob mata (NV₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV₁₂) e 50 anos (NV₅₀)¹.

Camada	Área	Areia	Silte	Argila	C _{orgânico} ⁽²⁾	N _{total}	C/N	pH	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
(m)		g Kg ⁻¹			g dm ⁻³			CaCl ₂	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³							%
0,00 - 0,10	NV ₀	270	190	540	22	2,5	9	6,3	12	0	24	4,6	96	23	124	148	84
	NV ₁₂	260	160	580	13	1,7	8	5,0	6	1	42	2,3	26	8	36	78	46
	NV ₅₀	200	150	650	24	2,3	10	5,3	38	0	45	9,6	68	23	101	146	69
0,10 - 0,20	NV ₀	240	170	590	20	2,1	9	5,6	16	0	34	4,2	63	20	87	121	72
	NV ₁₂	250	150	600	13	1,6	8	4,9	5	1	38	1,9	30	8	40	78	51
	NV ₅₀	150	190	660	25	2,2	11	5,3	28	1	47	2,9	78	25	106	153	69
0,20 - 0,40	NV ₀	200	110	690	12	1,4	9	5,1	5	1	42	2,5	33	13	48	90	53
	NV ₁₂	210	120	670	10	1,3	8	5,3	4	0	29	1,1	31	8	40	69	58
	NV ₅₀	150	160	690	19	2,1	9	5,4	22	0	40	1,6	72	22	96	136	71
0,40 - 0,60	NV ₀	170	100	730	9	1,0	9	4,8	5	1	38	1,4	32	11	44	81	54
	NV ₁₂	180	120	700	9	0,9	10	5,7	5	0	26	0,7	34	9	44	70	63
	NV ₅₀	110	200	690	15	1,5	10	5,9	10	0	28	1,0	69	20	90	118	76
0,60 - 0,80	NV ₀	160	140	700	7	0,8	9	4,9	9	1	38	0,8	27	10	38	76	50
	NV ₁₂	180	190	630	8	0,7	11	5,7	2	1	25	0,4	22	8	30	55	54
	NV ₅₀	100	150	750	11	1,1	10	6,1	8	0	25	0,7	56	16	73	98	74

¹ Dados referentes a uma amostra composta, resultante de 15 pontos de amostragem;

² C_{orgânico} = MO ÷ 1,724.

Comparando-se somente os resultados de NV_0 e NV_{12} , conclui-se que, na camada entre 0,00 e 0,20 m, os teores de $C_{\text{orgânico}}$ e N_{total} diminuíram da mata para o solo cultivado, o que estaria de acordo com os resultados de Cerri et al. (1991). Tais autores, estudando a evolução das propriedades de um LE após desmatamento e monocultivo com cana, por 12 e por 50 anos, observaram que, na camada de 0,00-0,20 m, os teores de C e N diminuíram da situação de mata para as situações com cana e, nas áreas cultivadas, os teores também diminuíram com o aumento no tempo de monocultivo. No presente estudo, entretanto, os teores de C e N são maiores na área há mais tempo sob monocultivo. De fato, os teores em NV_{50} são até mais elevados que os de NV_0 .

As explicações para esta discrepância de resultados podem ser várias, entre elas a maior fertilidade do solo, a menor temperatura média e a maior pluviosidade nas áreas do presente estudo (São Manoel-SP) em relação àquelas do LE (Piracicaba-SP), gerando condições mais favoráveis de acúmulo de MO no NITOSSOLO, além de possíveis diferenças entre os sistemas de produção empregados pelas usinas (manejo e conservação do solo e aporte de adubos e corretivos), que podem também gerar condições distintas de produção de biomassa e acúmulo de MO (síntese e degradação de material orgânico).

Entre 0,20-0,80 m de profundidade, os teores de C e N passaram a ser similares em NV_{12} e NV_0 , sempre superados por aqueles de NV_{50} , comprovando que, de fato, o cultivo prolongado de cana neste solo foi capaz de gerar acúmulo de MO. Esta outra parte dos resultados sobre MO está, agora, em concordância com o comportamento observado por Cerri et al. (1991) no estudo supracitado, em que os teores de C foram, também, maiores em profundidade nas áreas cultivadas com cana do que na área de mata. Quanto à relação C/N, diferentemente do NEOSSOLO, os valores foram sempre similares em todas as áreas.

A acidez do solo mostrou-se menor que no caso do NEOSSOLO. Sob condições naturais em NV₀, ela foi muito baixa para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, onde o pH foi mais elevado que nas áreas cultivadas, média na camada de 20-40 e alta somente a partir de dos 0,40 m, quando o pH nas áreas cultivadas foi maior. De fato, o pH nas áreas com cana foi crescente com o aumento da profundidade. Nas camadas de 0,00-0,10 e 0,010-0,20m, o pH foi maior em NV₅₀ que em NV₁₂.

Os teores de Al³⁺ foram sempre baixos ou nulos em todas as áreas, resultado do predomínio de valores relativamente elevados de pH. Os níveis de P, a exemplo dos teores de C, diminuíram de NV₀ para NV₁₂ nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m. A partir de 0,20m, os teores foram similares nas duas áreas, com exceção à camada de 0,60-0,80m, onde o teor foi maior em NV₀. Em NV₅₀, os teores de P foram sempre os mais elevados, somente igualando-se a NV₀ na camada de 0,60-0,80m. A figura 16 mostra que houve relação direta entre o teor de MO e o teor de P.

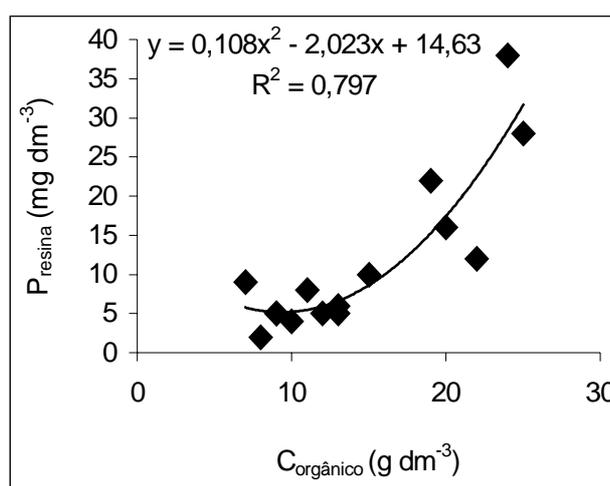


Figura 16. Teor de fósforo (P_{resina}) disponível em função do teor de carbono orgânico (C_{orgânico}) em amostras de NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

A exemplo do ocorrido para o NEOSSOLO, houve relação direta entre CTC e MO nas áreas de NITOSSOLO (Figura 17). Com exceção à camada de 0,00-0,10 m, onde a CTC foi similar em NV₀ e NV₅₀, os valores de CTC e C em NV₅₀ foram sempre os maiores. Em NV₁₂, os valores de CTC foram sempre inferiores aos de NV₀ e NV₅₀.

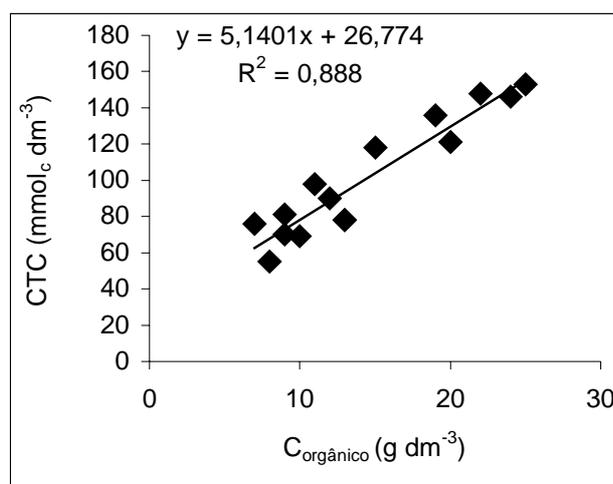


Figura 17. Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do teor de carbono orgânico (C_{orgânico}) em amostras de NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

A saturação do solo por bases (V%) mostrou-se naturalmente elevada no NV, estando sempre acima de 50% ao longo do perfil em NV₀ (caráter eutrófico). Os valores de V nas áreas cultivadas foram menores que os de NV₀ entre 0,00-0,20 m e maiores entre 0,20-0,80 m, sendo que, entre NV₁₂ e NV₅₀, os valores foram maiores em NV₅₀. Os maiores valores de CTC em conjunto com maiores valores de saturação por bases em NV₅₀, significam uma quantidade muito maior de nutrientes disponíveis para as plantas do que a que ocorre em NV₁₂.

Os teores de Ca e Mg diminuíram de NV_0 para NV_{12} e aumentaram de NV_{12} para NV_{50} , sendo que em NV_{50} os teores foram ainda maiores que em NV_0 , com exceção à camada de 0,00-0,10m, em que NV_0 apresentou maior teor de Ca e teor similar de Mg. Já os teores de K foram semelhantes foram, predominantemente, maiores em NV_0 , com exceção à camada de 0,00-0,10m, em que o teor de K foi maior em NV_{50} . Esta discrepância de comportamento para Ca e Mg em relação a K, provavelmente, tem haver com a utilização de calagem nas áreas cultivadas, enriquecendo-as com Ca e Mg de forma mais intensa do que com K. Entre NV_{12} e NV_{50} , os teores de K foram sempre maiores em NV_{50} , principalmente entre 0,00-0,40m.

Os resultados de análise química do solo para micronutrientes encontram-se no Quadro 4. O teor de B foi superior em NV_0 somente na camada de 0,00-0,10 m. Entre 0,10-0,80 m os teores foram sempre maiores em NV_{50} , principalmente abaixo de 0,40m. Em NV_{12} , os teores de B foram os mais baixos nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, e intermediários entre NV_0 e NV_{50} a partir de 0,20m. Considerando-se todas as camadas, os teores de Cu diminuíram de NV_0 para NV_{12} e se recuperaram em NV_{50} . Quanto ao Fe, com exceção à camada de 0,60-0,80m, os teores foram maiores em NV_{50} que em NV_{12} , principalmente nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40m. Em NV_0 os teores de Fe foram similares aos de NV_{12} na maioria das camadas. Os teores de Zn também diminuíram de NV_0 para NV_{12} e se recuperaram em NV_{50} , sendo que nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 os teores em NV_{50} foram claramente superiores aos de NV_0 .

Quadro 4. Teores de micronutrientes de um NV sob mata (NV₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV₁₂) e 50 anos (NV₅₀)¹.

Camada (m)	Área	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		mg dm ⁻³				
0,00 - 0,10	NV ₀	0,40	17,2	15	108	6,5
	NV ₁₂	0,21	10,2	25	23	1,5
	NV ₅₀	0,24	16,9	29	27	4,9
0,10 - 0,20	NV ₀	0,24	17,8	24	24	5,2
	NV ₁₂	0,21	9,9	24	109	1,8
	NV ₅₀	0,26	17,8	32	29	4,9
0,20 - 0,40	NV ₀	0,17	13,9	18	84	1,8
	NV ₁₂	0,21	8,1	16	61	1,0
	NV ₅₀	0,22	16,5	27	24	4,8
0,40 - 0,60	NV ₀	0,12	9,5	10	35	0,8
	NV ₁₂	0,16	4,4	7	19	0,6
	NV ₅₀	0,21	8,4	11	39	2,3
0,60 - 0,80	NV ₀	0,08	5,9	7	16	0,6
	NV ₁₂	0,13	3,2	6	11	0,2
	NV ₅₀	0,19	4,0	5	15	0,7

¹ Dados referentes a uma amostra composta, resultante de 15 pontos de amostragem;

Os teores de Mn apresentaram-se bastante variáveis, não sendo possível estabelecer um padrão lógico de comportamento. Apenas é possível notar que em NV₅₀ as variações ao longo do perfil foram menores que em NV₀ e NV₁₂.

Os teores dos micronutrientes também se relacionaram positivamente com os teores de C_{orgânico}, à exceção do Mn, cujo comportamento não se ajustou bem nem às variações de C_{orgânico} nem de pH. Entretanto, diferentemente do NEOSSOLO, houve diferença de comportamento entre as áreas de NITOSSOLO. Em NV₀ os dados foram menos dispersos (figura 18) que nas áreas cultivadas, o que pode ser devido ao fato da matéria orgânica possuir uma composição, em termos de nutrientes, distinta daquela ocorrendo nas áreas cultivadas.

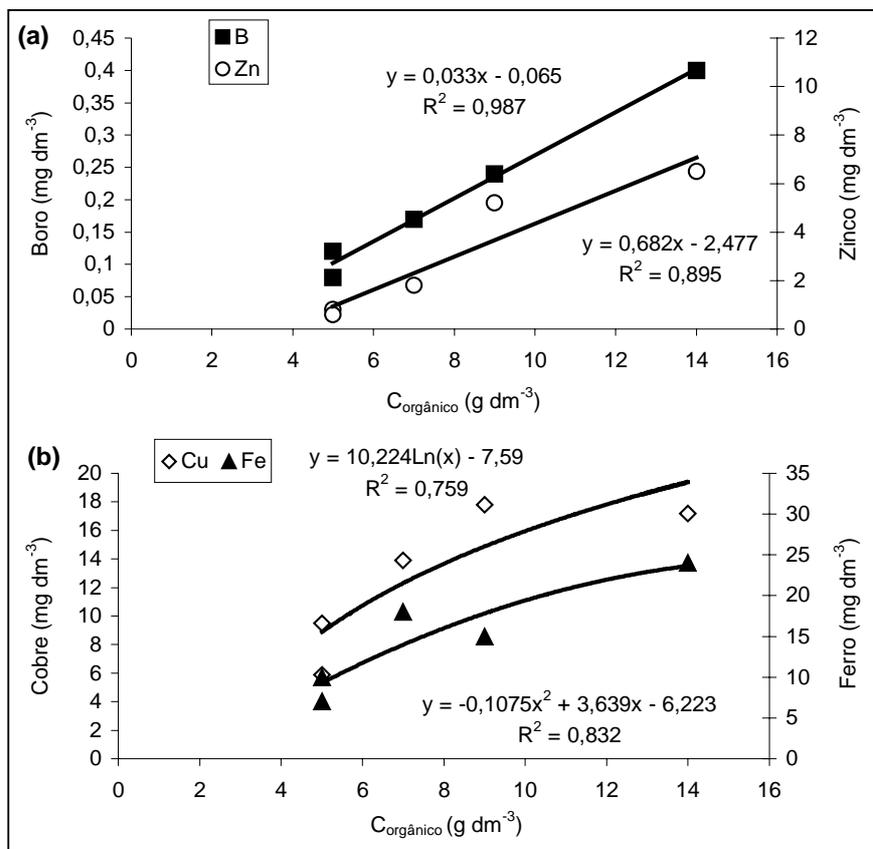


Figura 18. Boro, zinco (a), cobre e ferro (b) em função do teor de carbono orgânico (C_{orgânico}) em amostras de NV sob mata.

