

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO AVALIADOS POR
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM E ENSAIOS DE ROTINA**

RICARDO NAKAMURA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Outubro – 2012

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO AVALIADOS POR
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM E ENSAIOS DE ROTINA**

RICARDO NAKAMURA

Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Outubro – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

N163a Nakamura, Ricardo, 1984-
Atributos físicos e mecânicos do solo avaliado por processamento digital de imagem e ensaios de rotina / Ricardo Nakamura. - Botucatu : [s.n.], 2012 x, 85 f. : il. (algumas color.), gráfs., tabs., fots.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012

Orientador: João Eduardo Guarnetti dos Santos
Co-orientadores: Reginaldo Barboza da Silva
Inclui bibliografia

1. Compressibilidade. 2. Estrutura do solo. 3. Física do solo. 4. Mecânica do solo. 5. Processamento de imagens - Técnicas digitais. 6. Ribeira de Iguape, Rio, Região (PR e SP) I. Santos, João Eduardo Guarnetti dos. II. Silva, Reginaldo Barboza da. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

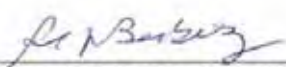
TÍTULO: "ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO AVALIADOS POR
PROCESSAMENTO DE IMAGEM E ENSAIOS DE ROTINA"

ALUNO: RICARDO NAKAMURA

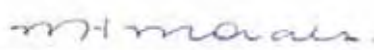
ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. REGINALDO BARBOZA DA SILVA

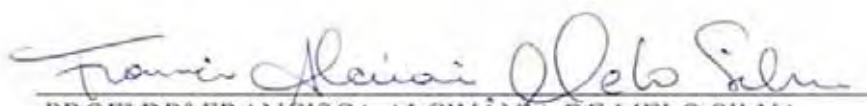
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. REGINALDO BARBOZA DA SILVA



PROF^a DR^a MARIA HELENA MORAES



PROF^a DR^a FRANCISCA ALCIVÂNIA DE MELO SILVA

Data da Realização: 05 de outubro de 2012.

Aos meus pais, Keiji Nakamura e Teresina Nakamura, pela educação e exemplo de vida,
À minha irmã e sobrinha por serem parte dessa família “perfeita”,
À minha namorada, Damina Uechi, pelos momentos de carinho e compreensão,
Aos meus amigos, pelos momentos de alegria.

Dedico este Trabalho

Vida

Já perdoei erros quase imperdoáveis,
tentei substituir pessoas insubstituíveis
e esquecer pessoas inesquecíveis.

Já fiz coisas por impulso,
já me decepcionei com pessoas
que eu nunca pensei que iriam me decepcionar,
mas também já decepcionei alguém.

Já abracei pra proteger,
já dei risada quando não podia,
fiz amigos eternos,
e amigos que eu nunca mais vi.

Amei e fui amado,
mas também já fui rejeitado,
fui amado e não ame.

Já gritei e pulei de tanta felicidade,
já vivi de amor e fiz juras eternas,
e quebrei a cara muitas vezes!

Já chorei ouvindo música e vendo fotos,
já liguei só para escutar uma voz,
me apaixonei por um sorriso,
já pensei que fosse morrer de tanta saudade
e tive medo de perder alguém especial (e acabei perdendo).

Mas vivi!
E ainda vivo!
Não passo pela vida.
E você também não deveria passar!

Viva!!

Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão,
perder com classe
e vencer com ousadia,
porque o mundo pertence a quem se atreve
e a vida é muito para ser insignificante.

Augusto Branco

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela compreensão, ajuda e carinho. Foram muitos dias difíceis e sem a presença deles eu não conseguiria cumprir mais essa etapa em minha vida.

Ao Professor Dr. Reginaldo Barboza da Silva, pela orientação e companheirismo nessa jornada.

Ao Professor Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos por aceitar me orientar nesse mestrado e pela preocupação.

Às Professoras Dr^a. Maria Helena Moraes e Francisca Alcivânia Melo Silva pelas excelentes contribuições na dissertação.

Ao Professor Dr. Miguel Cooper e ao seu orientado Dr. Raul Toma, pelo aceite e orientação no laboratório de Micromorfologia da USP.

À ESALQ/USP pelas análises de micromorfologia de solos.

À UNESP, por me acolher em mais um passo de minha vida.

À UNESP de Registro/SP, primeiramente pela formação e, também, por me deixar utilizar o laboratório de ciência do solo para a realização do experimento.

À UNESP de Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônomicas, por me acolher tão bem nesse mestrado e pelos ensinamentos concedidos.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos, pois sem ela não seria possível a realização desse mestrado.

Aos meus amigos de Registro/SP pelo companheirismo e carinho nos momentos de dificuldades e pelos momentos de felicidade.

À amiga, Marília Simão dos Santos, por me acolher em sua casa nos dias de curso na Unicamp.

À minha namorada Damiana Uechi, pela compreensão e carinho em momentos difíceis e por toda ajuda nessa caminhada.

À Camila Cassante, pela ajuda com os programas e equipamentos do laboratório.

À Evelyn Jensen pela companhia e ajuda nas coletas e análises de laboratório.

Aos amigos que fiz em Botucatu, pela parceria e momentos de alegria. Sem eles, o mestrado não seria o mesmo.

À secretaria de Pós-Graduação, pela ajuda com as documentações e prazos.

À Prof.^a Dr.^a Maria Helena Moraes pela ajuda com a matéria orgânica.

À minha Tia, Minaide Rodrigues, por me hospedar em sua casa.

E a todos os demais que, direta ou indiretamente, me auxiliaram para que essa pesquisa se tornasse realidade.

Muito Obrigado!!!

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	4
3 INTRODUÇÃO.....	6
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 Qualidade do solo	8
4.1.1 Indicadores de qualidade física do solo.....	10
4.2 Compressibilidade do Solo	12
4.3 Compactação e seus efeitos	15
4.4 Micromorfologia de Solos	17
4.5 Processamento digital de imagem.....	20
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
5.1 Caracterização da área de estudo	24
5.2 Definição das áreas e arranjo experimental	26
5.4 Atributos investigados	30
5.4.1 Atributos físico-hídricos.....	30
5.4.2 Atributos mecânicos.....	33
5.4.3 Condutividade Hidráulica (K)	36
5.4.4 Micromorfologia de Solos.....	38
5.5 Sistematização dos dados e Estatística	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
6.1 Atributos físicos.....	45
6.2 Atributos hídricos.....	56
6.3 Análise por processamento de imagens	57
7 CONCLUSÕES	69
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Caracterização física: médias de densidade de partículas, argila, silte, areia total, argila dispersa em água e índice de flocculação, matéria orgânica para duas classes de solo e dois manejos, no município de Registro, SP.	27
Tabela 2. Critérios para distinção entre grupos de formas de poros.....	43
Tabela 3. Valores médios da VTP calculada, em relação a cada solo/manejo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Médias seguidas por mesma letra nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5%.....	50
Tabela 4. Dados dos tipos de poros presentes em cada tratamento descrito.	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação de um solo descompactado (a) e um solo compactado. (Multiquip do Brasil, 2012).	14
Figura 2. Curva de compressão do solo, demonstrando a curva de compressão virgem e a curva de compressão secundária. Índice de compressão (m) e a pressão de preconsolidação, σ_p . (FIGUEREDO et.al., 2006).	14
Figura 3. Amostra de pixels da imagem, com a respectiva grade de valores digitais, variando entre 0 e 255 níveis de cinza.(Schowengerdt, 1997).	21
Figura 4. Localização do Vale do Ribeira.	25
Figura 5. Precipitação na região de Registro/SP (CBH-RB, 2012).	25
Figura 6. Imagens de satélite das áreas de amostragem, delimitando cada tratamento. Banana Cambissolo (A); Banana Argissolo (B); Mata Cambissolo (C) e Mata Argissolo (D).	28
Figura 7. Áreas experimentais. Cultivo de banana com cambissolo (CBN) (A); Cultivo de Banana com Argissolo (ABN) (B); Mata Nativa com Cambissolo (CMT) (C) e Mata nativa com Argissolo (AMT) (D).	28
Figura 8. Equipamentos utilizados e amostras no laboratório. Amostrador de Uhland (A); amostras prontas para serem moldadas (B) e após moldar um dos anéis (C).	29
Figura 9. Detalhe da amostragem. Utilização do amostrador de Uhland (A); detalhe do local amostrado (B) e amostra indeformada coletada (C).	30
Figura 10. Detalhe da unidade de sucção (A); anéis sendo saturados em bacias plásticas (B)	31
Figura 11. Penetrômetro de bancada da marca Marconi, modelo MA-933.	34
Figura 12. Consolidômetro automático com interação homem-máquina, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, desenvolvido por Silva et al.(2007b) (A); detalhe da montagem dos corpos de prova para a compressibilidade (B) e equipamento montado para a aplicação da tensão desejada (C).	35
Figura 13. Detalhe do software CA LINKER, desenvolvido por Silva e Masquetto (2009).	36
Figura 14. Observação dos métodos M1 e M3 proposto por Dias Júnior e Pierce (1995).	36