6.2 - Perfil Cultural do Solo

6.2.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

O perfil cultural de referência para as áreas de NQ, realizado sob vegetação de mata (NQ₀), revelou a ocorrência de cinco volumes estruturais diferenciados. Logo abaixo da camada de liteira, de 0,00 a 0,06 m de profundidade, observou-se a estrutura L (livre), composta de pequenos agregados, rugosos e arredondados, de até 0,02 m de diâmetro e terra fina solta, muitas cavidades biológicas, coloração enegrecida e abundante presença de

raízes. Entre 0,06-0,13 m a estrutura foi identificada como $F\Delta\mu$, volume fissural com agregados de tamanho médio, arredondados e faces de ruptura rugosas, onde a porosidade fissural predominava. Entre 0,13-0,38 m de profundidade observou-se estrutura $C\Delta$ (contínua com porosidade visível fraca), de coloração mais avermelhada, presença de atividade biológica (formigas) e muitas raízes. De 0,38 a 0,64 m a estrutura foi identificada como $C\Delta\mu$, com maior porosidade visível que a anterior, com menor atividade biológica e poucas raízes. A partir de 0,64 m a estrutura é $C\mu$, caracterizada pelo empilhamento de grãos de areia, sem nenhuma coesão, de coloração clara, raízes raras.

As parcelas NQ_{05} e NQ_{25} , apresentavam a superfície do solo praticamente descoberta, à exceção de algumas folhas decumbentes da cana e plantas invasoras. Próximo à superfície aparece a estrutura L , entre 0,00-0,06 m, com muita terra fina solta e agregados pequenos (0,02-0,03 m). Em NQ_{25} , este volume sofreu selamento (0,01 m), sendo mais visível nas entrelinhas da cultura. Entre 0,06-0,12 m a estrutura encontrada foi $F\Delta\mu$, formando um volume com fissuras e agregados facilmente identificáveis, com presença abundante de raízes e de atividade biológica (formigas). Entre 0,12-0,35 m a estrutura passou a ser $C\Delta$, mais rígida e com torrões (não individualizados) maiores que os da camada anterior, alguns com aparência achatada. Juntos estes três volumes formaram uma camada de solo com mais raízes que as camadas mais profundas e com coloração mais escura, ainda que mais clara que na parcela de mata, resultado da incorporação de material orgânico. Entre 0,35-0,65 m ocorreu a estrutura $C\Delta\mu$, menos rígida que a anterior e sem individualização possível dos torrões, com presença de mosqueado avermelhado. A partir de 0,65 m a estrutura passa a $C\mu$, com empilhamento de grânulos soltos de areia, sem coesão, raízes raras.

A grande diferença entre os perfis foi verificada entre a parcela de mata e as parcelas cultivadas com cana, nas quais, além do aparecimento de selamento superficial, observou-se, nitidamente, uma camada de coloração escurecida pela matéria orgânica, com transição clara e plana para as camadas mais profundas, resultado da incorporação homogênea de material orgânico vegetal.

6.2.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

O perfil cultural de referência para as áreas de NV, realizado sob vegetação de mata (NV₀), revelou a ocorrência de quatro volumes estruturais diferenciados. Logo abaixo da camada de liteira, observou-se estrutura tipo FA (porosidade fissural entre torrões com estado interno compactados) entre 0,00-0,08 m de profundidade, com torrões pequenos e médios, arredondados, compactos, presença de canais biológicos (neste caso, de macrofauna de invertebrados), porosidade entre os agregados maior do que intra-agregado, forte porosidade fissural e grande quantidade de raízes. De 0,08-0,28 m, estrutura FA com duas populações de agregados, uma de agregados grandes e mais angulosos e outra de agregados médios e pequenos, mais arredondados, aparentemente retrabalhados pela macrofauna (formiga e cupim), presença de grande quantidade de raízes. De 0,28-0,52 m, estrutura FA, com predominância de torrões grandes, angulosos, porosidade fraca intra-agregados, menor quantidade de raízes, porosidade essencialmente fissural entre agregados. A partir de 0,52 m, estrutura CΔμ com torrões grandes e médios, subangulares e maior porosidade intra-agregados.

Na parcela NV₁₂ observa-se estrutura L (torrões soltos, com média porosidade visível) entre 0,00-0,02 m, com um pouco de terra fina, muitos agregados milimétricos e alguns agregados maiores. Entre 0,02-0,24 m, na área do sulco de plantio, encontrou-se estrutura FΔ e FΔμ (porosidade fissural entre torrões com estado interno compacto a medianamente compacto), com agregados pequenos e médios, forte porosidade entre agregados, muitas raízes; fora da área do sulco, entre 0,02-0,45 m, a estrutura é do tipo FΔ, com grandes blocos angulares colonizados por raízes, porosidade visível fraca, raízes em quantidade muito menor que no sulco, presença de atividade biológica (minhoca). Entre 0,45-0,60 m estrutura CΔμ, com blocos angulares a subangulares, porosidade visível mediana e poucas raízes. Abaixo de 0,60 m estrutura CΔμ/μ, com torrões menores e menos individualizados, arredondados, porosidade forte de empilhamento de agregados, presença de cavidades de macrofauna.

Em NV₅₀ a estrutura L aparece de 0,00-0,03 m, com mais terra fina que em NV₁₂, entre os agregados milimétricos. Na área do sulco, entre 0,03-0,30 m, estrutura FΔ e FΔμ, com torrões grandes e compactos e terra fina (agregados milimétricos), fissuras, boa quantidade de raízes (neste caso a delimitação do sulco é menos visível; nas entrelinhas, entre 0,03-0,35 m, estrutura FΔ com blocos grandes, angulares, porosidade visível fraca, muitas fissuras colonizadas por raízes, algumas delas apresentando achatamento. Entre 0,35-0,70 m, estrutura FΔ com torrões médios e pequenos, porosidade visível fraca. A partir de 0,70 m estrutura CΔμ/μ, com torrões menos individualizados, subangulares, porosidade de empilhamento de agregados.

Houve diferença entre a parcela de mata NV₀ e as parcelas cultivadas e, também, entre as parcelas cultivadas. Em NV₀ praticamente não se observou estrutura L,

com presença de muito pouca terra fina solta na superfície e, foi possível a identificação clara de agregados retrabalhados pela macrofauna até 0,50 m. Entre as parcelas cultivadas, foi mais difícil a diferenciação do sulco de plantio em NV₅₀ e, nesta parcela, as condições de crescimento para as raízes pareceram melhores que em NV₁₂.

6.3 - Agregação do Solo

6.3.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

Os dados relativos ao estudo de agregação para NQ encontram-se no Quadro 5. Cada índice de agregação tem um significado, sendo que o diâmetro médio ponderado será maior quanto maior for a percentagem de agregados grandes retidos nas peneiras, enquanto que o diâmetro médio geométrico é uma estimativa do tamanho real da classe de agregado de maior ocorrência.

Nota-se que nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, ambos os índices foram significativamente maiores sob condições naturais em NQ₀ do que nas áreas cultivadas, ocorrendo nestas camadas teores de C_{orgânico}, também, significativamente superiores em NQ₀. Nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, não houve diferença significativa entre as áreas nem para DMP e nem para DMG, exceto na camada de 0,10-0,20 m, em que o DMG e o teor de C foram significativamente maiores em NQ₀ quando comparados aos valores observados em NQ₀₅. Entre as áreas cultivadas, não houve diferença significativa para nenhum dos índices e nem para C_{orgânico}, em nenhuma das camadas de solo.

Quadro 5. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e teor de carbono orgânico ($C_{\text{orgânico}}$) em amostras de agregados de NQ sob mata (NQ₀) e cultivado com cana-de-açúcar por 05 (NQ₀₅) e 25 anos (NQ₂₅)¹.

Área	DMP	DMG	$C_{\text{orgânico}}$
	<i>mm</i>		<i>g dm⁻³</i>
	<i>0,00 – 0,05 m</i>		
NQ ₀	1,55 a ⁽²⁾	0,93 a	10 a
NQ ₀₅	0,51 b	0,28 b	3 b
NQ ₂₅	0,50 b	0,29 b	4 b
<i>d.m.s.</i>	0,39	0,30	2
<i>c.v.</i>	37	49	24
	<i>0,05 – 0,10 m</i>		
NQ ₀	1,42 a	0,79 a	7 a
NQ ₀₅	0,50 b	0,28 b	3 b
NQ ₂₅	0,64 b	0,37 b	4 b
<i>d.m.s.</i>	0,33	0,23	1
<i>c.v.</i>	32	38	24
	<i>0,10 – 0,20 m</i>		
NQ ₀	1,07 a	0,56 a	5 a
NQ ₀₅	0,77 a	0,38 b	3 b
NQ ₂₅	0,80 a	0,45 ab	3 ab
<i>d.m.s.</i>	0,34	0,16	2
<i>c.v.</i>	31	29	45
	<i>0,20 – 0,40 m</i>		
NQ ₀	0,87 a	0,45 a	3 a
NQ ₀₅	0,77 a	0,38 a	2 b
NQ ₂₅	0,73 a	0,42 a	2 b
<i>d.m.s.</i>	0,27	0,12	1
<i>c.v.</i>	28	24	28

⁽¹⁾ Valores representam a média de 6 amostras;

⁽²⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (Tukey, 5%) entre as áreas.

A relação direta entre matéria orgânica e agregação se confirma na Figura 19, a qual mostra que, independentemente do uso do solo ou da profundidade, é possível estabelecer uma relação funcional entre DMP x $C_{\text{orgânico}}$ e entre DMG x $C_{\text{orgânico}}$.

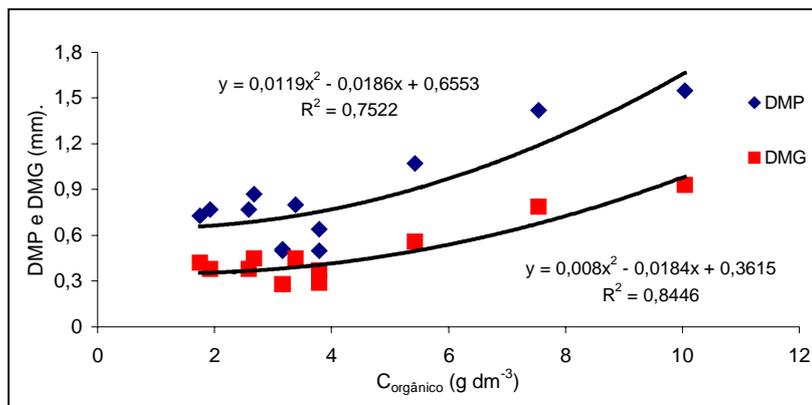


Figura 19. Valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função dos teores de carbono orgânico ($C_{\text{orgânico}}$) em amostras de agregados de um NQ sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar. Os pontos plotados se referem a todos os dados (áreas e camadas de solo).

A ausência de diferenças significativas entre as duas áreas cultivadas deve-se, em parte, ao fato dos teores de C serem bastante similares em ambas. No entanto, há que se discutir ao menos dois outros fatores importantes, que poderiam modificar os resultados: a massa avaliada de agregados; e a variabilidade dos dados. Quanto à massa de agregados utilizada nas avaliações, 50 g, não foi possível obter quantidade suficiente de agregados para que as subamostras avaliadas tivessem a massa preconizada pela metodologia descrita em Embrapa (1997), 100 g, o que seria mais adequado. A estrutura muito frágil do NEOSSOLO fez com que a massa das amostras coletadas no campo (± 2 kg) se reduzisse demasiadamente após o preparo inicial das amostras (peneiramento nas malhas de 0,008 e 0,004 m). Este fator influenciou, em parte, na variabilidade dos dados, impedindo a maior

diferenciação entre as áreas. Segundo Castro Filho et al. (1998), os coeficientes de variação das médias devem ser próximos a 10% no máximo.

Contudo, ficou claro que as diferenças entre as áreas se concentraram na camada de solo de 0,00-0,20m, sendo DMP e DMG maiores em NQ₀ que nas áreas cultivadas, o que já foi observado por outros autores (Watts et al., 1996 a,b; Caron et al., 1996; Cerri et al. 1991). Também, o aumento no tempo de monocultivo não provocou degradação da agregação do solo, notando-se, inclusive, valores maiores de DMP e DMG em NQ₂₅ que em NQ₀.

6.3.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

Os dados relativos ao estudo de agregação para NV encontram-se no Quadro 6. A exemplo do ocorrido para o NQ, nota-se que tanto o DMP quanto o DMG, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, foram significativamente maiores sob condições naturais em NV₀ em comparação com as áreas cultivadas, o mesmo ocorrendo quanto ao índice de estabilidade dos agregados em água (IEA), uma medida de agregação total do solo e que não considera a distribuição por classes de diâmetro. Nestas camadas os teores de C_{orgânico} também foram superiores em NV₀, sendo significativa a diferença de NQ₀ para as duas áreas cultivadas na camada de 0,00-0,05 m. Na camada de 0,05-0,10 m, o teor de C_{orgânico} em NV₁₂ foi significativamente menor que em NV₀ e NV₅₀, como também o foi o IEA. A Figura 20 ilustra as relações funcionais entre DMP x C_{orgânico}, DMG x C_{orgânico} e IEA x C_{orgânico} para estas duas camadas de solo. Apesar de haver uma relação direta entre a matéria orgânica e os índices de

agregação, como no caso do NQ, para o NV há uma dispersão maior dos dados, indicando que outros fatores interagiram de forma mais intensa que no caso do NQ.

Quadro 6. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e teor de carbono orgânico ($C_{\text{orgânico}}$) em amostras de NV sob mata (NV_0) e cultivado com cana-de-açúcar por 12 (NV_{12}) e 50 anos (NV_{50})¹.

Áreas	DMP	DMG	IEA	$C_{\text{orgânico}}$
	<i>mm</i>			<i>g dm⁻³</i>
	<i>0,00 – 0,05 m</i>			
NV_0	8,99 a ⁽²⁾	6,17 a	96,8 a	24 a
NV_{12}	5,34 b	2,44 b	90,4 b	7 c
NV_{50}	5,71 b	2,62 b	90,6 b	13 b
<i>d.m.s.</i>	1,72	1,17	3,8	2
<i>c.v.</i>	19	23	3	12
	<i>0,05 – 0,10 m</i>			
NV_0	10,69 a	8,42 a	98,0 a	15 a
NV_{12}	6,21 b	2,86 b	91,6 c	8 b
NV_{50}	6,89 b	3,53 b	93,5 b	12 a
<i>d.m.s.</i>	0,97	0,78	1,3	4
<i>c.v.</i>	9	11	1	23
	<i>0,10 – 0,20 m</i>			
NV_0	8,63 a	5,97 a	97,8 a	7 b
NV_{12}	7,01 a	3,63 b	92,0 b	8 b
NV_{50}	7,23 a	4,25 ab	95,0 a	11 a
<i>d.m.s.</i>	2,22	1,84	2,8	2
<i>c.v.</i>	21	29	2	20
	<i>0,20 – 0,40 m</i>			
NV_0	5,86 a	3,35 a	95,5 a	5 b
NV_{12}	6,80 a	3,64 a	93,5 a	6 ab
NV_{50}	6,88 a	3,95 a	96,0 a	8 a
<i>d.m.s.</i>	1,85	1,50	2,6	4
<i>c.v.</i>	21	30	2	29

⁽¹⁾ Valores representam a média de 6 amostras;

⁽²⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (Tukey, 5%) entre as áreas.

Ainda de forma muito semelhante ao ocorrido para o NQ, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, não houve diferença significativa entre nenhuma das áreas para DMP e DMG, exceto na camada de 0,10-0,20, em que o DMG foi significativamente menor em NV₁₂ em comparação a NV₀.