Figura 15. Esquema do equipamento utilizado no experimento, MiniDisk Infiltrômetro (DECAGON DEVICE, 2012) (A) e infiltrômetro de mini-disco montado em laboratório (B).	37
Figura 16. Detalhe da capela onde se realiza a impregnação das amostras (A); amostras sendo impregnadas (TOMA, 2008).	39
Figura 17. Gabarito para marcação da área fotografada e amostra em luz negra, pronta para ser marcada.	39
Figura 18. Detalhe do computador e da lupa utilizada para a realização das imagens.	40
Figura 19. Visual do programa VISILOG 5.4.	41
Figura 20. Algoritmo de morfologia matemática atuando na porosidade do solo.	42
Figura 21. Detalhe da imagem em luz negra, evidenciando o pigmento nas áreas mais claras (A); imagem binarizada (B).	43
Figura 22. Dados médios de DMG e DMP, em relação a cada manejo/solo, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	46
Figura 23. Dados médios de macroporos, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	47
Figura 24. Valores médios, em porcentagem de microporos, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	48
Figura 25. Valores médios, em porcentagem de porosidade calculada, obtidos a partir de índices da relação de massa e volume do ensaio uniaxial, em relação a cada manejo/solo, nas condições de consistência tenaz e plástica. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	51
Figura 26. Valores médios da D_s , em relação a cada manejo/solo, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas consistências plástica e tenaz. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	53
Figura 27. Valores médios de IC, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.	55

Figura 28. Valores médios de K, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.....	57
Figura 29. Dados médios de poros totais, obtidos através do processamento digital de imagens.	58
Figura 30. Valores médios da porcentagem de poros totais, obtidos através do cálculo de VTP.	59
Figura 31. Distribuição do número de poros em classes, para ABN, pressão de 25 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	61
Figura 32. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 25 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	61
Figura 33. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de σ_p saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	62
Figura 34. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de σ_p tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	62
Figura 35. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 1600 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	63
Figura 36. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 1600 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	63
Figura 37. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 25 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	64
Figura 38. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 25 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	64
Figura 39. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de σ_p saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	65
Figura 40. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de σ_p tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	65
Figura 41. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 1600 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	66
Figura 42. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 1600 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).	66

1 RESUMO

A falta de informações (qualitativa e quantitativa) detalhadas da microestrutura do solo, especificamente dos constituintes do solo (massa e volume) e sua associação com índices físicos e mecânicos relacionados, em função do seu uso ou manejo tem levado a inferências e conclusões que nem sempre podem representar a verdadeira história de tensão, uso e manejo do solo.

Uma alternativa que tem sido apresentada à ciência do solo e com resultados significativos, especialmente para as áreas de física e conservação do solo é o uso de técnicas de micromorfologia de solos aliada ao processamento de imagens. Estes estudos tem melhorado a caracterização desse problema, podendo facultar desta maneira, uma melhor interpretação e compreensão humana, não apenas dos fatores internos (características e propriedades) responsáveis pela compacidade do solo, mas também a relação com os fatores externos (manejo, tráfego agrícola, pressão de contato e distribuição de tensão no solo, uso/manejo). Estes, muitas vezes por limitação técnica e ou metodológica em suas determinações tem dificultado a compreensão e o estabelecimento de relações/inter-relações como comportamento da microestrutura do solo. Portanto, qualquer intervenção neste sentido significa estreitar os benefícios de duas importantes áreas (micromorfologia e a mecânica solo) que cada vez mais, provem resultados importantes para ciências do solo.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar comportamento físico e mecânico de corpos-de-prova de duas classes de solo submetidas a diferentes carregamentos (pressões de contato), conteúdos de água e uso/manejo do solo por meio de técnicas de micromorfologia aliadas ao processamento de imagens.

Os ensaios físicos, mecânicos e micromorfológicos foram realizados em amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo e de Cambissolos distróficos, ambos sob a condição de mata natural e cultivo de banana, localizados em áreas de preservação Permanente (APP) da Região do Vale do Ribeira, estado de São Paulo, coletados a uma profundidade de 0 – 10 cm. Amostras de cada classe de solo foram submetidas a dois conteúdos d'água (referente ao potencial matricial de 0,06 atm e próximo ao limite de contração) e três carregamentos dos quais dois foram 25 e 1600 kPa e o terceiro correspondia o valor da pressão de preconsolidação (σ_p), definido por um DIC em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2 \times 3$. Depois de aplicados os carregamentos, as amostras eram submetidas à caracterização dos demais atributos físicos (densidade, volume total de poros, macro e microporos, condutividade hidráulica e índice de cone). Cumpridos estes procedimentos as amostras foram encaminhadas para proceder à caracterização micromorfológica.

Os níveis de carregamentos aplicados aos corpos-de-prova provocaram alterações nos índices físicos e mecânicos do solo, sendo a intensidade destas alterações função da condição de consistência do solo, classe de solo e uso/manejo, considerados neste estudo. Os resultados obtidos no processamento digital de imagem corroboraram a alteração do comportamento estrutural do solo encontrados pelos métodos tradicionais da física e mecânica, empregados na avaliação dos índices físicos e mecânicos.

Os níveis de carregamentos aplicados aos corpos-de-prova provocaram alterações nos índices físicos e mecânicos do solo, sendo a intensidade destas alterações função da condição de consistência do solo, classe do solo e uso/manejo.

O processamento digital de imagens permitiu quantificar alterações na estrutura (macroporos, mesoporos e porosidade total) do Argissolo Vermelho-Amarelo, mostrando-se uma ferramenta sensível às variações do teor de água e dos carregamentos aplicados aos corpos-de-prova, confirmando, em parte, os resultados obtidos por avaliações e análises de rotina empregadas na física e mecânica do solo.

Os corpos-de-prova do Argissolo Vermelho-Amarelo, quando avaliados na condição "tenaz" e submetidos a carregamentos superiores a capacidade de suporte de carga do solo, definida pela pressão de préconsolidação (σ_p) superestimaram a quantidade de poros complexos, em decorrência das fissuras provocadas durante os ensaios de compressão uniaxial.

Palavras-chave: compactidade, compressibilidade, índices físicos, micromorfologia, Vale do Ribeira.

2 SUMMARY

PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL MECHANICS AND EVALUATED BY DIGITAL IMAGE PROCESSING AND ROUTINE TEST. Botucatu, 2012, 85 f. Dissertation (Master of Agronomy) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista

Author: RICARDO NAKAMURA

Advisor: PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

Co-advisor: PROF. DR. REGINALDO BARBOSA DA SILVA

The lack of information (qualitative and quantitative) of the detailed microstructure of the soil, particularly soil constituents (weight and volume) and its association with related mechanical and physical indexes, depending on its use or handling have led to inferences or conclusions and can always represent the true history of tension, use and soil management.