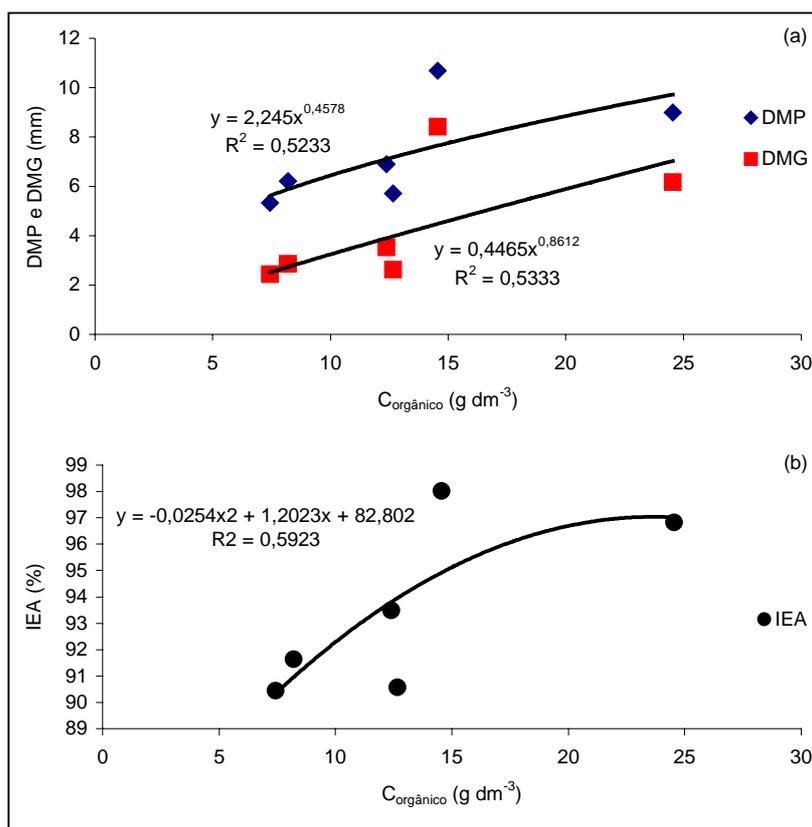


Figura 20. Valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) (a), e de índice de estabilidade de agregados em água (IEA) (b) em função dos teores de carbono orgânico ($C_{\text{orgânico}}$) em amostras de agregados (camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

O IEA apresentou comportamento semelhante ao do DMG, sendo significativamente menor em NV₁₂ em comparação a NV₀ na camada de 0,10-0,20 m, e

estatisticamente semelhante entre NV_0 e NV_{50} . Entre as áreas cultivadas, o IEA e o teor de $C_{orgânico}$ na camada de 0,10-0,20 m foram significativamente superiores em NV_{50} . O teor de $C_{orgânico}$, no entanto, não apresentou relação direta com os índices de agregação nestas camadas, indicando que outros fatores além da matéria orgânica interagiram determinando o estado de agregação do solo. A Figura 21 mostra outros fatores que se relacionaram com a agregação do solo.

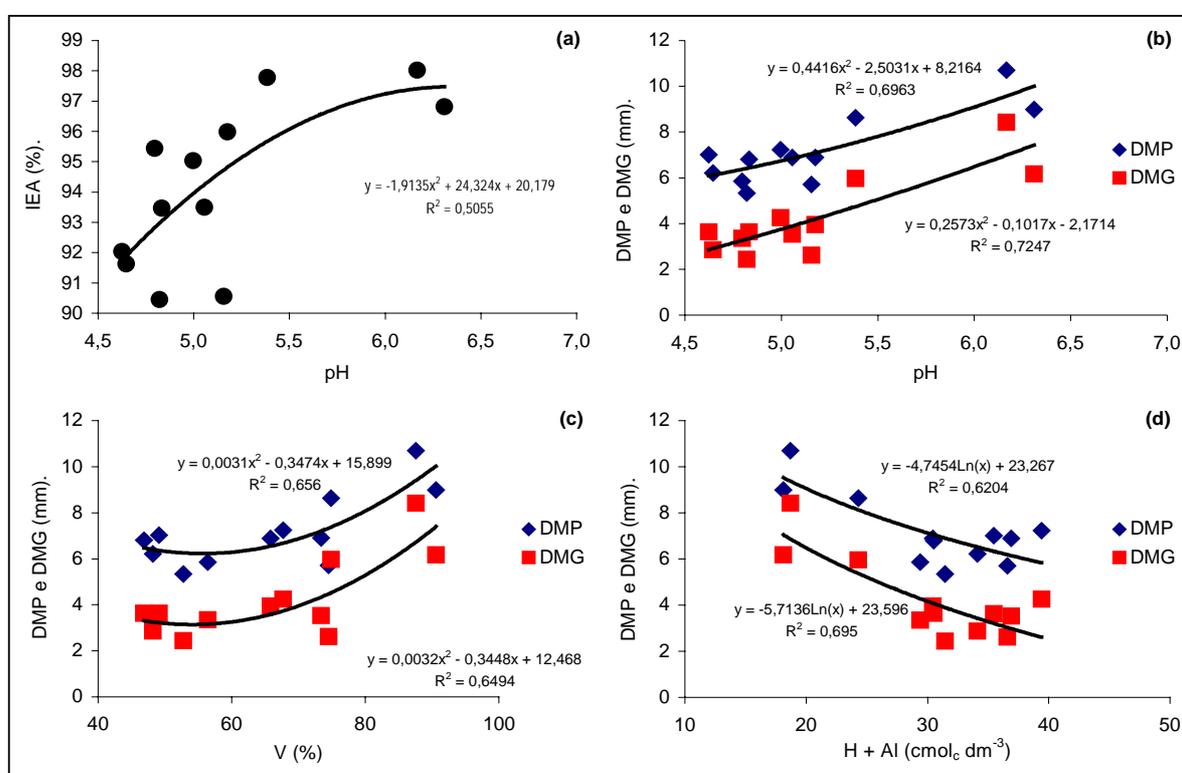


Figura 21. Valores de índice de estabilidade de agregados em água (IEA) em função do pH (a); e valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função do pH (b), da saturação por bases (c) e da acidez potencial (d) em amostras de agregados (camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

Tanto o IEA quanto o DMP e o DMG mostraram sofrer influência do pH do solo (Figura 21 a e b), o que parece ser estar ligado ao fato do aumento de pH ocorrer simultaneamente ao aumento da saturação de bases (Figura 21 c) e diminuição da acidez potencial (Figura 21 d), o que, certamente, resulta da aplicação de calcário.

Um outro fator, de cuja influência sobre a agregação do solo não há informações correntes, mas que mostrou-se relacionado com DMP e DMG foi o teor de Silte (Figura 22). Quanto maior o teor de silte determinado nas amostras de agregados maior foram o DMP e o DMG. Especulações sobre o porque desta relação, passando pela participação desta fração granulométrica no complexo de cargas do solo, ou pela participação de sua fração específica de matéria orgânica na formação de agregados seriam criticáveis uma vez que não se estudaram estas questões no presente trabalho; no entanto, cabe suscitar a questão de que a metodologia de análise granulométrica pode ter sido limitada na dispersão das partículas, para este tipo de solo, superestimando silte e subestimando argila, uma vez que se espera um maior grau de relação da agregação com a fração argila do que com a fração silte, o que não se observou no presente caso.

Quanto aos teores de argila e areia, incluindo as diferentes frações da areia, não foram observadas relações ou interferências significativas destas frações nos índices de agregação, havendo homogeneidade textural entre as diferentes áreas.

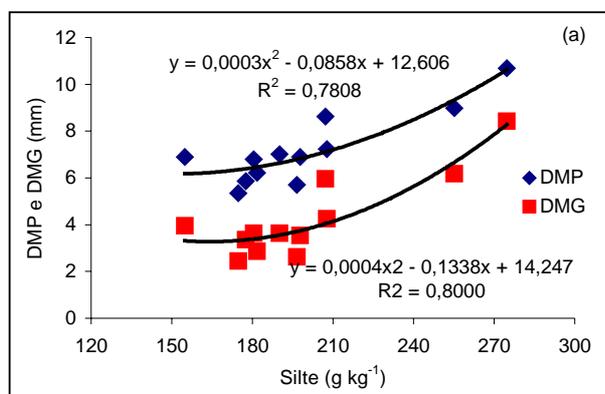


Figura 22. Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função do teor de silte em amostras de agregados (camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40m) de um NV sob mata e sob cultivo de cana-de-açúcar.

Mesmo sendo menores que no caso do NQ, os coeficientes de variação das médias ficaram entre 8 e 29% para DMP e DMG, fazendo com que algumas diferenças entre as áreas cultivadas não fossem detectadas de forma significativa, apesar de serem importantes do ponto de vista prático. Para o IEA, que não leva em consideração a distribuição dos agregados em várias classes de diâmetro, e por isso não está sujeito à variabilidade de tamanho dos agregados na composição das amostras/subamostras usadas nas determinações, os coeficientes de variação foram menores, entre 1 e 3%, o que favoreceu a diferenciação estatística entre as áreas cultivadas, que apresentam resultados mais próximos.

Igualmente ao ocorrido nas áreas de NQ, ficou claro que as diferenças entre as áreas de NV se concentraram na camada de solo de 0,00-0,20m, sendo DMP e DMG maiores em NV₀ que nas áreas cultivadas. No entanto, neste caso, o IEA provou que com o aumento no tempo de monocultivo pode haver melhora significativa da agregação do solo.

6.4 - Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

6.4.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

Os resultados indicaram que não houve efeito significativo de área de estudo e nem de densidade do solo (D_s) no ajuste da curva de retenção de água. Deste modo, a variação na retenção de água deve-se somente ao efeito do potencial matricial (ψ). Este tipo de resultado também foi observado por Imhoff et al. (2001) e por Silva et al. (1994), em solos com texturas semelhantes. O fato da D_s ser similar nas duas áreas (Figura 23) explica estes resultados, uma vez que D_s exprime, de forma indireta, a porosidade do solo, a qual é determinante na retenção de água, tanto em termos de volume total de poros como na distribuição destes em classes de diâmetros.

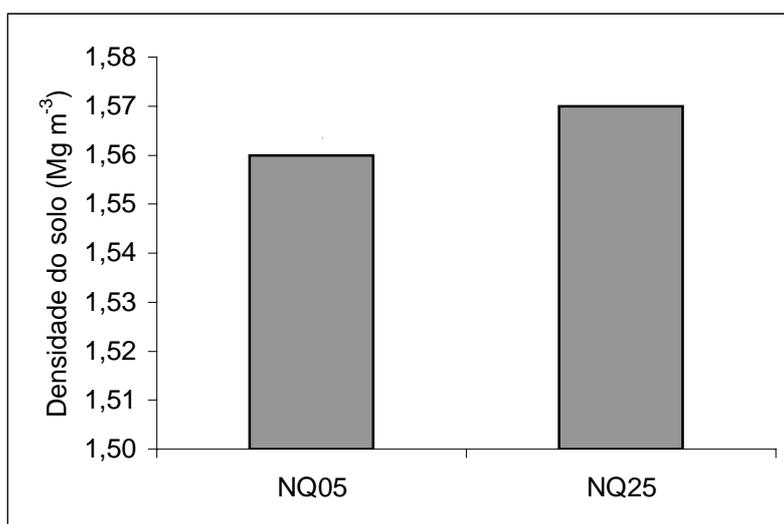


Figura 23. Valores médios (32 amostras) de densidade do solo em NQ₀₅ e NQ₂₅.

O modelo ajustado ($F=215,8$; $\text{Pr}>F=0,0001$; $R^2=0,78$) para estimar a curva de retenção de água do solo (Equação 5) incorporou, portanto, apenas o potencial matricial, sendo válido para NQ_{05} e NQ_{25} .

$$\theta = 0,60417 \psi^{-0,2871} \quad (\text{Eq. 5})$$

Substituindo-se os valores de potenciais relativos à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) na equação 5, respectivamente 60 e 15.000 cm, tem-se que o teor de água disponível deste solo ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) foi de 14,83%.

O resultado do ajuste das curvas de resistência do solo (RP) indicou efeito estatisticamente significativo ($p<0,05$) da área de estudo apenas no intercepto do modelo. Os modelos ajustados ($F=137,83$; $\text{Pr}>F=0,0001$; $R^2=0,87$) para estimar a resistência à penetração em NQ_{05} (equação 6) e NQ_{25} (equação 7) foram:

$$NQ_{05} \rightarrow \quad RP = 0,002211 D_s^{9,4295} \theta^{0,885} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$NQ_{25} \rightarrow \quad RP = 0,001613 D_s^{9,4295} \theta^{0,885} \quad (\text{Eq. 7})$$

Os coeficientes das Equações 6 e 7 mostram que a RP é negativamente relacionada com a umidade do solo ($p<0,0001$) e positivamente relacionada com a D_s ($p<0,0001$). Tal comportamento de RP é comumente mencionado em outros trabalhos (Silva et

al., 1994; Busscher et al., 1997; Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2001) para tipos de solo e manejo distintos. Nota-se, que com valores iguais de densidade e umidade do solo, os valores de resistência à penetração são maiores em NQ₀₅, uma vez que o intercepto da Equação 6 é maior, representando maiores dificuldades para o crescimento radicular nesta área.

Os limites ou níveis críticos do IHO - θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{PA} e θ_{RP} - encontram-se na Figura 24, tanto para NQ₀₅ (a) como para NQ₂₅ (b), sendo θ_{RP} calculado para as duas áreas pela inversão das Equações 6 e 7, respectivamente $\theta=(RP/(0,002211 D_s^{9,4295})^{1/-0,885})$ e $\theta=(RP/(0,001613 D_s^{9,4295})^{1/-0,885})$. Como houve diminuição da θ_{PA} com o aumento da D_s nas duas áreas, sem que houvesse alteração da retenção de água, pode-se concluir que o aumento de D_s afetou somente as classes de poros maiores, responsáveis pela aeração e não pela retenção de água. Apesar disso, dentro da amplitude de D_s observada, a diminuição de θ_{PA} nunca chegou a níveis limitantes, sendo sempre a θ_{CC} o limite superior do IHO, o que está em concordância com os resultados de Imhoff et al. (2001). Isso indica que, na camada estudada, este solo apresenta uma distribuição de porosidade que favorece muito a aeração, fator positivo do ponto de vista de crescimento radicular, e que as classes de poros responsáveis pela retenção de água, praticamente, não sofrem alterações pelo adensamento do solo.