One alternative that has been submitted to soil science and with significant results, especially in the areas of physical and soil conservation is the use of soil micromorphology techniques combined with image processing. These studies have improved the characterization of this problem, and can thus provide a better interpretation and human understanding, not only of internal factors (characteristics and qualities) responsible for the compactness of the soil, but also the relationship with the external factors (management, agricultural traffic, contact pressure and stress distribution in soil, use/handling). These often limited by technical and methodological or in its determinations has hindered understanding and build relationships/interrelationships and behavior of soil microstructure. Therefore, any intervention in this narrow sense means the benefits of two major areas (micromorphology and soil mechanics) that increasingly prove important results for soil science.

This study aimed to evaluate the physical and mechanical behavior of sample undisturbed from two soil types under different loads (contact pressures), water contents and use / soil management techniques through micromorphology allied processing images.

The physico-mechanical and micromorphological samples were performed in Ultisol and dystrophic Cambisols, both under the condition of natural forest and banana cultivation, located in Permanent Preservation Areas (APP) of the Vale do Ribeira, state São Paulo, collected at a depth of 0-10 cm. Samples from each class were subjected to two soil water contents (for the matric potential of 0.06 atm and near the shrinkage limit) and three shipments of which two were 25 and 1600 kPa and the third corresponded to the amount of pressure preconsolidation (σ_p), defined by a factorial design $2 \times 2 \times 3$. After the applied loads, the samples were subjected to characterization of other physical attributes (density, total porosity, macro and micropores, hydraulic conductivity and cone index). Completed these procedures samples were sent to make the micromorphological characterization.

Levels of loads applied to the body-of-evidence led to changes in physical and mechanical index of soil, and the intensity of these changes due to the consistency condition of the soil, soil class and use/management, considered in this study. The results obtained in digital image processing confirmed the change in structural behavior of soil found by traditional methods of physics and mechanics, used to assess the physical and mechanical index.

Levels of loads applied to sample undisturbed caused changes in the physical index and mechanical soil, the intensity of these changes according to the consistency condition of soil, ground class and usage/management.

The digital image processing allowed quantifying changes in structure (macropores, mesopores and total porosity) of the Ultisol, being a tool sensitive to changes in water content and loads applied to the sample undisturbed, confirming in part, the results obtained by routine tests and evaluations used in physics and mechanics of the soil.

The sample undisturbed of Ultisol, when evaluated under the condition "tenacious" and subjected to loads greater than the load bearing capacity of the soil, defined by the preconsolidation pressure (σ_p) overestimated the amount of pore complex, result of cracks caused during the uniaxial compression tests.

Keywords: compactness, compressibility, physical index, micromorphology, Vale do Ribeira.

3 INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais suportes de produção agrícola, constituído de fatores químicos, físicos e biológicos submetidos à ação do clima, que interagem e tendem ao equilíbrio dinâmico. Todavia, a negligência com a utilização deste recurso tem provocado sua degradação estrutural. Em virtude da utilização dos solos, têm-se alterado os seus atributos físicos, hídricos, biológicos e mecânicos. O seu uso indevido, aliado a falta de tecnologias e manejo adequado, têm induzido à compactação e depauperação do pedoambiente agrícola.

O estudo da capacidade de suporte de carga do solo (CSCS), em especial a dos solos agrícolas, por meio de ensaios de compressibilidade tem se mostrado uma alternativa importante para produtores, técnicos e pesquisadores que buscam melhor compreender este processo, assim como, adequarem o uso e o manejo do solo às necessidades impostas pela agricultura moderna. Avanços tecnológicos em áreas como, a mecânica, dinâmica e a própria física do solo, têm melhorado as condições de análise, tornando-as cada vez mais precisas, elevando o grau de confiabilidade dos resultados.

Contudo, apesar de alguns avanços tecnológicos que têm permitido qualificar e quantificar as alterações dos atributos do solo, ainda é rotineira a falta de

informações (qualitativa e quantitativa) detalhadas da microestrutura do solo, especificamente dos seus constituintes (massa e volume) e a sua associação com índices físicos e mecânicos relacionados. Estas informações, quando existentes, especialmente em função do uso ou manejo têm levado a inferências e conclusões que nem sempre podem representar a verdadeira história de tensão, uso e manejo do solo.

Uma alternativa que tem sido apresentada à ciência do solo e com resultados significativos, especialmente para as áreas de física e conservação do solo é o uso de técnicas de processamento de imagens. Estes estudos tem melhorado a caracterização desse problema, podendo facultar desta maneira, uma melhor interpretação e compreensão humana, não apenas dos fatores internos (características e propriedades) responsáveis pela compacidade do solo, mas também a relação com os fatores externos (manejo, tráfego agrícola, pressão de contato e distribuição de tensão no solo, uso/manejo). Estes, muitas vezes por limitação técnica e/ou metodológica em suas determinações, têm dificultado a compreensão e o estabelecimento de relações/interrelações com o comportamento da microestrutura do solo. Portanto, qualquer intervenção neste sentido é estreitar os benefícios de duas importantes áreas (micromorfologia e a mecânica solo) que cada vez mais, provem resultados importantes para ciências do solo.

A micromorfologia de solos, técnica bastante difundida, tem permitido estudar quantitativamente as modificações em amostras deformadas de solo, visando ser uma ferramenta complementar às outras técnicas utilizadas em laboratório, melhorando a observação de características intrínsecas dos solos. Aliada ao processamento de imagens digitais há uma melhora dos estudos de componentes e estrutura do solo.

Considerando-se que as mudanças dos atributos físicos são, em grande parte, consequência de alterações na estrutura do solo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento físico e mecânico de corpos-de-prova de duas classes de solo, submetidas a diferentes carregamentos (pressões de contato), conteúdos de água e uso/manejo por meio de técnicas de micromorfologia aliadas ao processamento de imagens.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Qualidade do solo

Entende-se por qualidade do solo como a capacidade de um solo, dentro dos limites do ecossistema manejado ou natural, de manter o sustento para o desenvolvimento de plantas e animais, de aumentar e/ou manter a qualidade da água, ar e promover a saúde humana (DORAN e PARKIN, 1994; DORAN, 1997). Vezzani e Mielniczuk (2009) mencionam que a união de propriedades físicas, biológicas e químicas, faz com que o solo exerça seu papel de forma mais adequada. Para Larson e Pierce (1994), essa combinação fornece subsídios para a produção animal, para a regulação do fluxo de água no ambiente e para atuar como um filtro ambiental na atenuação e degradação de componentes danosos e perigosos. Pode-se dizer que os conceitos de qualidade do solo, sustentabilidade e resiliência estão diretamente ligados (LAL e MILLER, 1993), Doran e Parkin (1994) ressaltam que o manejo da terra pode ser considerado sustentável, se a qualidade dos recursos naturais, for mantida. Nenhum indicador individualmente conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos da qualidade do solo, pois deve haver relação entre todos seus atributos. A degradação dos componentes do

solo é causada por práticas não conservacionistas, diminuindo, assim, a qualidade do solo (NUNES, 2003), podendo tornar-se, muitas vezes, irreversível (AGUIAR, 2008).

Há três grupos de atributos que podem ser avaliados como indicadores de qualidade do solo. De acordo com Islan e Weil (2000), o primeiro grupo está relacionado com os atributos que representam alterações em pequenos espaços de tempo, os ditos efêmeros, que podem ser citados como: temperatura, pH, teores de nutrientes, conteúdo de água e respiração do solo; o segundo grupo é determinado por atributos intermediários, que são alterados com o manejo após alguns anos, como: matéria orgânica, resistência a penetração e permeabilidade do solo a água; o terceiro, e último grupo é determinado atributos definidos como permanentes, são atributos inerentes ao solo, que não sofrem alterações a curto prazo, que são destacados pelos componentes mineralógicos, textura, profundidade e podoclima.

Para as propriedades físicas, Tormena et. al (1998) destacam o efeito sobre os espaços porosos do solo, prejudicando o fornecimento de água e oxigênio, limitando o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, das plantas, afetando também a atividade de organismos do solo (CORTÉS-TARRÁ et al., 2003). A deterioração das qualidades físicas do solo promove condições desfavoráveis da estrutura do solo, com formação de agregados pouco instáveis, reduzida porosidade, elevada densidade (ISLAM e WEIL, 2000; NUNES, 2003), maior resistência à penetração de raízes (CARVALHO et al, 2004) e reduzida capacidade de retenção de água (TORMENA et al., 1998), restringindo o movimento da água e das trocas gasosas no perfil do solo.

Segundo Tótola e Chaer (2002), não é conhecida a qualidade “ideal” para um solo, tudo depende do tipo de solo e a cultura a ser estabelecida. Por isso, é necessária a determinação de referenciais que possam servir de base para a interpretação e comparação, os mesmos autores ressaltam que tem se sugerido adotar como critério de referência as condições prevalentes em solos que suportam uma vegetação nativa e que tenham sofrido o mínimo de distúrbios antropogênicos (ISLAM e WEIL, 2000).

4.1.1 Indicadores de qualidade física do solo

Um dos indicadores mais importantes para o crescimento das plantas, que influi diretamente nas condições de adensamento, compactação, infiltração da água e suscetibilidade do solo à erosão e encrostamento é a estrutura do solo (CAMPOS et al., 1995).

A avaliação da densidade, macro e microporos, estabilidade de agregados, resistência à penetração e infiltração de água no solo indicam o efeito do manejo, sendo de fácil mensuração, com respostas razoavelmente precisas e rápidas (DORAN, 1997).

A densidade do solo (D_s) relaciona-se à estrutura, sendo consequência da orientação e arranjo das partículas do solo, assim como, da quantidade e geometria dos espaços porosos. A textura também se relaciona com a densidade. Araújo et al. (2004) registraram valores de densidade dos solos arenosos como sendo os mais altos, em torno de 1,35 a 1,85 kg dm⁻³. Em solos argilosos Tormena et al. (1998) registrou valores na faixa de 0,95 a 1,25 kg dm⁻³.

Os solos arenosos apresentam maiores valores devido ao maior peso específico das partículas de quartzo que compõe a fração areia e também pelos baixos índices de matéria orgânicas, comuns nesses solos. Já em solos argilosos, os valores podem ser menores decorrendo da microagregação das partículas de argila, que aumenta a porosidade intra-agregados, diminuindo a densidade (KLEIN, 2005).

Uma característica afetada pela densidade do solo é a resistência mecânica do solo à penetração, que tenta representar a força que as raízes devem exercer para romper o solo. A resistência à penetração é de grande utilidade para a avaliação da qualidade física do solo, por permitir a identificação de valores potencialmente limitantes ao crescimento das raízes, Imhoffet e Tormena. (2000) vê, também, o estabelecimento de valores críticos de teor de água e densidade do solo.

Taylor et al. (1966) e Tormena et al. (1998) indicam que valores de 2MPa tem sido um impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular para a maioria das culturas, entretanto Beuther e Centurion (2003) indicam que há plantas que se desenvolvem bem com valores superiores à 3,0 MPa e, ainda, Foloni et al. (2003)

complementam destacando que há plantas que apresentam limitações com valores em torno de 1,4 MPa.

Outro indicador muito afetado é a porosidade do solo que é reflexo da estrutura e textura, sendo que os poros são determinados pelo arranjo e geometria das partículas. O estudo dessa propriedade é realizado baseando-se no diâmetro dos poros, diferenciando macro e microporos, associando ao ambiente onde ocorrerão os processos de aeração, drenagem e retenção de água. O volume total de poros é menor em solos arenosos, porém estes apresentam espaços de maior diâmetro (macroporos). Em solos argilosos, há um aumento da microporosidade devido à formação de microagregados pelas partículas de argila (KLEIN, 2005).

A quantidade de macroporos está diretamente ligada ao crescimento das raízes e absorção de água e nutrientes pelas plantas. Uma redução no percentual de macroporos induz ao crescimento lateral das raízes, diminuindo também seu diâmetro, a fim de penetrar em poros menores. Beutler e Centurion (2003) destacam que em solos excessivamente porosos pode haver um menor contato solo/raiz, reduzindo a absorção de água e nutrientes pela mesma, provocando um menor desenvolvimento.

A geometria porosa do solo tem relação direta com a condutividade hidráulica, que depende, ainda, da distribuição e forma das partículas e superfície específica (LIBARDI, 2005). Em solos arenosos, apesar de apresentarem menos porosidade total, a condutividade hidráulica é maior que em solos argilosos, entretanto há citações que indiquem a relação inversa (JARVIS e MESSING, 1995). Carvalho et al. (2004) afirmam que a interação entre textura e estrutura do solo é que vai determinar o comportamento da condutividade hidráulica.

Em solos saturados, quando todos os poros estão totalmente preenchidos por água, a condutividade hidráulica é máxima, decrescendo à medida que o solo perde umidade (LIBARDI, 2005).

A estabilidade de agregados igualmente às outras características inerentes do solo, varia com o sistema de manejo. O intenso revolvimento provoca quebra dos agregados do solo, podendo diminuir drasticamente a estabilidade de agregados. O rompimento dos agregados faz com que a matéria orgânica que estava em seu interior fique desprotegida, acelerando o processo de decomposição, diminuindo, assim, ainda mais a

resistência dos agregados. Assim a formação e estabilidade de macroagregados são observados em solos com maior teor de matéria orgânica, onde esta age como um agente cimentante, formando ligações de cátions polivalentes de seus polímeros com a superfície inorgânica do solo (TISDALL e OADES, 1982).

Podemos ressaltar, por conseguinte, a utilização de atributos mecânicos do solo que avaliem a compactação. A pressão de preconsolidação citada por Dias Júnior et al. (2002), por exemplo, é necessária em estudos dessa natureza.

4.2 Compressibilidade do Solo

A partir de 1995, principalmente no Brasil, estudos sobre compactação, a forma mais degenerativa da estrutura do solo, foram desenvolvidos e publicados por muitos autores (KONDO e DIAS JÚNIOR, 1999; MIRANDA et al., 2003, DIAS JÚNIOR et al., 2005; SILVA et al., 2007; SILVA, 2002) passaram a considerar a pressão de preconsolidação, separando as deformações recuperáveis e não recuperáveis, delimitando o ponto onde a estrutura do solo possa sofrer degradação estrutural irreversível (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996). Levando-se em consideração que a degradação do solo ocorre em qualquer condição de umidade e a pressão de preconsolidação varia conforme a umidade (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1995), ficou evidente que o estudo do monitoramento da degradação da estrutura do solo precisava de propriedades que considerassem estas deformações.

A compressibilidade vem sendo usada para estimar a suscetibilidade à compactação em diferentes sistemas de manejo (ARAÚJO JUNIOR et al., 2008; AJAYI et al., 2009). Pode-se definir a compressibilidade do solo como sendo a facilidade do solo não saturado decrescer de volume quando sujeito a pressões (GUPTA e ALLMARAS, 1987) de fatores internos e externos (LEBERT e HORN, 1991).

Os fatores externos são caracterizados pela intensidade e frequência de carga aplicada (HORN, 1988; LEBERT e HORN, 1991; DIAS JÚNIOR et al., 2008). Já os fatores internos são influenciados pela história de tensão (DIAS JÚNIOR, 1994), umidade do solo (DIAS JÚNIOR, 1994; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008), textura do solo,

estrutura do solo (HORN, 1988), densidade inicial do solo e mineralogia do solo (AJAYI et al., 2009).