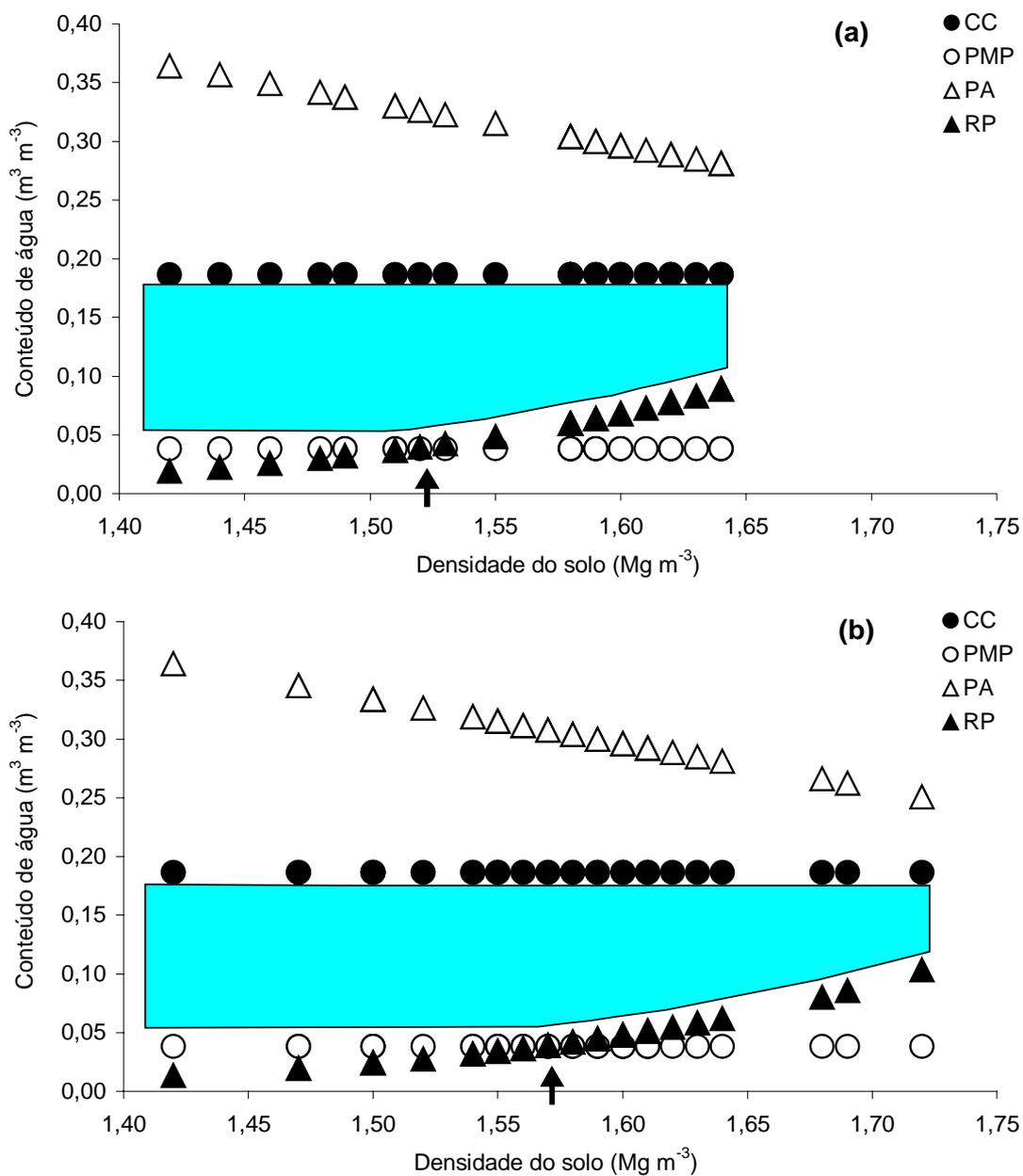


Figura 24. Variação do teor de água em função da densidade do solo nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (URP) nas áreas NQ₀₅ (a) e NQ₂₅ (b). A área em azul representa o intervalo hídrico ótimo.

Concomitante à diminuição de θ_{PA} , o aumento da D_s provocou aumento do teor de água do solo para que RP se encontrasse no limite de 2 MPa, fazendo com que θ_{RP} fosse limitante nos maiores níveis de D_s . De fato, RP tem sido reportada como o limite crítico que mais frequentemente reduz o IHO sob condições de secagem do solo (Silva et al., 1994; Betz et al., 1998; Tormena, 1998). Em NQ₀₅, θ_{RP} passou a ser o limite inferior do IHO a partir de valores de D_s maiores que $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que em NQ₂₅, isto só ocorreu a partir de valores de D_s maiores que $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$. Pois, se os valores médios de D_s em NQ₀₅ e em NQ₂₅ são, respectivamente, de $1,56$ e $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$, isto significa que as limitações ao crescimento radicular em NQ₀₅ são realmente maiores que em NQ₂₅, já que em NQ₀₅ os valores de D_s estão, em média, acima do limite crítico para RP.

A Figura 25 ilustra o efeito do aumento de D_s e, conseqüentemente, de θ_{RP} na diminuição do IHO. Em NQ₀₅, a redução do IHO se inicia em valores de D_s menores que em NQ₂₅, significando que o adensamento do solo em NQ₀₅ é mais prejudicial ao crescimento radicular e às plantas que em NQ₂₅.

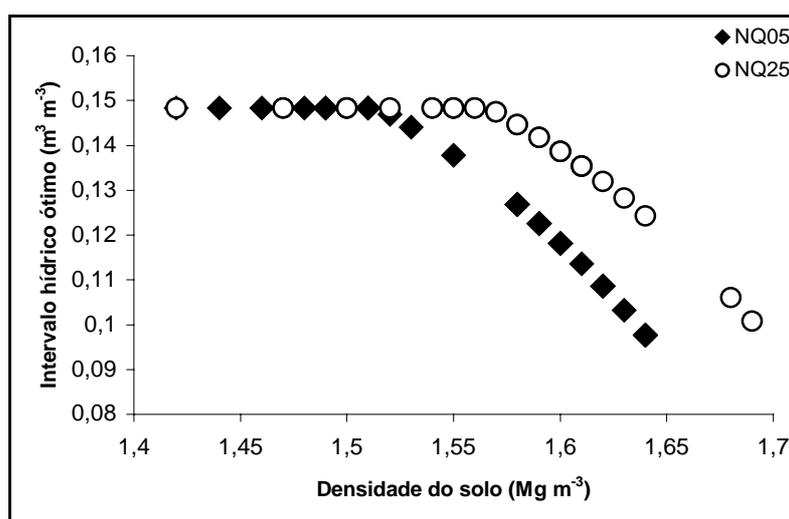


Figura 25. Valores de intervalo hídrico ótimo em função dos valores de densidade do solo nas áreas NQ₀₅ e NQ₂₅.

Houve, portanto, neste caso, uma relação inversa entre RP e IHO, sendo a RP o principal fator a controlar o comportamento do IHO em função da Ds. Como resultado final, o IHO foi, em média, significativamente maior em NQ₂₅ (Figura 26).

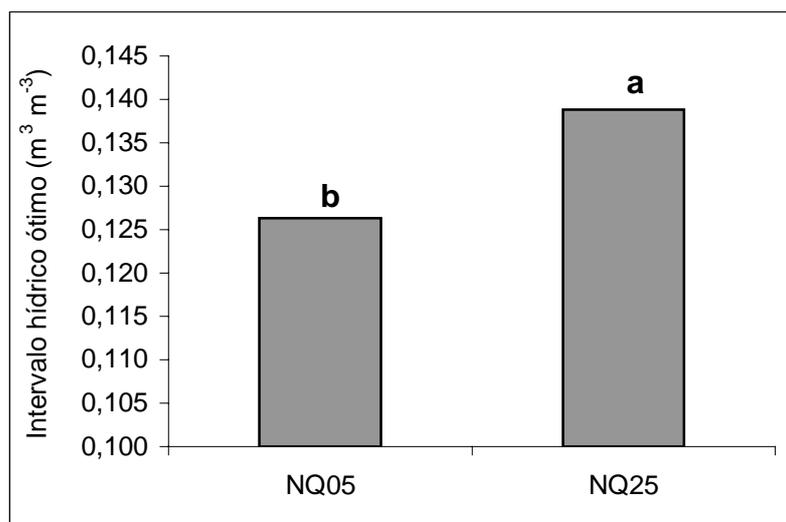


Figura 26. Intervalo hídrico ótimo em NQ₀₅ e NQ₂₅. Letras distintas acima das barras significam diferenças significativas (teste T, 5%) entre as áreas.

6.4.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

Ocorreram problemas quanto aos ajustes dos modelos tanto de retenção de água como de resistência do solo à penetração para as duas áreas de NV. A provável causa de tais problemas foi diagnosticada como sendo a compactação do solo durante as amostragens com os cilindros. De fato, enfrentou-se certa dificuldade na realização das coletas de amostras indeformadas nas áreas deste tipo de solo, pois o mesmo mostrou-se muito resistente à inserção do anel quando mais seco e muito aderente à parede interna do cilindro

amostrador quando mais úmido, sendo muito estreito o limiar de teor de água entre as situações seco e úmido.

No intuito de seguir com o trabalho e contornar este problema, resolveu-se coletar novamente as amostras para estas áreas, utilizando um aparato especialmente desenvolvido para isto, conforme descrito no item Material e Métodos. Com ele os cilindros foram inseridos no solo por meio de força hidráulica e não a golpes de marreta, como feito inicialmente. No entanto, somente estavam disponíveis, até o momento da redação do presente texto, os dados referentes à área NV₅₀, os quais serão discutidos adiante. Não obstante, as determinações em curso com as amostras da área NV₁₂ serão levadas até o fim, terminando por gerar os dados de forma completa, como previsto.

Diferentemente do ocorrido nas áreas de NQ, os resultados de NV₅₀ indicaram que houve efeito significativo da D_s no ajuste da curva de retenção de água, indicando que o aumento de D_s teve efeito diferente sobre a porosidade para este solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Tormena et al. (1998), em Latossolo Roxo. O modelo ajustado (F=120,96; Pr>F=0,0001; R²=0,84) para estimar a curva de retenção de água do solo (Equação 8) incorporou, portanto, a D_s e o potencial matricial.

$$\theta = \exp(-1,3990+0,5613*D_s) \psi^{-0,03996} \quad (Eq. 8)$$

O sinal positivo do termo referente à D_s no modelo indica que seu efeito foi positivo na retenção de água, ou seja, houve maior retenção de água com o aumento da D_s, resultados também observados por Tormena et al. (1998). Substituindo-se os valores de potenciais relativos à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) na

equação 8, respectivamente 60 e 15.000 cm, tem-se que o teor de água disponível deste solo ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) foi de 8,80%, para um valor médio de D_s de $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$.

De acordo com o modelo ajustado ($F=206,04$; $Pr>F=0,0001$; $R^2=0,90$) para estimar RP em NV_{50} (equação 9), nota-se, pelos sinais dos coeficientes, que RP relacionou-se positivamente com a densidade e negativamente com umidade, o que está em concordância com Stirzaker et al. (1996) e Smith et al. (1997).

$$RP = 0,000166 D_s^{10,40351} \theta^{7,0409} \quad (Eq. 9)$$

Os limites ou níveis críticos do IHO encontram-se na Figura 27. Observa-se claramente o efeito positivo da D_s sobre a retenção de água, tanto em θ_{CC} como em θ_{PMP} . O aumento da D_s diminui a macroporosidade e provoca uma redistribuição dos tamanhos dos poros (Hill et al., 1985), podendo com isso aumentar a retenção de água em potenciais mais elevados, próximos àqueles da capacidade de campo. Quanto ao ponto de murcha permanente, em solos tropicais com elevados teores de ferro, o aumento da retenção de água em baixos potenciais com o aumento da D_s é devido à maior quantidade de partículas minerais disponíveis para adsorção de água, aliada à maior microagregação (Berg et al., 1997).

Com o aumento da D_s ocorreu diminuição de θ_{PA} , a qual tornou-se limitante para o IHO em valores de D_s próximos a $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, um número considerado baixos dentro da amplitude observada. Este resultado está em concordância com aqueles de Archer & Smith (1972), que constataram que a porosidade de aeração é reduzida pelo aumento da D_s . De acordo com Topp et al. (1994), apud Tormena et al. (1998), em solos com textura muito argilosa é bastante freqüente a ocorrência de estresse por aeração insuficiente.

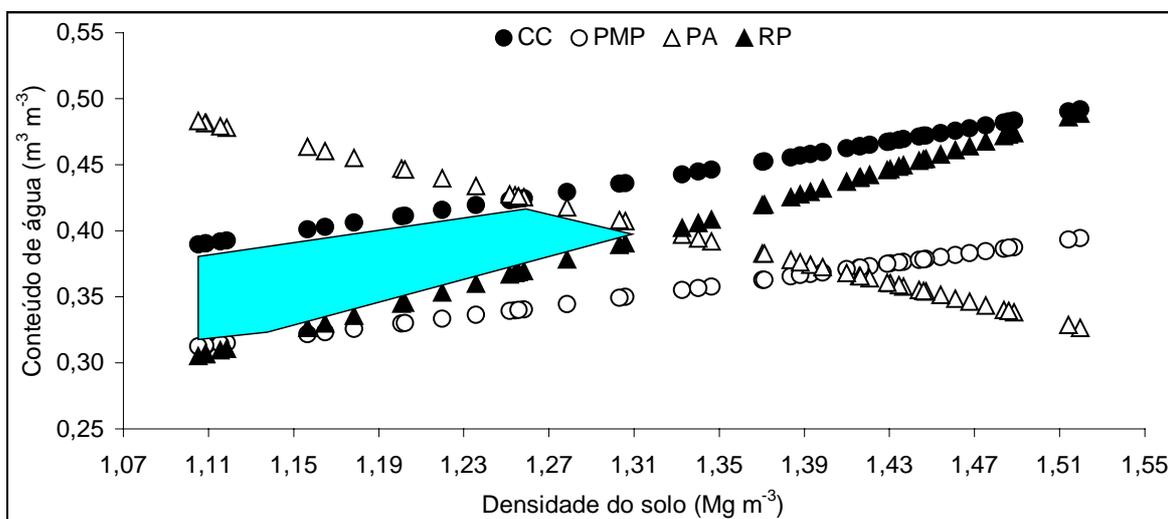


Figura 27. Variação do teor de água em função da densidade do solo nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (URP) na área NV₅₀. A área em azul representa o intervalo hídrico ótimo.

A exemplo de θ_{PA} , houve grande influência da D_s sobre θ_{RP} , a qual passou a limitar o IHO em valores de D_s maiores que $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$. θ_{RP} foi o limite inferior do IHO em 89,6% das amostras, uma frequência maior que a observada para θ_{PA} , que foi de 68,8%. Este resultado está de acordo com as observações de que RP é o fator que mais frequentemente limita o IHO (Silva et al., 1994; Tormena, 1998; Imhoff et al., 2001).

A Figura 28 ilustra o comportamento do IHO em função da variação da D_s . Dentro da gama de valores de D_s observadas, nota-se que os primeiros incrementos de D_s já provocam a redução do IHO, mas é a partir de valores maiores que $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ que a diminuição do IHO se torna mais abrupta. Pode-se observar, também por esta figura, o valor da densidade do solo crítica (D_{sc}), definida como sendo o valor de D_s em que ocorre a interseção das linhas relativas ao limite superior (θ_{CC}) e inferior (θ_{RP}) do IHO, ou seja $IHO = 0$

(Imhoff et al., 2001). Para este caso, o valor de D_{sc} foi de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$, o que significa que a ocorrência de valores de D_s maiores que este indicam condições fortemente restritivas ao crescimento radicular.