De acordo com Dias Júnior et al. (2002), solos que nunca sofreram uma pressão prévia podem ter uma curva de compressão linear, porém, solos que já experimentaram pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, sofrendo pressões atuando sobre esse solo, determina em duas regiões distintas na curva de compressão: curva de compressão secundária e curva de compressão virgem (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008; AJAYI et al., 2009). A curva de compressão secundária determina os níveis de pressões experimentados pelo solo no passado, zona onde o solo deve ser cultivado ou trafegado sem sofrer degradação estrutural adicional, e a curva de compressão virgem representa as primeiras pressões aplicadas no solo. Segundo Dias Júnior e Pierce (1996), isso quer dizer que a degradação estrutural adicional só ocorre quando as deformações ocorrem na curva de compressão virgem, onde as deformações são plásticas e não recuperáveis.

Na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a capacidade de suporte do solo deve ser evitada (LEBERT e HORN, 1991), para que não ocorra degradação adicional de sua estrutura. Para isso, Dias Júnior (1994) desenvolveu um modelo de compressibilidade que define a máxima pressão que o solo suporta em determinada situação, sem causar compactação adicional.

Compactação refere-se à compressão do solo não saturado, aumentando sua densidade devido ao rearranjo de seus agregados e partículas, perdendo porosidade, reduzindo seu volume (GUPTA et al., 1989), resultado da expulsão de ar dos poros, como demonstra a Figura 1. Em solos saturados, quando há a expulsão de água dos poros, o processo passa a se chamar adensamento (DIAS JÚNIOR, 2000). A compactação demonstra seus sintomas tanto no solo como nas plantas.

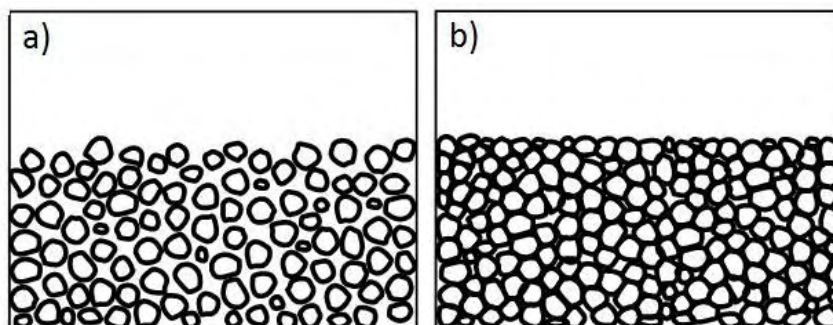


Figura 1. Representação de um solo descompactado (a) e um solo compactado. (Multiquip do Brasil, 2012).

Para a avaliação do estado do solo são utilizados ensaios de compressão uniaxial, que consistem na aplicação de sucessivas cargas, continuamente, com pressões crescentes pré-estabelecidas (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Silva et al., 2007) em uma amostra de solo indeformada, parcialmente saturada, permitindo obter a curva de compressão do solo, onde tem em suas abscissas os valores das pressões aplicadas em escala logarítmica e nas ordenadas a densidade do solo em escala natural (Figura 2). Sendo que os métodos mais utilizados são os de Casagrande (1936) e Dias Júnior e Pierce (1995).

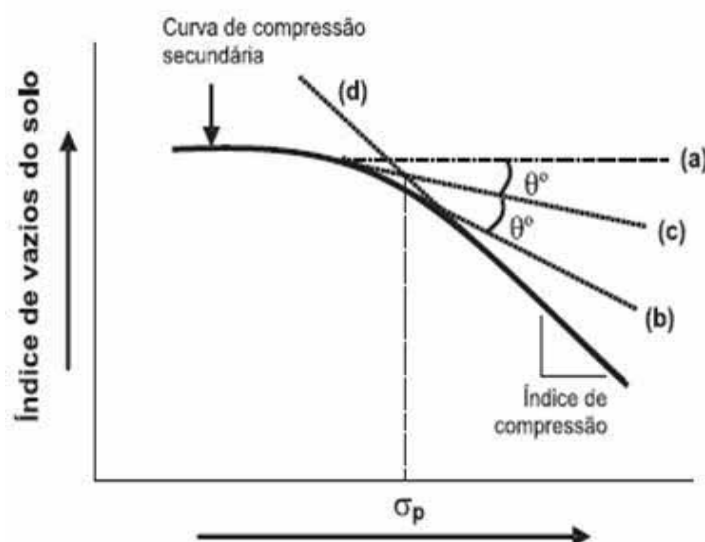


Figura 2. Curva de compressão do solo, demonstrando a curva de compressão virgem e a curva de compressão secundária. Índice de compressão (m) e a pressão de preconsolidação, σ_p . (FIGUEREDO et.al., 2006).

4.3 Compactação e seus efeitos

A compactação mecânica causa efeitos negativos na estruturação do solo, ocasionando na destruição da estrutura (SOARES et. al., 2005). O aumento da densidade do solo provém da compactação por compressão, diminuindo o volume de solo, ocasionando um rearranjo mais denso das partículas (CURI, 1993).

Beulter e Centurion, (2004), comentam que a compactação do solo determina, de certa forma, as relações entre ar, água e temperatura, influenciando a germinação, brotação, emergência das plantas, o crescimento radicular, o crescimento da parte aérea (FREDDI et al., 2007) e, praticamente, todas as fases de desenvolvimento das plantas (CAMARGO E ALLEONI, 1997).

Dependendo da profundidade e do uso, solos de mesma classe textural podem apresentar diferentes densidades do solo (BORGES et. al., 1999). A densidade, na superfície geralmente é menor, pois apresenta uma maior concentração de material orgânico, que age como agente agregador, aumentando os espaços porosos (MACHADO; FAVERETTO, 2006). Devido a pressão exercida pelas camadas superiores sobre as adjacentes, a densidade aumenta ao longo do perfil, causando compactação (KIHIL, 1979).

Muitos autores, como Silva et al., (2003), Streck et al., (2004) e Secco et al. (2009), demonstram a real alteração na densidade do solo, utilizando a compactação adicional imposta pelo tráfego de máquinas, onde concluíram que o aumento da intensidade de compactação do solo causa um aumento da densidade do solo.

Borges et al., (1999), estudaram a densidade com auxílio de uma prensa hidráulica, aplicando cargas crescentes, obtendo valores crescentes de densidade do solo, fato evidenciado por Stone et al., (2002) e Foloni et al., (2003).

Muitos estudos de compactação evidenciam a porosidade do solo, pois o solo é um material poroso e, por compressão, a mesma massa de material sólido pode ocupar um volume menor, afetando a estrutura. Isto define a qualidade, tamanho, formato e a orientação dos espaços vazios e, conseqüentemente, a relação entre os macro e microporos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

De acordo com Bertol et al., (2004), os volumes de macro, micros e porosidade total são influenciados pelo manejo do solo, em decorrência das alterações ocorridas na densidade. No processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos, em muitos casos, por poros menores (BOONE e VEEN, 1994).

Dias Júnior, (1996) e Hillel, (1982), citam que em solos compactados ocorre uma redução do volume de poros totais e de macroporos, e o de microporosidade permanece praticamente inalterado. Silva e Kay, (1996) indicam que a microporosidade do solo é influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e pouco influenciada pela compactação do solo, sendo um dos atributos mais difíceis de serem alterados (PELÁ, 2005).

Silva et al. (2005), comparando três sistemas de cultivo de cana-de-açúcar e um sob mata nativa, obteve menores valores de porosidade total e de macroporos e aumento dos microporos. Freddi et al., (2007), observaram uma redução de 71,43% na macroporosidade e aumento de 10% na microporosidade em um estudo parecido.

Como o fator mais afetado são os macroporos, onde ocorre a movimentação rápida e não limitada da água, conseqüentemente, a infiltração, a permeabilidade e a drenagem dos solos são prejudicadas (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

Em solos compactados a temperatura diminui e, conseqüentemente, a viscosidade da água aumenta, ocasionando a diminuição da condutividade hidráulica do solo (BRANDÃO, 2006).

A compactação, ao mesmo tempo, causa redução da macroporosidade e porosidade total e aumento da microporosidade, densidade e resistência à penetração (TORRES et al., 1998).

Em solos de mata nativa, a resistência à penetração do solo tende a ser menor, quando comparada àqueles do mesmo tipo de solo cultivado (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Silva et al., (2000) comenta que com o cultivo intensivo, os valores de resistência a penetração podem causar limitações ao crescimento das plantas, dependendo da cultura as limitações podem ser mais ou menos severas. Taylor et al., (1966) e Silva et al., (2002) observam que valores de 2,0 Mpa de resistência a penetração do solo, tem sido associado a condições impeditivas para o crescimento de raízes e da parte aérea das plantas.

Para um bom desenvolvimento radicular, são variáveis, em relação os limites de resistência à penetração, pois depende muito da cultura utilizada (SILVA et al., 2000).

A consequência da compactação do solo, é observada na produtividade, como Beultler et al., (2004), Medeiros et al., (2005) e Secco et al. (2009) observaram um decréscimo da produção em algumas culturas. Outro efeito preocupante é relacionado à erosão dos solos, pois a compactação afeta diretamente a densidade, porosidade, infiltração e drenagem de água, favorecendo o escoamento superficial da água, facilitando a erosão hídrica (MACHADO e FAVARETTO, 2006).

Schaefer et al. (2001) verificaram que no preparo de solo com grade pesada e arado de disco e somente grade pesada, houve formação de poros planares próximos à superfície do solo, concentrados nos primeiros centímetros. Ainda de acordo com os autores, a existência de poros fissurais indica adensamento do solo, fenômeno este que está associado ao encrostamento ou selamento superficial.

4.4 Micromorfologia de Solos

O monitoramento da qualidade do solo pode ser realizado empregando-se a micromorfologia, que é uma técnica de estudo de amostras não deformadas ou não de solos e rochas que permite, com auxílio de técnicas microscópicas, identificar diversos constituintes elementares. É uma técnica muito útil no estudo de gênese do solo e na avaliação e no monitoramento de diversas práticas agrícolas (SOUZA et al., 2006). Apesar de ser uma técnica de laboratório, não é possível separá-la do estudo prévio em campo, sendo uma técnica complementar, assim como análises físicas, mineralógica e química. É uma ferramenta que permite observar os componentes estruturais do solo na sua forma natural, possibilitando melhor visualização do comportamento da estrutura e do espaço poroso do solo, em área de processo de degradação.

Essa técnica compreende o estudo e observação de lâminas delgadas em estudo pedológicos, técnica empregada pioneiramente por Kubiena e posteriormente adotada por Brewer, muito difundida na década de 70 (CASTRO, 2002). Desde a divulgação da técnica, vários trabalhos começaram a impulsioná-la, dentre os

autores Castro (2002) e Resende et al. (2002) destacam: Bocquier, Boulet, Fedoroff, Leprum, Fitzpatrick, Bullock e Stoops.

O estudo em escala micrométrica, que objetiva a observação das microorganizações pedológicas, ou microestruturas. Contempla o estudo detalhado dos constituintes e agregados dos horizontes do solo e de suas relações, se grau de preservação, adições ou perdas ocorridas durante o intemperismo e pedogênese. Podem ser descritos arranjos de constituintes do solo e identifica os processos responsáveis pela sua formação e transformação, apresentando ainda, algumas de suas particularidades e feições. Essa ferramenta permite identificar componentes estruturais e elementares do solo na sua forma natural, possibilitando uma melhor visualização de comportamento da estrutura e do espaço poroso do solo, em áreas sob processos de degradação (CASTRO, 2003).

Resende et al. (2002), comenta que uma das vantagens da técnica está relacionada ao fato de se trabalhar com amostras de solos em sua estrutura natural (indeformada), pois possibilita a observação das características intrínsecas em um determinado tipo de solo e/ou perfil.

A utilização da micromorfologia deve ser auxiliada por observações de campo e outras técnicas laboratoriais de análise pedológica, caracterizando as propriedades morfológicas dos solos e a ação de diferentes processos de formação e alterações físicas (BULLOCK, 1986). Para Wilding e Flach (1985) e Pérez (1999) a micropedologia é ferramenta essencial de investigação, complementando e dando suporte a métodos clássicos.

Com o desenvolvimento de métodos de morfologia matemática e da informática, o estudo micromorfológico da estrutura e da porosidade ganhou dimensões quantitativas. Pode-se obter imagens em 2-D das seções amostradas, quantificando sua estrutura. O estudo da micromorfologia aliada ao processamento digital de imagens permite o estudo quantitativo de modificações estruturais em amostras indeformadas, depois do preparo de lâminas (VIANA et al., 2004; PIRES, 2006) obtendo resultados mais precisos e com maior rapidez (CARVALHO JUNIOR et al., 2002).

Um dos primeiros trabalhos a utilizar a análise de imagens foi o de Ringrose-Voase e Bullock (1984), descrevendo um sistema chamado ANOPOR, o qual alocava planos individuais vistos em segunda dimensão como resultado de espaços porosos

selecionados em imagens de classe de formas de poros. Porém, o sistema não podia ser utilizado quando os espaços porosos estavam altamente associados a imagem 2-D, pois não contavam os espaços porosos que existiam em discretos planos seccionados. Por isso, desenvolveu-se o ANOSOL (RINGROSE-VOASE, 1990), que permitia a quantificação de dados obtidos por qualquer imagem de estrutura do solo.

Para Bullock e Thomasson (1979), a macroporosidade é um importante indicador do espaço disponível para a elongação das raízes, circulação de água e na capacidade de campo do solo. Ringrose-Voase (1996), destaca que o conhecimento detalhado da geometria dos espaços porosos, pode ser útil para o entendimento de como as raízes exploram o solo.

De acordo com Cooper e Vidal-Torrado (2005), a análise de poros pela análise de imagens em micromorfologia, classifica três tipos de poros: poros arredondados, que compreendem os canais e as cavidades isoladas, poros alongados, que representam as fissuras e poros complexos, que são os poros de empacotamento.

O estudo de blocos de Latossolo Vermelho sob semeadura direta, preparo convencional e mata nativa, foi estudado por Encide (2005), mostrando que a área de mata apresentou uma maior porcentagem de macroporos, 17,74% e nos preparos convencional e semeadura direta, 10,10% e 7,14% respectivamente.

Soares et al. (2005), afirmam que o aumento da diversidade de poros está diretamente relacionado com o processo de degradação do solo. Soares et al. (2005), avaliaram um manejo sob sistema tradicional. As análises identificaram estruturas modificadas em subsuperfície, modificação na geometria de poros, surgindo poros planares e estruturas em bloco. Nas partes mais afetadas, foram identificadas alterações na quantidade de poros, aparecendo fissuras degradadas.

Avaliando a relação entre atributos micromorfológicos e físicos de um Latossolo Vermelho eutroférico, sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza et al. (2006), verificaram baixos valores de macroporos, porosidade total, principalmente nos horizontes AB, concordando com os resultados obtidos por meio da análise de imagens, onde observou menor porosidade total e maior distribuição de poros arredondados nesse horizonte, resultados que confirmam a ocorrência de compactação do solo pelas imagens.

Gomes (2008), utilizou a análise de imagens para estudar a porosidade de um Latossolo Vermelho de textura argilosa, sob pastagem, mata nativa, cultivo convencional de batata irrigada via pivô central e cultivo convencional de batata irrigada por canhão. Nesse estudo houve uma predominância de poros do tipo arredondado, com menores proporções de poros alongados.