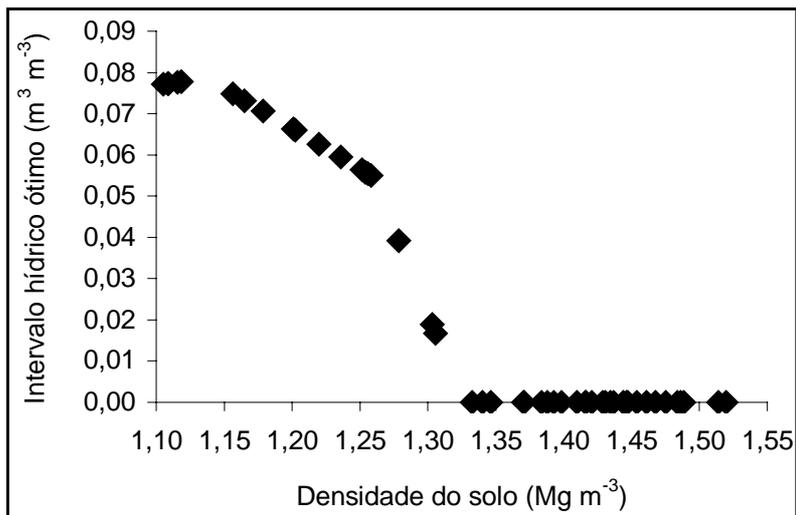


Figura 28. Valores de intervalo hídrico ótimo em função dos valores de densidade do solo na área NV₅₀.

6.5 - Crescimento radicular avaliado pela filmagem em perfil

6.5.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

A análise de variância, para os dados de área e comprimento radiculares avaliados pela filmagem do perfil, mostrou não haver diferença significativa entre NQ₀₅ e NQ₂₅. Apesar de serem visíveis as diferenças no campo, a variabilidade dos dados impede que elas sejam confirmadas estatisticamente. Os coeficientes de variação mostraram-se altos, entre 26 e 32% para área e entre 41 e 60% para comprimento, sendo semelhantes nos resultados por profundidade (camada) e por distância a partir do centro do sulco de plantio.

A Figura 29 mostra que, apesar de não serem significativas, as diferenças entre NQ₀₅ e NQ₂₅ são claras e indicam uma tendência de melhor enraizamento em NQ₂₅, principalmente na camada de solo entre 0,00-0,23 m de profundidade, onde as diferenças são maiores tanto para área quanto para comprimento.

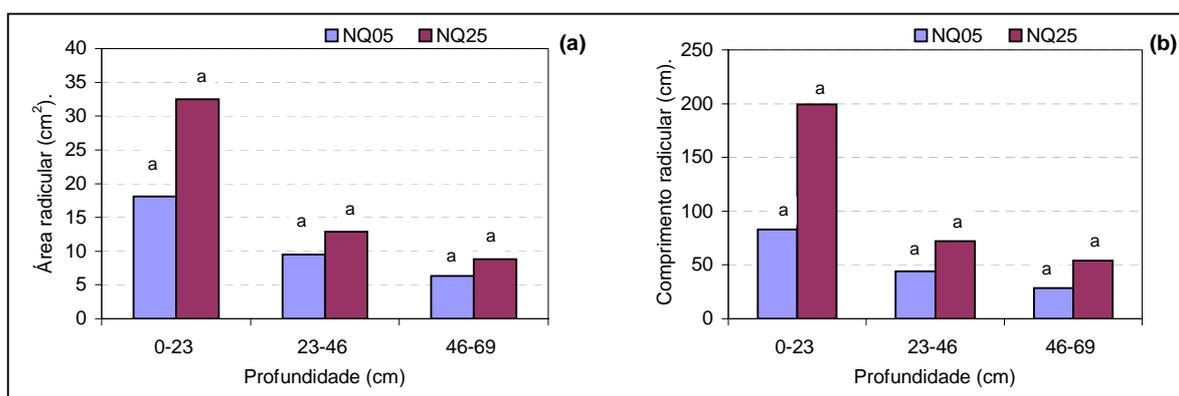


Figura 29. (a) Área (cm²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana estimados pelo SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas camadas de solo de 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de profundidade entre o centro do sulco de plantio e o centro da entrelinha nas áreas de NQ. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada profundidade.

Considerando-se os resultados de área e comprimento radiculares, de distância a partir do centro do sulco de plantio, a tendência supracitada se confirma. A Figura 30 mostra que o enraizamento é sempre melhor em NQ₂₅, independentemente da distância, e apesar das diferenças entre as áreas de estudo serem maiores no caso do comprimento, a ocorrência de maiores coeficientes de variação para este parâmetro não permite uma diferenciação significativa.

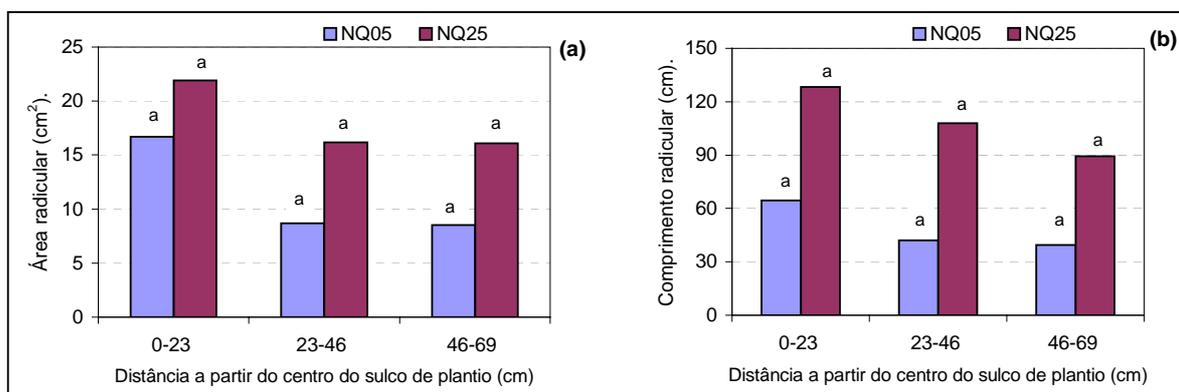


Figura 30. (a) Área (cm²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana, estimados pelo SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas colunas de solo entre 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m a partir do centro do sulco de plantio nas áreas de NQ. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada distância.

A avaliação da quantidade total de raízes expostas no perfil mostrou, novamente, ausência de significância na diferença entre NQ₀₅ e NQ₂₅, apesar das médias serem bastante distantes, tanto para área quanto para comprimento (Quadro 7). Na comparação por percentuais, NQ₀₅ apresentou, em média (3 repetições), 62% da área e 48% do comprimento observados em NQ₂₅.

Quadro 7. Área e comprimento do total de raízes estimado pelo programa SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil (quadros de 0,23 x 0,23 m) nas áreas de NQ.

	Área		Comprimento	
	cm	%	cm	%
NQ ₀₅	67,7 a ¹	62	312,3 a	48
NQ ₂₅	108,5 a	100	651,4 a	100
<i>d.m.s.</i>		48,3		461,4
<i>c.v.</i>		24		42

¹⁾ Letras iguais na coluna indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas.

6.5.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

Como ocorrido para o NQ, a análise de variância dos dados de área e comprimento radiculares avaliados pela filmagem no NV mostrou não haver diferença significativa entre NV₁₂ e NV₅₀, ainda que os coeficientes de variação tenham sido, em média, inferiores. Entretanto, diferentemente de NQ, as diferenças entre as áreas cultivadas em NV foram menores, principalmente quando considerados os dados de área e comprimento de raízes por distância a partir do centro do sulco de plantio

Outra diferença em relação ao NQ foi quanto à tendência de superioridade de enraizamento observada na área cultivada com cana a mais tempo para todas as profundidades e distâncias analisadas. Considerando os dados por profundidade, NV₅₀ mostrou-se superior em área e comprimento de raízes somente nas camadas de 0,00-0,23 e de 0,23-0,46 m. Na camada de 0,46-0,69m, os melhores resultados foram observados em NV₁₂ (Figura 31).

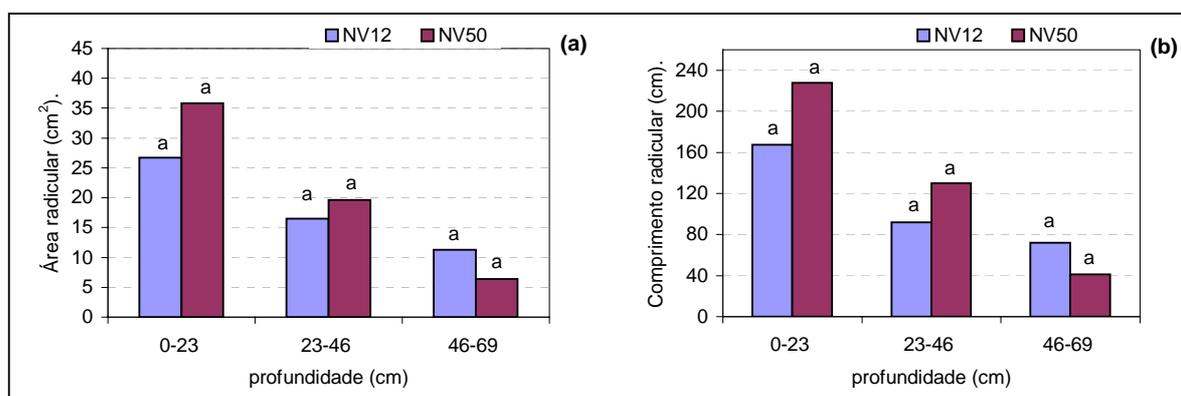


Figura 31. (a) Área (cm²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana estimados pelo SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas camadas de solo de 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de profundidade entre o centro do sulco de plantio e o centro da entrelinha nas áreas de NV. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada profundidade.

Quanto aos dados de distância a partir do centro do sulco de plantio, a Figura 32 mostra que entre 0,00-0,23 m de distância praticamente não há diferença entre NV₁₂ e NV₅₀. Para as distâncias de 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m, no entanto, NV₅₀ é novamente superior.

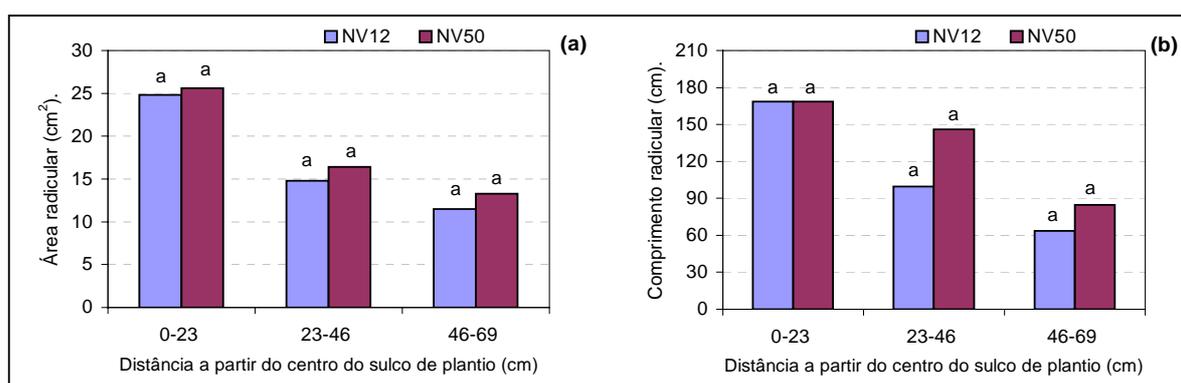


Figura 32. (a) Área (cm²) e (b) comprimento (cm) de raízes de cana, estimados pelo SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil, nas colunas de solo entre 0,00-0,23, 0,23-0,46 e 0,46-0,69 m de distância a partir do centro do sulco de plantio nas áreas de NV. Letras iguais acima das barras indicam igualdade estatística (teste T, 5%) entre as áreas, para cada distância.

A quantidade total de raízes expostas no perfil confirma que as diferenças entre NV₁₂ e NV₅₀ foram menores (Quadro 8). NV₁₂ apresentou, em média, 90% da área e 83% do comprimento de raízes observados em NV₅₀, percentuais bem mais elevados do que aqueles de NQ₀₅ em relação a NQ₂₅.

Quadro 8. Área e comprimento do total de raízes estimado pelo programa SIARCS[®] em imagens de raízes expostas em perfil (quadros de 0,23 x 0,23 m) nas áreas de NV.

	Área		Comprimento	
	cm	%	cm	%
NV ₁₂	105,7 a ¹	90	663,4 a	83
NV ₅₀	117,2 a	100	798,1 a	100
<i>d.m.s.</i>		55,6		235,6
<i>c.v.</i>		22		14

¹⁾ Letras iguais na coluna indicam igualdade estatística (test T, 5%) entre as áreas.

Pode-se dizer que a filmagem, apesar de não haver proporcionado condições para a quantificação correta das diferenças entre as áreas, em razão da variabilidade dos dados, que é devida, em parte, à dificuldade de se realizar um número matematicamente adequado de repetições com a abertura de um número maior de trincheiras, é um método de estudo de raízes que proporciona a diferenciação qualitativa do enraizamento em diferentes áreas, adequando-se muito bem a determinados estudos de manejo do solo. Os dados obtidos podem ser trabalhados de muitas formas, gerando-se totalizações por profundidade, por distância, números totais por trincheira e os percentuais correspondentes.

6.6 - Crescimento radicular avaliado pela coleta de amostras

6.6.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

Os dados de crescimento radicular referentes às amostras coletadas nas áreas de NQ encontram-se no Quadro 9, exceto aqueles relativos ao diâmetro médio radicular (DIA), cuja análise de variância mostrou haver efeito somente de área de estudo, e não da profundidade. De fato, houve uma variação muito pequena do DIA em profundidade entre as áreas, sendo significativamente maior em NQ₀₅ em comparação com NQ₂₅, respectivamente 0,97a e 0,89b mm.

A densidade de comprimento radicular (DC), que representa o comprimento radicular contido num determinado volume de solo, mostrou-se maior em NQ₂₅ na maioria das camadas, sendo significativa sua superioridade em relação a NQ₀₅ nas camadas de 0,30-0,40, 0,50-0,60 e 0,60-0,70 m.

Quadro 9: Densidade de comprimento radicular (DC), volume radicular (VR), área superficial radicular (AS) e massa de matéria seca (MS) de raízes em áreas de NQ cultivadas com cana-de-açúcar por 05 (NQ₀₅) e 25 anos (NQ₂₅)¹.