Lima et al. (2005) e Pagliai (1897), mencionaram que poros fissurais são indicativos de processo de estresse físico do solo, sendo que, a compactação superficial do solo, dá origem à fissuras ou poros planares, que reduzem a taxa de infiltração. A presença de poros arredondados é associada a menor condução de água ao longo do perfil, devido a baixa conectividade dos poros, já os poros complexos agem de forma inversa no solo (COOPER, 1999). Mermut (1992), destaca que fissuras apresentando formas alongadas, curvas e acomodadas, caracterizam processos de umedecimento e secagem do solo.

4.5 Processamento digital de imagem

O processamento de imagens é a manipulação e interpretação de imagens digitais por meio de um computador. O enfoque principal é realizar melhorias no aspecto visual de algumas estruturas contidas nas imagens para a interpretação humana e fornecer parâmetros para que o computador, automaticamente, faça as análises, extraindo informações da cena (JORGE e CRESTANA, 2007).

Dias (2008) menciona a importância do processamento digital de imagem, que está em crescente expansão, pois há uma variedade imensa de aplicações. O principal motivo é a facilidade que a técnica dá para a interpretação humana da cena.

Uma imagem em cores padrão é representada por uma função do tipo $C(x,y,t,A)$, em que C representa a distribuição espacial de cor, nas coordenadas espaciais x e y , ao tempo t e comprimento de onda A . Já uma imagem monocromática é representada pela função $C(x,y)$, pois A deve ser constante e o tempo t desconsiderado. Nesse caso, x e y representam coordenadas espaciais do ponto e C a intensidade ou brilho,

ou ainda, o nível de cinza para àquele ponto (GONZALEZ e WINTS, 1987; CRUVINEL, 1996).

Cruvinelet et. al., 1996 define imagem como sendo o resultado de um estímulo luminoso captado pelo olho humano em que cada ponto de uma cena está associado a um informação de cor. Cada “célula” ou *pixel* (*Picture element*) de uma grade possui um valor digital (DN – *Digital Number*) (Figura 3), representando a intensidade média de energia eletromagnética refletida ou emitida pelos diferentes alvos na superfície imageada, essa intensidade é captada pelos sensores e convertida para uma escala com 256 níveis de cinza (0-255) (GONZALES e WOODS, 2007), onde “0” é a cor preta (menor brilho) e “255” é a cor branca (maior brilho) (Ferreira et al., 2001) demonstrada na Figura 3.

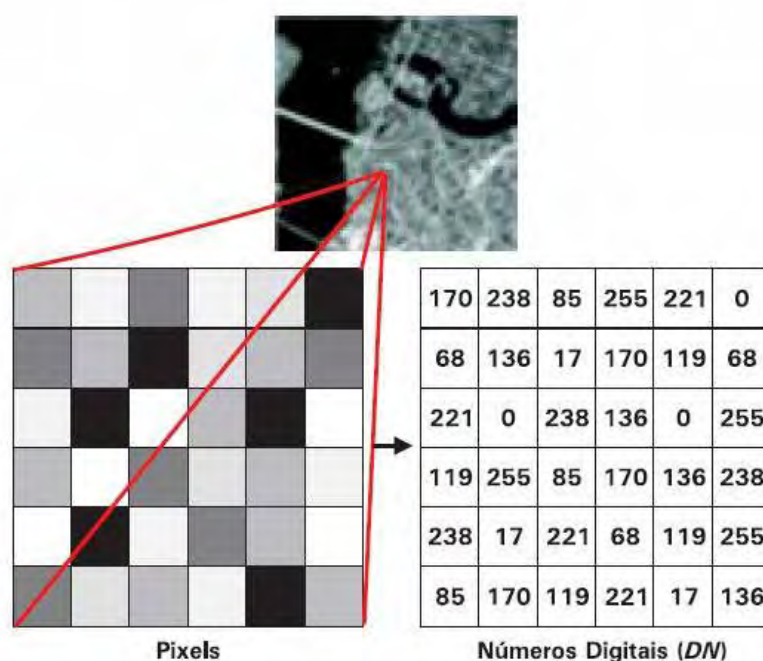


Figura 3. Amostra de pixels da imagem, com a respectiva grade de valores digitais, variando entre 0 e 255 níveis de cinza.(Schowengerdt, 1997).

A resolução de uma imagem é definida como uma matriz de *pixels* (i,j), formando seu arranjo espacial. Para uma resolução de 1024 pls x 1024 pls (vertical x horizontal) forma-se uma imagem de 1.048.576 pls de resolução espacial, também chamado de definição (GONZALES e WINTS, 1987).

Para Jorge e Crestana (2007), o processamento de imagens segue etapas distintas:

- Aquisição da imagem: Uma das principais etapas do processamento. É a etapa em que se converte a informação analógica em digital.
- Pré-processamento: Após a imagem ser armazenada, pode-se realizar algumas técnicas de pré-processamento, visando a melhoria de qualidade. Técnicas como: melhoramento de contraste, remoção de ruídos, entre outras.
- Segmentação: Segundo Nevatia (1986), é a operação de separar os componentes de uma imagem em subconjuntos que correspondem a objetos e regiões, e a classificação tem por objetivo classificar cada objeto ou região em diferentes categorias. Várias técnicas podem ser utilizadas na segmentação, como por exemplo, a limiarização, detecção de bordas e extração de regiões.
De acordo com Jain (1989), os processos de classificação e segmentação são fortemente relacionados.
- Análise: Vários são os softwares que fazem a análise das imagens, deixando, assim, a critério de cada utilização.

Tomando os conceitos de processamento de imagens podemos afirmar que essas técnicas aliadas a micromorfologia de solos potencializa o estudo de estruturas e componentes dos solos. O auxílio das técnicas de processamento de imagens digitais, a micromorfologia é capaz de fornecer resultados de porosidade do solo e a permeabilidade com precisão, além da visualização das alterações estruturais causadas pela compactação e adensamento (CASTRO et al., 2003).

Na agricultura, vários trabalhos foram realizados com a utilização do processamento digital de imagens, onde podemos citar estudo com atributos físicos e hídricos (SOUZA et al., 2006), avaliação de plântulas de milho (TEIXEIRA et al., 2006), porosidade em cultivo de Batata (*Solanumtuberosum* L.) (GOMES, 2008), atributos do solo sob diferentes manejos (GONÇALVES, 2011), identificação da Sigatoka Negra em bananais (SILVA, 2008), identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho (SENA JÚNIOR et al., 2001), severidade de Mancha Preta em frutos de citros (SPÓSITO, 2004), entre outros.

A utilização da análise de imagem em estudos qualitativos e quantitativos da estrutura do solo está se tornando uma constante, dado o maior acesso a equipamentos e programas e a crescente demanda de pesquisadores na área. Em diversos locais do mundo, a análise de imagem vem sendo desenvolvida e aperfeiçoada, para um desenvolvimento de técnicas mais eficientes para a quantificação da estrutura, espaços porosos, distribuição de poros, caracterização da irregularidade, orientação, forma e tamanho dos poros, pelo uso de lâminas delgadas e/ou blocos polidos (PROTZ et al., 1987; DEEKS et al., 1999; COOPER, 1999).

Um dos primeiros trabalho realizado no Brasil, foi o de CURMI et al. (1994), que estudou a degradação da estrutura de um Latossolo Roxo, submetido a cultivo, em Guaira/SP. Os autores observaram que os poros intra-agregados não foram afetados pelo processo de compactação, já os inter-agregados tiveram o seu tamanho e formato reduzido com perda de 33% do volume total e os poros provenientes de atividade biológica, tipo canais, desapareceram quando submetidos a processos de compactação.