	DC ⁽²⁾		VR		AS		MS	
	<i>cm cm⁻³</i>	<i>cm³</i>	<i>%</i>	<i>cm²</i>	<i>%</i>	<i>g</i>	<i>%</i>	
	<i>0,00 – 0,10 m</i>							
NQ ₀₅	0,31 a ⁽³⁾	2,70 a	12	90 a	12	0,19 b	11	
NQ ₂₅	1,24 a	9,77 a	18	280 a	17	0,60 a	16	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,97</i>	<i>7,33</i>		<i>190</i>		<i>0,41</i>		
<i>c.v.</i>	<i>86</i>	<i>81</i>		<i>69</i>		<i>72</i>		
	<i>0,10 – 0,20 m</i>							
NQ ₀₅	0,41 a	3,76 b	16	120 b	16	0,30 b	18	
NQ ₂₅	1,82 a	13,98 a	26	430 a	16	0,82 a	22	
<i>d.m.s.</i>	<i>1,44</i>	<i>9,77</i>		<i>290</i>		<i>0,46</i>		
<i>c.v.</i>	<i>88</i>	<i>76</i>		<i>73</i>		<i>56</i>		
	<i>0,20 – 0,30 m</i>							
NQ ₀₅	0,51 a	4,26 a	18	140 a	18	0,32 a	19	
NQ ₂₅	0,31 a	2,86 a	5	100 a	6	0,22 a	6	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,36</i>	<i>2,59</i>		<i>80</i>		<i>0,20</i>		
<i>c.v.</i>	<i>61</i>	<i>50</i>		<i>49</i>		<i>51</i>		
	<i>0,30 – 0,40 m</i>							
NQ ₀₅	0,36 b	3,60 b	15	110 b	14	0,26 b	15	
NQ ₂₅	0,82 a	7,17 a	13	220 a	13	0,52 a	14	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,38</i>	<i>2,61</i>		<i>80</i>		<i>0,22</i>		
<i>c.v.</i>	<i>44</i>	<i>33</i>		<i>33</i>		<i>38</i>		
	<i>0,40 – 0,50 m</i>							
NQ ₀₅	0,35 a	3,44 a	15	110 a	14	0,26 a	15	
NQ ₂₅	0,32 a	3,19 a	6	100 a	6	0,27 a	7	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,34</i>	<i>3,16</i>		<i>100</i>		<i>0,28</i>		
<i>c.v.</i>	<i>70</i>	<i>65</i>		<i>64</i>		<i>73</i>		
	<i>0,50 – 0,60 m</i>							
NQ ₀₅	0,42 b	3,60 b	15	120 b	16	0,25 b	14	
NQ ₂₅	1,15 a	9,54 a	17	280 a	17	0,64 a	17	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,63</i>	<i>5,92</i>		<i>150</i>		<i>0,37</i>		
<i>c.v.</i>	<i>55</i>	<i>62</i>		<i>53</i>		<i>57</i>		
	<i>0,60 – 0,70 m</i>							
NQ ₀₅	0,22 b	2,07 b	9	70 b	9	0,13 b	8	
NQ ₂₅	0,98 a	8,01 a	15	240 a	15	0,62 a	17	
<i>d.m.s.</i>	<i>0,73</i>	<i>5,64</i>		<i>160</i>		<i>0,40</i>		
<i>c.v.</i>	<i>83</i>	<i>77</i>		<i>70</i>		<i>73</i>		
TOTAL								
NQ ₀₅	-	23,4 b		760 b		1,71 b		
NQ ₂₅	-	54,5 a		1650 a		3,69 a		

⁽¹⁾ Valores representam a média de 6 amostras;

⁽²⁾ DC = comprimento ÷ volume da amostra (0,001 m³).

⁽³⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.

O volume radicular (VR) contido no volume de solo amostrado (0,001 m³), que combina os parâmetros comprimento e diâmetro, foi, também, maior em NQ₂₅ na maioria das camadas, sendo significativamente superior a NQ₀₅ nas de 0,10-0,20, 0,30-0,40, 0,50-0,60 e 0,60-0,70 m e no total entre 0,00-0,70m. Este resultado indica que o maior comprimento das raízes em NQ₂₅ compensou o seu menor diâmetro médio, a ponto de gerar um resultado final melhor, que é a colonização do solo com um maior volume de raízes.

Como resultado de um maior volume, a área superficial (AS) também foi maior em NQ₂₅, sendo significativa a superioridade em relação a NQ₀₅ nas mesmas camadas em que o volume o foi. Uma maior AS do sistema radicular da cana na área NQ₂₅ representa maior área de contato solo-raiz, o que gera melhores condições de absorção de nutrientes pelas plantas.

A massa de matéria seca de raízes (MS) relacionou-se bem com DC, VR e AS (Figura 33 a-b), sendo também maior em NQ₂₅ que em NQ₀₅, significativamente nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,30-0,40, 0,50-0,60 e 0,60-0,70 m. Além de confirmar o melhor enraizamento da cana em NQ₂₅, este resultado indica que, para efeito de diferenciação das áreas quanto às condições de crescimento radicular, neste tipo de estudo, em que a questão da nutrição não foi considerada de forma aprofundada, a coleta de raízes e a determinação da MS seria suficiente. Considerando os dados de MS, verifica-se que a distribuição proporcional do sistema radicular nas diferentes camadas de solo é diferente para as duas áreas. Enquanto NQ₀₅ apresentou uma distribuição uniforme no perfil, NQ₂₅, que apresentou MS significativamente superior em relação a NQ₀₅ no total entre 0,00-0,70m, mostrou concentrar o

sistema radicular em duas camadas de 0,00-0,20m e 0,50-0,70m. Contudo, a profundidade efetiva do sistema radicular, considerada como sendo a profundidade a qual abrange cerca de 80% do sistema radicular (NEVES, 1998), foi maior em NQ₂₅, que totalizou 82% da MS radicular até a camada 0,50-0,60m, enquanto NQ₂₅ apresentou 91% de sua MS radicular até a mesma camada.

Outra informação importante é a de que, a estimação dos parâmetros morfológicos das amostras de raízes pelo Win Mac Rhizo obteve desvios muito pequenos, em relação à MS determinada nas mesmas amostras, mostrando que a metodologia apresentada é bastante confiável.

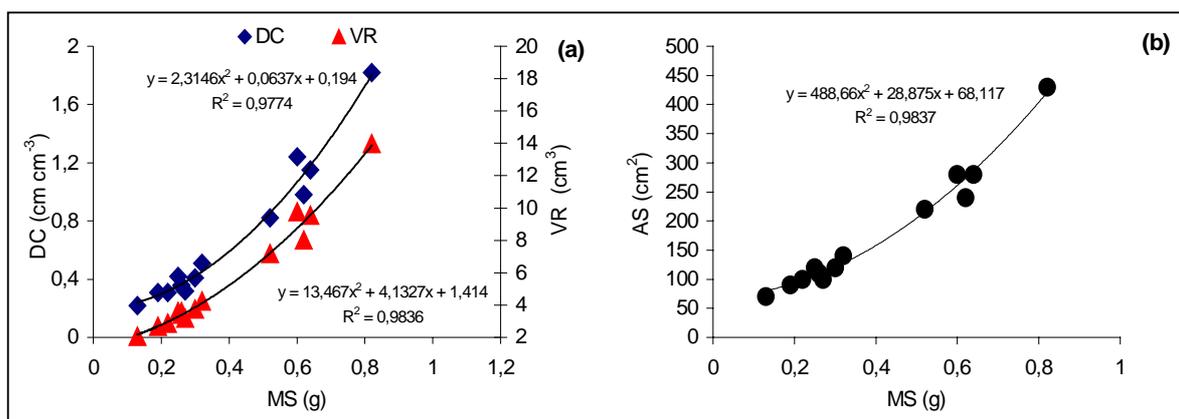


Figura 33. Valores de (a) densidade de comprimento (DC) e volume radicular (VR) e de (b) área superficial (AS) em função de massa de matéria seca das raízes (MS) de cana nas áreas de NQ.

Estes resultados estão em concordância com aqueles oriundos da filmagem (por profundidade), que, apesar de não mostrarem significância nas diferenças entre as áreas, mostraram que o enraizamento foi melhor em NQ₂₅.

6.6.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

A análise de variância dos dados de crescimento radicular, referentes às amostras coletadas nas áreas de NV, mostrou haver efeito somente de profundidade para VR, AS e MS, enquanto que para DC houve interação profundidade x área de estudo. Este resultado indica que houve maior diferença entre as áreas no caso de NQ, pois, apesar dos coeficientes de variação terem sido sempre maiores neste solo, houve efeito de interação profundidade x área de estudo para todas as variáveis, exceto DIA.

DIA mostrou-se um parâmetro pouco afetado pelas diferentes condições de área de estudo e profundidade. Tanto no caso de NQ como no de NV, os coeficientes de variação das médias foram os mais baixos dentre os parâmetros avaliados, cerca de 16% em ambos os casos, mas houve efeito somente de área de estudo para NQ. Nenhum efeito de área de estudo, profundidade ou interação destas foi observado para NV, sendo a média geral para as duas áreas igual a 0,93 mm.

Os dados relativos à DC encontram-se no Quadro 10. Nota-se que as áreas apresentam-se equivalentes em DC entre 0,10-0,50 m; entretanto, nas camadas de 0,00-0,10, 0,50-0,60 e 0,60-0,70 m NV₁₂ apresenta valores de DC significativamente superiores aos de NV₅₀. Índícios da superioridade do enraizamento de NV₁₂ nas camadas mais profundas apareceram nos resultados relativos à filmagem, em que, mesmo que não significativamente, NV₁₂ apresentou maior comprimento e área radiculares na camada de 0,43-0,69 m.

Entretanto, há uma discrepância de resultados entre as metodologias de filmagem e coleta de amostras, se considerado o resultado nas camadas mais superficiais. Enquanto a coleta indica superioridade significativa de NV₁₂ em relação a NV₅₀ entre 0,00-

0,10 m, a filmagem indicou o contrário para a camada de 0,00-0,23 m. Talvez isto se deva ao fato da coleta de amostras ter avaliado o enraizamento numa coluna de solo (0,10 x 0,10 x 0,70 m) a cerca de 0,25 m do centro do sulco de plantio, enquanto que a filmagem avaliou toda a área entre o centro do sulco e o centro da entrelinha até 0,69 m de profundidade. Como há uma grande quantidade de raízes na área delimitada pelo sulco, a coleta de amostras pode ter subestimado o enraizamento em NV₅₀ para as camadas superficiais do solo, o que representa uma vantagem para a metodologia da filmagem.

Quadro 10. Densidade de comprimento (DC)¹ radicular em áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar por 12 (NV₁₂) e 50 anos (NV₅₀)².

Profundidade <i>m</i>	NV ₁₂	NV ₅₀	<i>d.m.s.</i>	<i>c.v.</i>
	————— <i>cm cm⁻³</i> —————			%
0,00 – 0,10	1,32 a ⁽³⁾	0,88 b	0,40	24,60
0,10 – 0,20	0,45 a	0,47 a	0,29	43,49
0,20 – 0,30	0,28 a	0,29 a	0,18	42,43
0,30 – 0,40	0,25 a	0,28 a	0,18	47,14
0,40 – 0,50	0,17 a	0,13 a	0,10	46,96
0,50 – 0,60	0,18 a	0,05 b	0,07	41,64
0,60 – 0,70	0,17 a	0,06 b	0,08	48,65

⁽¹⁾ DC = comprimento ÷ volume da amostra (0,001 m³);

⁽²⁾ Valores representam a média de 6 amostras;

⁽³⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas linhas indicam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.

O efeito da profundidade sobre VR, AS e MS encontra-se no Quadro 11. Nota-se que há diminuição significativa do enraizamento com o aumento da profundidade, principalmente entre as três primeiras camadas a partir da superfície. Considerando os dados de MS, nota-se que as raízes nas áreas de NV encontraram-se mais concentradas próximo à superfície. Verifica-se que, na média de NV₁₂ e NV₅₀, 55% das raízes estavam contidos na

camada de 0,00-0,20 m, enquanto nas áreas de NQ este número foi de no máximo 38% (NQ₂₅). Quanto à profundidade efetiva do sistema radicular, cerca de 83% das raízes se encontraram até 0,40 m, enquanto nas áreas de NQ as profundidades efetivas foram 0,50m para NQ₀₅, com 77% das raízes, e 0,60m para NQ₂₅, com 82%.

Quadro 11. Volume radicular (VR), área superficial (AS) e massa de matéria seca (MS) de raízes nas áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar¹.

Profundidade m	VR		AS		MS	
	Cm	%	cm ²	%	g	%
0,00 – 0,10	7,83 a ⁽²⁾	40	270 a	40	0,68 a	34
0,10 – 0,20	3,98 b	20	140 b	20	0,41 b	21
0,20 – 0,30	2,53 c	13	90 c	13	0,29 bc	15
0,30 – 0,40	2,13 cd	11	80 cd	12	0,25 cd	13
0,40 – 0,50	1,45 de	7	50 de	7	0,16 de	8
0,50 – 0,60	0,98 e	5	30 e	4	0,11 e	5
0,60 – 0,70	0,86 e	4	30 e	4	0,09 e	4
TOTAL	19,8		690		1,99	

⁽¹⁾ Valores representam a média dos dados de NV¹² e NV⁵⁰ (6x2=12 repetições);

⁽²⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.

Sobre os totais avaliados entre 0,00-0,70m, os valores médios entre NV₁₂ e NV₅₀ para VR, AS e MS nas áreas de NV foram inferiores àqueles observados nas áreas de NQ. De fato, os valores observados nas áreas de NV foram mais próximos aos valores de NQ₀₅.

A exemplo do observado nas áreas de NQ, houve boa relação entre MS e os demais parâmetros, o que se nota pela distribuição relativa (%) em profundidade de VR, AS em comparação a MS no perfil entre 0,00-0,70 m.

6.7 - Parâmetros morfológicos da cana e produtividade

6.7.1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (NQ)

Os dados relativos aos parâmetros morfológicos da cana e à produtividade nas áreas de NQ encontram no Quadro 12. Apesar da pequena variabilidade dos dados, o que se evidencia pelos baixos coeficientes de variação das médias, somente foi observada diferença significativa entre NQ₀₅ e NQ₂₅ para o parâmetro número de entrenós do colmo (NE), superior em NQ₀₅, havendo, portanto, grande equivalência entre as áreas.

Quadro 12. Número de colmos por metro de sulco de plantio, diâmetro basal, comprimento do colmo, número de entrenós do colmo e produtividade em áreas de NQ cultivadas com cana-de-açúcar (var. RB72454 – 5º corte) por 5 (NQ₀₅) e 25 anos (NQ₂₅).

Áreas	Número de colmos ⁽¹⁾	Diâmetro basal do colmo ⁽²⁾	Comprimento do colmo ⁽²⁾	Número de entrenós ⁽²⁾	Produtividade ⁽¹⁾
	<i>n° m⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>n° colmo⁻¹</i>	<i>t ha⁻¹</i>
NQ ₀₅	9,4 a ⁽³⁾	26,1 a	1,03 a	10,5 a	26,6 a
NQ ₂₅	10,5 a	27,1 a	1,00 a	9,0 b	32,9 a
<i>d.m.s.</i>	<i>1,6</i>	<i>1,2</i>	<i>5,8</i>	<i>0,5</i>	<i>6,6</i>
<i>c.v.</i>	<i>11</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>15</i>

⁽¹⁾ Valores representam a média de 5 amostras;

⁽²⁾ Valores representam a média de 100 amostras;

⁽³⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.

A produtividade estimada, no entanto, foi superior em 6,3 toneladas por hectare em NQ₂₅, diferença definida como não significativa pela análise de variância dos dados, mas que, para o produtor de cana, pode representar um aumento de receita de cerca de R\$ 179,42 por hectare, considerando o valor de R\$28,48 por tonelada de cana (IEA, 2002). Isto significa que NE não foi um bom estimador da produtividade. De fato, o número de

colmos por metro de sulco de plantio (NC) e o diâmetro basal do colmo (DB), ligeiramente maiores em NQ₂₅, mostraram-se melhores para estimar a produtividade nestas áreas, pois os dados desses parâmetros estão em concordância com aqueles de produtividade da cana.

6.7.2 - NITOSSOLO VERMELHO (NV)

Os dados relativos aos parâmetros morfológicos da cana e à produtividade nas áreas de NV encontram no Quadro 13. Observa-se que os valores de NC, DB e CC foram significativamente maiores em NV₅₀ em relação a NV₁₂. Estes resultados estão em concordância com os dados de produtividade, a qual, também, foi maior em NV₅₀. Novamente, vale ressaltar que, mesmo não sendo significativa a diferença de produtividade entre as áreas, as 13,4 toneladas a mais por hectare em NV₅₀ representam uma receita maior para o produtor, cerca de R\$ 381,63 a mais para cada hectare, considerando o mesmo valor de R\$28,48 por tonelada utilizado no cálculo para as áreas de NQ. A não significância na diferença de produtividade entre NV₁₂ e NV₅₀, em comparação com a significância em outros parâmetros, seguramente se deveu à variabilidade distinta entre os dados. Por exemplo, o c.v. para o valor médio de produtividade foi seis vezes maior do que no caso do NC.

Em relação aos dados observados para as áreas de NQ, cuja variedade era distinta, o parâmetro que menos se diferenciou entre os tipos de solo foi o diâmetro basal. Já a produtividade foi muito maior nas áreas de NV, em média três vezes maior, resultado da interação de vários fatores, como por exemplo os de fertilidade.

Quadro 13. Número de colmos por metro de sulco de plantio, diâmetro basal, comprimento do colmo, número de entrenós do colmo e produtividade em áreas de NV cultivadas com cana-de-açúcar (var. SP 79-1011– 3º corte) por 12 (NV₁₂) e 50 anos (NV₅₀).

Áreas	Número de colmos ⁽¹⁾	Diâmetro basal do colmo ⁽²⁾	Comprimento do colmo ⁽²⁾	Número de entrenós ⁽²⁾	Produtividade ⁽¹⁾
	<i>N° m⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>n° colmo⁻¹</i>	<i>t ha⁻¹</i>
NV ₁₂	12,7 b ⁽³⁾	27,3 b	1,51 b	13,0 a	84,8 a
NV ₅₀	13,5 a	31,5 a	1,85 a	13,9 a	98,2 a
<i>d.m.s.</i>	<i>0,7</i>	<i>1,7</i>	<i>15,4</i>	<i>1,0</i>	<i>23,9</i>
<i>c.v.</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>18</i>

⁽¹⁾ Valores representam a média de 5 amostras;

⁽²⁾ Valores representam a média de 100 amostras;

⁽³⁾ Para cada camada de solo, letras distintas nas colunas indicam diferenças significativas (test T, 5%) entre as áreas.

7 - CONCLUSÕES

- 1) Para o NEOSSOLO, os teores de MO e micronutrientes e os valores de SB e V% foram similares entre as áreas estudadas. Para o NITOSSOLO, o monocultivo da cana por 50 anos melhorou a fertilidade, resultando em níveis de MO, micronutrientes, SB e V% maiores que os da área cultivada por 12 anos;
- 2) O método do perfil cultural indicou não haver diferenças estruturais significativas entre as áreas de NEOSSOLO. No NITOSSOLO, as condições estruturais do solo foram mais favoráveis ao enraizamento na área cultivada por 50 anos; nem a distribuição nem a estabilidade dos agregados foram significativamente modificadas pelo aumento no tempo de monocultivo de cana nos dois solos; no NEOSSOLO o IHO foi maior na área cultivada com cana por mais tempo;

- 3) O método de filmagem de raízes mostrou que, em ambos os solos, o crescimento radicular foi melhor nas áreas cultivadas com cana por mais tempo. Entretanto, o método de coleta de raízes mostrou que somente no caso do NEOSSOLO o enraizamento foi melhor na área cultivada há mais tempo com a cana. No caso do NITOSSOLO, as diferenças entre as áreas cultivadas foi observada apenas em relação à densidade de comprimento, que foi maior na área cultivada a menos e tempo em três das sete camadas de solo estudadas.
- 4) Embora a produtividade da cana tenha sido maior nas áreas cultivadas com cana por mais tempo, em ambos os solos as diferenças não foram significativa entre elas.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J.M., SPENCER, T. Forest hydrology. In:____. *Carbon, nutrient and water balances of tropical rain forest ecosystems subject to disturbance: management implications and research proposals*. S.L.:UNESCO, 1991. p.25-34 (MAB Digest, 7)
- ANGERS, D.A., MEHUYS, G.R. Aggregate stability to water. In: CARTER, M.R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.651-7
- ANJOS, J.T., UBERTI, A.A.A., VIZZOTTO, V.T., LEITE, G.B., KREIGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de manejo. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.18, p.139-45, 1994.
- ARCHER, J.R., SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. *J. Soil Sci.*, v.23, p.475-80, 1972.

- BARBIERI, J.L., POLI, D.M., DONZELLI, J.L. Compactação e descompactação do solo em áreas de reforma de canaviais. *Bol. Téc. Copersucar*, v.22, p.14-20, 1984.
- BARBIERI, J.L., ALLEONI, L.R.F., DONZELLI, J.L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.21, p.89-98, 1997.
- BEARE, M.H., HENDRIX, P.F., COLEMAN, D.C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.777-86, 1994a.
- BEARE, M.H., CABRERA, M.L., HENDRIX, P.F., COLEMAN, D.C. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.787-95, 1994b.
- BERG, M., KLAMT, E., REUWIJK, L.P., SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. *Geoderma*, v.78, p.161-80, 1997.
- BETZ, C.L., ALLMARAS, R.R., COPELAND, S.M., RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.62, p.1384-93, 1998.
- BLACKBURN, F. *Sugar-cane*. New York: Longman, 1984. 414p.
- BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.363-75.
- BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188p.

- BRAMLEY, R.G.V., ELLIS, R.O., GARSIDE, A.L. Changes in soil chemical properties under long-term sugar cane monoculture and their possible role in sugar yield decline. *Aust. J. Soil Res.*, v.34, p.967-84, 1996.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. *Levantamento de reconhecimento dos solos do estado de São Paulo*. Rio de Janeiro: CNEPA/SNPA, 1960. p.22-31
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Apresenta dados estatísticos e monetários sobre as atividades agrícolas e pecuárias do país. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/>. Acesso em: abr. 2002.
- BRAUNACK, M.V. The effect of soil physical properties on growth and yield of sugarcane. *Sugar Cane*, n.2, p.4-12, 1997.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of a flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of ASAE*, v.33, p.519-24, 1990.
- BUSSCHER, W.J., BAUER, P.J., CAMP, C.R., SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res.*, v.43, p.205-17, 1997.
- CAMARGO, O.A. *Compactação do solo e desenvolvimento de plantas*. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 48p.
- CARON, J., ESPINDOLA, C.R., ANGERS, D.A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.60, p.901-8, 1996.
- CARTER, M.R., BALL, B.C. Soil porosity. In: CARTER, M.R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.581-8

- CARVALHO, L.C.C. Perspectivas da cultura da cana-de-açúcar para a década de noventa.
In: CÂMARA, G.M.S., OLIVEIRA, E.A.M. *Produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1993. p.01-17
- CARVALHO, M.A., FREIRE, J.C., CURI, N., BAHIA, V.G. Eficiência de dispersantes na análise granulométrica de materiais de solos com horizonte B textural. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.23, p.415-21, 1988.
- CARVALHO, S.R., BRUAND, A., HARDY, M., LEPRUN, J.C., JAMAGNE, M. Tassement des sols ferrallitiques podzólico vermelho amarelo sous culture de canne à sucre. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, v.26, p.195-212, 1991.
- CASTRO FILHO, C. *Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion*. Columbus, 1988. 276p. Tese (Doutorado) – Ohio State University.
- CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., GUIMARÃES, M. de F., FONSECA, I.C.B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the State of Parana, Brazil. *Soil Tillage Res.*, v.65, n.1, p.45-51, 2002.
- CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O., PODANOSCH, I. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de cultura e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.22, p.527-38, 1998.
- CERRI, C.C., FELLER, C., CHAUVEL, A. Évolution des principales propriétés d'un latosol (rouge foncé) après défrichement et sous cultures de canne à sucre pendant 12 et 50 ans. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, v.26, p.37-50, 1991.

- CONTIERO, R.L. *Sistemas de preparo do solo para a cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp): efeitos no solo e na planta*. Botucatu, 1997. 105p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- CRESTANA, S., GUIMARÃES, M.F., JORGE, L.A.C., RALISCH, R., TOZZI, C.L., TORRE, A., VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.18, p.365-71, 1994.
- CULLEY, J.L.B. Density and compressibility. In: CARTER, M.R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.529-40
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545-67.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, v.11, p.199-238, 1988.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FERNANDES, J. *A subsolagem no controle da compactação do solo na cana-de-açúcar (Saccharum spp) variedade CB 4176 e seus efeitos no rendimento agrícola e no sistema radicular*. Piracicaba, 1979. 158p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- FERNANDES, J., FURLANI NETO, V.L., STOLF, R. Sistema de plantio e a competição do solo na cana-de-açúcar. *Brasil Açucareiro*, v.97, n.3, p.20-31, 1981.

- FERNANDES, J., RIPOLI, T.C., MILLAN, M. A compactação do solo e a brotação das soqueiras. *Álcool & Açúcar*, v.12, n.3, p.12-7, 1983.
- FREITAS, G.R. Preparo do solo. In: PARANHOS, S.B. (coord.) *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.271-83.
- GALLEGO, R.O., MARTÍNEZ, F., SASTRIQUES, F.O. Influência de las fracciones apolares del humus sobre la estabilidad estructural en los suelos Oscuro Plástico y Ferralítico Rojo. *Cienci. Agric.*, v.31, p.62-7, 1987.
- GAUTRONNEAU, Y., MANICHON, H. *Guide methodique du profil cultural*. Paris: CERET/GEARA, 1987. 71p.
- GEORGES, J.E.W. Effect of harvest traffic and soil water content on soil compaction and regrowth of sugarcane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17, 1980, Manila. *Proceedings...* Manila: Executive Committee of the International Society of Sugar Cane Technologists, 1980. v.1, p.1078-88.
- GRABLE, A.R., SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.32, p.180-6, 1968.
- GROHMANN, F., RAIJ, B. van Influência dos métodos de agitação na dispersão da argila do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14, 1973, Santa Maria. *Anais...* Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1974. p.123-32
- HAISE, H.R., HASS, H.J., JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15- and 26-atmosphere percentage. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v.34, p.20-5, 1955.

- HENDERSON, C.W. Lupin as a biological plough: evidence for, and effects on wheat growth and yield. *Aust. J. Exp. Agric.*, v.29, p.99-102, 1989.
- HILL, R.L., HORTON, R., CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.49, p.1264-70, 1985.
- IMHOFF, S., SILVA, A.P., DIAS JÚNIOR, M. de S., TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.25, p.11-8, 2001.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apresenta dados estatísticos e valor atualizado da produção das diversas culturas agrícolas cultivadas no estado. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/>. Acesso em: abr. 2002.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1981. v.1, 126p.
- KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, v.12, p.1-52, 1990.
- KAY, B.D., SILVA, A.P., BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil. Sci.*, v.77, p.655-67, 1997.
- KEMPER, W.D., ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.425-42.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.635-660

- LEMOS R.C., SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta do solo no campo*. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, v.1, p.277-94, 1985.
- MACLEAN, N.R. Long-term effects of sugar cane production on some physical and chemical properties of soils in the Goondi Mill area. In: CONFERENCE OF THE QUEENSLAND SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 42, 1975, Brisbane. *Proceedings...* Brisbane: Bureau of Sugar Experiment Stations, 1975. p.123-126.
- MARSCHNER, H. Effect of internal and external factors on root growth and development. In: _____. *Mineral nutrition of higher plants*. 2.ed. London, Academic Press, 1995. p.508-36.
- MATERECHERA, S.A., ALSTON, A.M., KIRBY, J.M., DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant Soil*, v.144, p.297-303, 1992.
- MEROTTO JÚNIOR, A., MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.23, p.197-202, 1999.
- MORAES, J.F.L. *Conteúdo de carbono e nitrogênio e tipologia nos solos da Bacia Amazônica*. Piracicaba, 1991. 84p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MORAES, M.H., BENEZ, S.H., LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimeto das raízes de plantas de soja. *Bragantia*, v.54, p.393-403, 1995.

- NASCIMENTO, C., HOMMA, A. Amazônia: meio ambiente e tecnologia agrícola. Belém: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisas Agroflorestal do Trópico Úmido, 1984. 282p.
- NEVES, C.S.V.J. *Influência de sistemas de manejo em características de tangerina 'Poncã' sobre limão 'Cravo' e de um latossolo roxo*, 1998. 158P. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- NYE, P.H., GREENLAND, D.J. Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant Soil*, v.21, p.101-7, 1964.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, v.76, p.319-37, 1984.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.3, p.197-200, 1968.
- ORELLANA, J.A., PILATTI, M.A., GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical atate assessment. *J. Sustainable Agric.*, v.9, p.91-108, 1997.
- ORLANDO FILHO, J., MACEDO, N., TOKESHI, H. *Seja doutor do seu canavial*. Piracicaba: Potafos, 1994. 16p. (Arquivo do agrônomo,7)
- PARANÁ. Secretaria de Estado da Agrigultura. *Acompanhamento da situação agropecuária do Paraná: cana-de-açúcar*. Curitiba: DERAL/CEPA-PR, 1996. p.70-4.
- PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. *Aust. J. Soil Res.*, v.29, p.717-28, 1991.
- PRIMAVESI, A. Influence of soil structure on sugar cane yields. *Agrochimica*, v.18, p.565-8, 1974.

- PRIMAVESI, O. A compactação dos solos agrícolas. *Inf. Agron.*, n.29, p.1-3, 1985.
- RAIJ, B. van, CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. *Bol. Tec. Inst. Agron. (Campinas)*, n. 100, p.237-9, 1996.
- RAIJ, B. van, ANDRADE, J.C., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.
- REEVE, M.J., CARTER, A.D. Water release characteristic. In: SMITH, KA., MULLINS, C.E. *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker, 1991. p.111-60
- RICAUD, R. Effect of subsoiling on soil compaction and yield of sugarcane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16, 1977, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo: Executive Comitee of the International Society of Sugar Cane Technologists, 1978. p.1039-48.
- RICHARDS, L.A., WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Sci.*, v.56, p.331-9, 1944.
- ROSOLEM, C.A., VALE, L.S.R., GRASSI FILHO, H., MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.18, p.491-7, 1994.
- ROTH, C.H., CASTRO FILHO, C., MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com agregação de um latossolo Roxo distrófico. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.15, p.241-8, 1991.
- RUSSELL, R.S., GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility - The response of roots to mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Sci.*, v.22, p.305-18, 1974.

- SANCHEZ, PA, VILLACHICA, J.H., BANDY, D.E. Soil fertility diagnosis after clearing a tropical rainforest in Peru. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.47, p.1171-8, 1983.
- SAVAGE, M.J., RITCHIE, J.T., BLAND, W.L., DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.*, v.88, p.644-51, 1996.
- SHELDRICK, B.H., WANG, C. Particle size distribution. In: CARTER, M.R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.499-512
- SHULKA, L.N. Soil compaction due to harvest traffic in sugarcane fields on a Lajas Valley farm of Puerto Rico. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*, v.58, p.279-92, 1974.
- SHULKA, L.N., RAVALO, E.J. Compactación del suelo en los campos de caña a causa de los carros de transporte. *Sugar Azucar*, n.8, p.50-2, 1976.
- SIDIRAS, N., PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.9, p.249-54, 1985.
- SILVA, A.J.N., RIBEIRO, M.R. Caracterização de latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de alagoas: atributos morfológicos e físicos. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.21, p.677-84, 1997.
- SILVA, A.J.N., RIBEIRO, M.R. Caracterização de latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de alagoas: propriedades químicas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.22, p.291-9, 1998.
- SILVA, A.P., KAY, B.D. The sensivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, v.184, p.323-9, 1996.
- SILVA, A.P., KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.61, p.877-83, 1997.

- SILVA, A.P., KAY, B.D., PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.1775-81, 1994.
- SILVA, M.S.L., RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar nas propriedades químicas de solos argilosos. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.30, p.389-94, 1995.
- SMITH, C.W., JOHNSTON, M.A., LORENZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of south african forestry soils. *Geoderma*, v.78, n.1/2, p.93-111, 1997.
- SRIVASTAVA, A.K. Soil compaction: a problem in sugarcane culture. *Indian Sugar*, v.34, p.503-4, 1984.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *SAS/STAT procedure guide for personal computers: version 5*. Cary, 1991. 1986p.
- STIRZAKER, R.J. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. *Aust. J. Exp. Agric.*, v.37, p.477-83, 1997.
- STIRZAKER, R.J., PASSIOURA, J.B., WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, v.185, p.151-62, 1996.
- TAVARES FILHO, J., RALISCH, R., GUIMARÃES, M.F., MEDINA, C.C., BALBINO, L.C., NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.23, p.393-9, 1999.
- TAYLOR, H.M., ROBERSON, G.M., PARKER JUNIOR, J.J. Soil strenght-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, v.102, p.18-22, 1966.
- TOPP, G.C., GALGANOV, Y.T., BALL, B.C., CARTER, M.R. Soil water desorption curves. In: CARTER, M.R. (Ed.) *Soil Sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.569-80

- TORMENA, C.A. *Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo*. Piracicaba, 1998. 104p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- TORMENA, C.A., SILVA, A.P., LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.22, p.573-81, 1998.
- TORMENA, C.A., SILVA, A.P., LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.*, v.52, p.223-32, 1999.
- TROUSE, A.C., HUMBERT, R.P. Some effects of soil compaction on the development of sugarcane roots. *Soil Sci.*, v.91, p.208-17, 1961.
- YANG, S.J. Soil physical properties and the growth of ratoon cane as influenced by mechanical harvesting. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16, 1977, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo: Executive Comitee of the International Society of Sugar Cane Technologists, 1978. v.2, p.835-47.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agr.*, v.28, p.337-51, 1936.
- WATTS, C.W., DEXTER, A.R., DUMITRU, E., ARVIDSSON, J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. Part I. A laboratory test. *Soil Till. Res.*, v.37, p.161-74, 1996a.
- WATTS, C.W., DEXTER, A.R., LONGSTAFF, D.J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. Part II. Field trials. *Soil Tillage Res.*, v.37, p.175-90, 1996.

WHITELEY, G.M., DEXTER, A.R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. *Soil Tillage Res.*, v.2, p.379-93, 1982.

WHITELEY, G.M., DEXTER, A.R. The behaviour of roots encountering cracks in soil. I. Experimental methods and results. *Plant Soil*, v.77, p.141-9, 1984.

APÉNDICE

CARACTERIZAÇÃO DAS CLASSES DE SOLO

Para cada classe de solo, procedeu-se à caracterização dos perfis conforme Lemos & Santos (1996), examinando-se três trincheiras em área sob vegetação nativa. Além desta caracterização morfológica no campo, foram coletadas amostras a fim de realizar determinações de propriedades físicas e químicas no laboratório (Quadros 14 e 15).

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (Figura 34)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO QUARTZARÊNICO A moderado fase cerrado tropical relevo suave ondulado (ENTISOL).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL – Trincheira aberta na parte baixa da encosta, com 1% de declividade e sob vegetação de cerrado.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Grupo São Bento, Formação Botucatu.

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso.

ROCHOSIDADE – Não rochoso.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL

A₁ 0 - 0,12 m; bruno avermelhado (5YR 4/3, úmido), bruno (7,5 YR 4/4, seco); textura arenosa; fraca média a grande granular; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.

AC 0,12 – 0,36 m; bruno avermelhado (5YR 4/4, úmido), vermelho amarelado (5YR 4/6, seco); textura arenosa; fraca grande a muito grande granular; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição gradual e ondulada.

CA 0,36 – 0,65 m; bruno avermelhado (5YR 4/4, úmido), vermelho amarelado (5YR 4/6, seco); textura média; fraca grande granular; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e ondulada.

C₁ 0,65 – 0,95 m +; bruno amarelado (10YR 5/4, úmido), bruno palha (10YR 6/3, seco); textura arenosa; grãos simples; solto, não plástico e não pegajoso.

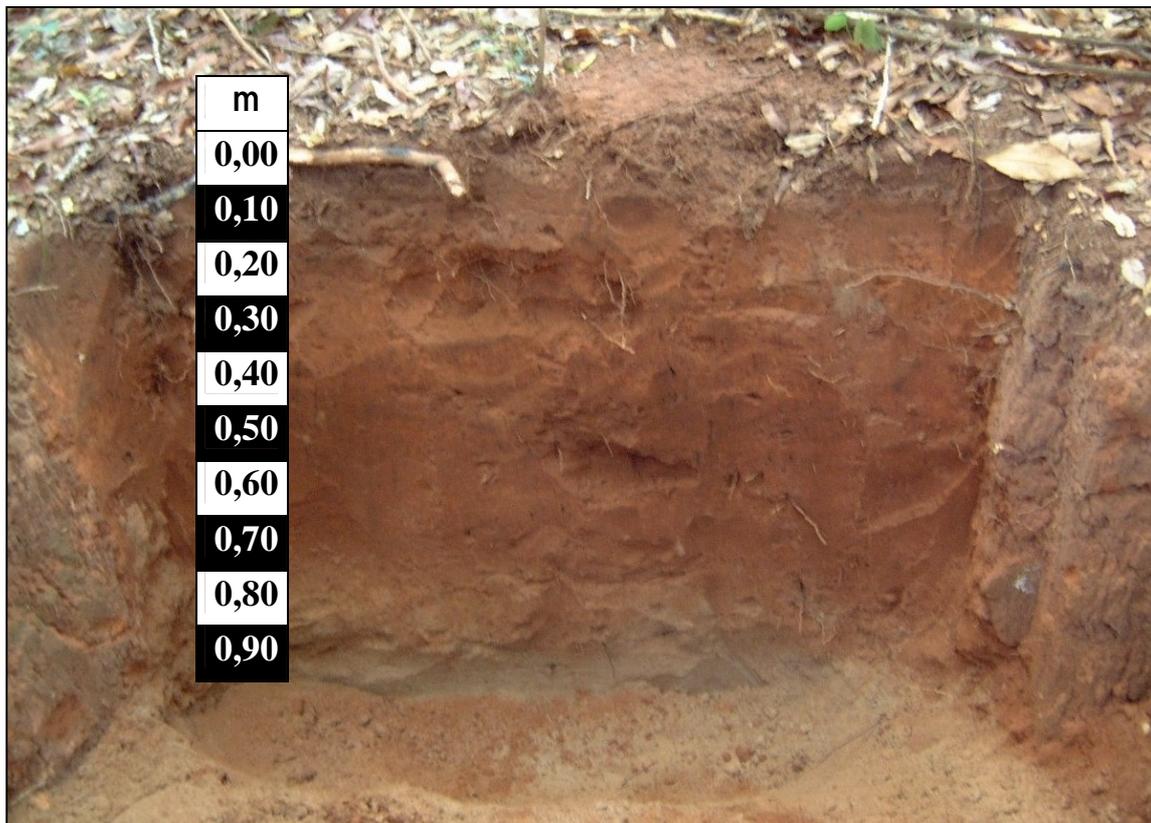


Figura 34. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO sob vegetação nativa de cerrado.

Quadro 14. propriedades físicas¹ e químicas² do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO.

Horizonte		Composição granulométrica (g kg ⁻¹)								Bases trocáveis (mmol _c dm ⁻³)		
Símbolo	Profundidade	Areia ³						Silte	Argila	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺
	m	AMG	AG	AM	AF	AMF	AT					
A ₁	0 – 0,12	2,8	15	238,6	477,9	115,2	850	40	110	20	4	0,4
AC	0,12 – 0,36	1,1	15,8	192,0	446,6	203,9	860	30	110	2	0,4	0,1
CA	0,36 – 0,65	0,8	9,6	134,8	421,5	246,4	810	40	150	1	traços	0,1
C ₁	0,65 – 0,95+	0,6	33,2	378,2	408,5	91,6	910	10	80	traços	traços	traços

¹ Granulometria: agitação lenta (recíproco) por 14 horas, dispersante químico NaOH 1N, densímetro, Lab. Física do Solo, FCA/UNESP;

² Bases trocáveis: resina trocadora (Raij et al., 2001);

³ AMG = areia muito grossa (2-1 mm); AG = areia grossa (1-0,5 mm); AM = areia média (0,5 – 0,25 mm); AF = areia fina (0,25-0,10 mm); AMF = areia muito fina (0,10 – 0,05 mm); AT = areia total (2-0,05 mm).

NITOSSOLO VERMELHO (Figura 35)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

CLASSIFICAÇÃO - NITOSSOLO VERMELHO A moderado textura muito argilosa relevo suave ondulado (ALFISOL).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL – Trincheira aberta na parte baixa da encosta, com 6% de declividade e sob vegetação de mata.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Grupo São Bento, Formação Serra Geral.

PEDREGOSIDADE - Não pedregoso.

ROCHOSIDADE - Não rochoso.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL

A₁ 0 – 0,12 m; vermelho muito acinzentado (2,5 YR 2,5/2, úmido), bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/3, seco); textura argilosa; forte muito pequena blocos subangulares; muito duro, friável, muito plástico e muito pegajoso; transição clara e plana.

- B₁ 0,12 - 0,30 m; vermelho acinzentado (10 R 3/4, úmido), bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4, seco); textura argilosa; forte muito pequena a pequena blocos subangulares; cerosidade moderada e comum; muito duro, friável; muito plástico e muito pegajoso; transição difusa e plana.
- B₂ 0,30 - 0,52 m; vermelho acinzentado (10R 3/3, úmido), bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4, seco); textura muito argilosa; forte pequena a média blocos subangulares; cerosidade forte e abundante; muito duro, friável, muito plástico e muito pegajoso; transição difusa e plana.
- B₃ 0,52 - 0,82 m+; vermelho acinzentado (10 R 3/3, úmido), bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4, seco); textura muito argilosa; forte pequena blocos subangulares; cerosidade moderada e pouca; muito duro, friável, muito plástico e muito pegajoso.

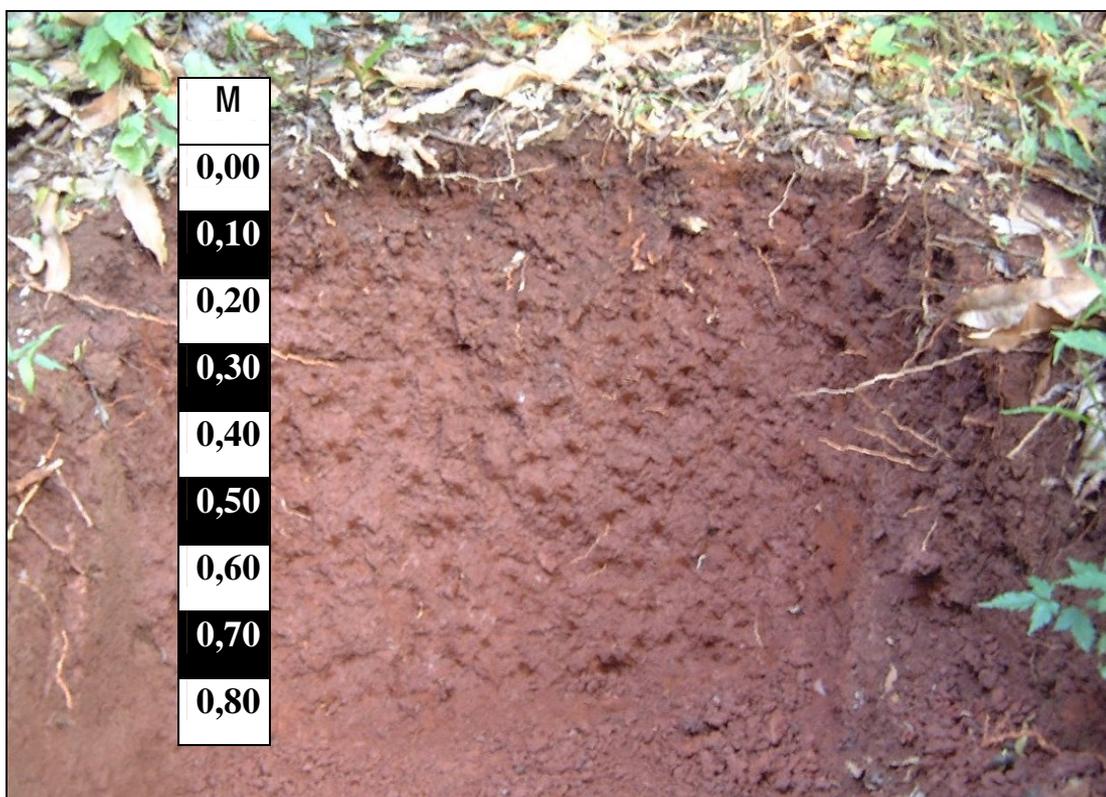


Figura 35. NITOSSOLO VERMELHO sob vegetação de mata nativa.

Quadro 15. propriedades físicas¹ e químicas² do NITOSSOLO VERMELHO.

Horizonte		Composição granulométrica (g kg ⁻¹)								Bases trocáveis (mmol _c dm ⁻³)		
Símbolo	Profundidade	Areia ³						Silte	Argila	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	k ⁺
	m	AMG	AG	AM	AF	AMF	AT					
A ₁	0 – 0,12	9,6	9,4	128,4	103,4	45,6	296	294	410	150	3	3
B ₁	0,12 – 0,36	8,4	8,8	86,0	87,8	44,6	236	174	590	58	1,6	1,6
B ₂	0,36 – 0,65	3,6	5,6	56,8	72,6	34,0	173	207	620	30	0,8	0,8
B ₃	0,65 – 0,95+	4,0	4,4	49,8	68,4	32,4	159	191	650	25	0,6	0,2

¹ Granulometria: agitação lenta (recíproco) por 14 horas, dispersante químico NaOH 1N, densímetro, Lab. Física do Solo, FCA/UNESP;

² Bases trocáveis: resina trocadora (Raij et al., 2001);

³ AMG = areia muito grossa (2-1 mm); AG = areia grossa (1-0,5 mm); AM = areia média (0,5 – 0,25 mm); AF = areia fina (0,25-0,10 mm); AMF = areia muito fina (0,10 –0,05 mm); AT = areia total (2-0,05 mm).