Olszevskiet al. (2004), salientam que a técnica de processamento de imagens digitais se mostra sensível à detecção de mudanças na morfologia dos agregados do solo, os autores, ainda, estudaram essa técnica em cinco tipos de preparo de solo, sendo: plantio direto ,escarificador ,grade aradora , arado de discos e arado de aiveca. Comprovou-se que a utilização dos preparos por 3 anos não fazem diferenças significativas em um Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Pires et al. (2009) utilizaram a análise de imagens na avaliação de possíveis modificações na distribuição do tamanho, número e formato dos poros de amostras de solos depois de submetidas a sequências de ciclos de umedecimento e secamento. Os autores observaram mudanças significativas nos poros irregulares grandes no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho, ambos distóficos, e nos poros arredondados no Nitossolo Vermelho eutrófico.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na região do Vale do Ribeira, município de Registro, que tem a latitude 24°26' Sul e longitude 47°49' Oeste e altitude em torno de 25 m. O clima da região, de acordo com Köppen, é o Af, tropical úmido, com transição para o Cfa, sem estação seca definida, com temperatura média anual de 21°C e precipitação pluvial média de 1700 mm (Figura 5.). O Vale do Ribeira está localizado a sudeste do Estado de São Paulo, tendo parte de suas terras no Estado do Paraná (Figura 4). Tem a extensão de 260 km e 140 km de costa para o Oceano Atlântico. Abrange 32 municípios e abriga mais de 2,1 milhões de hectares de florestas. A área total é de 2.830.666 hectares, sendo que desse total 1.119.113 hectares estão situados no Estado do Paraná e o restante, 1.711.533 hectares no Estado de São Paulo.

Considerada a região mais pobre do Estado de São Paulo, apresentando alto índice de desemprego, alta taxa de mortalidade infantil e a mais baixa renda per capita do Estado (ROMÃO, 2006), segundo Silva Matos e Bovi (2002) abriga 40% do restante de Mata Atlântica do Estado de São Paulo, sendo que no Brasil só há pouco mais de 7% dessa formação florestal (RESERVA DA BIOSFERA, 1999). Denominada em 1999, pela Organização das Nações Unidas para

Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) como patrimônio natural, socioambiental e humanidade.

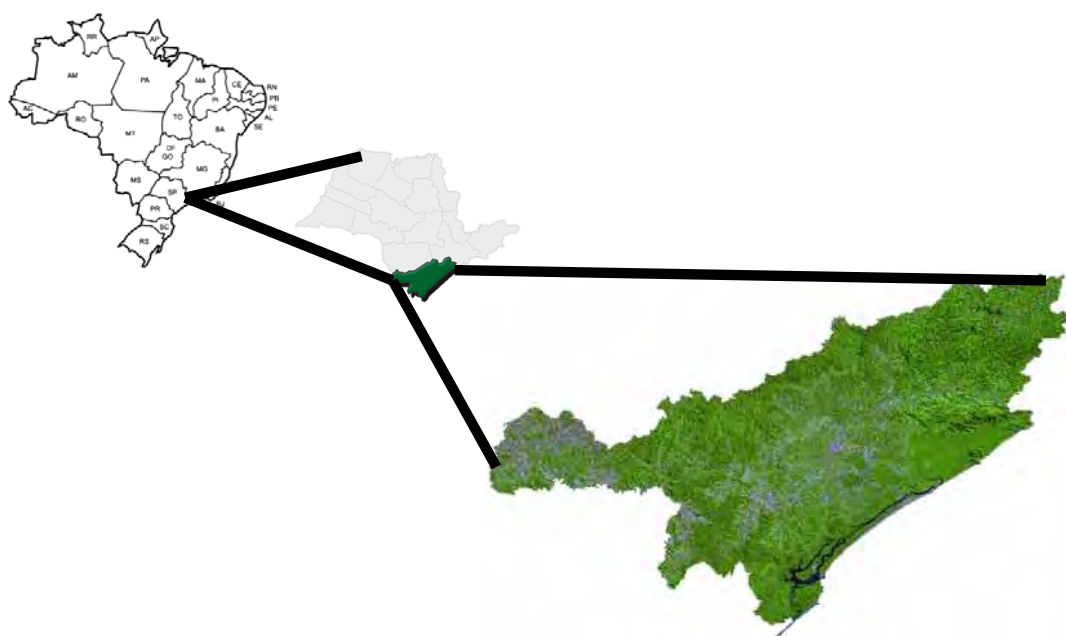


Figura 4. Localização do Vale do Ribeira.

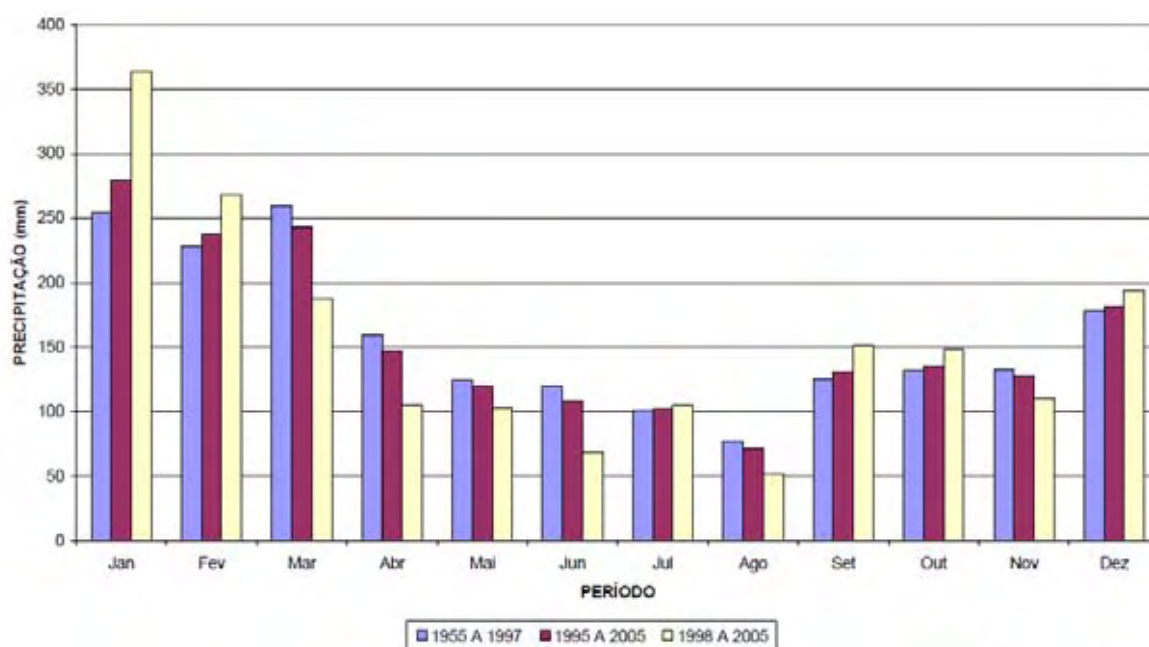


Figura 5. Precipitação na região de Registro/SP (CBH-RB, 2012).

5.2 Definição das áreas e arranjo experimental

Definiram-se quatro áreas experimentais, objetivando obter duas classes de solo, ambas com dois tipos de uso/manejo, utilizando-se de imagens fotográficas aéreas e de satélite, mapas de solos e o índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI (BENDINE e SILVA, 2009). As áreas escolhidas (Figura 6), portanto, contemplam os seguintes fatores:

a) Duas Classes de solo: Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo distrófico, de acordo com EMBRAPA (2006), cuja caracterização de alguns atributos físicos é apresentada na Tabela 1.

b) Dois usos/manejo: Estrato de mata nativa e cultivo de banana.

c) Dois teores de água: um referente ao potencial matricial de 0,06 atm e outro próximo ao limite de contração.

d) Três carregamentos (pressão de contato): 25 e 1600 kPa e o terceiro correspondia o valor da pressão de preconsolidação (σ_p).

Assim, o arranjo experimental constitui de um DIC em esquema fatorial do tipo $2 \times 2 \times 2 \times 3$, isto é, duas classes de solo, dois tipos de uso/manejo, dois teores de água e três carregamentos (pressão de contato) constituindo 24 tratamentos. Considerando três repetições, o estudo totalizou 96 unidades experimentais submetidas aos ensaios físicos, mecânicos, sendo que dessas 24 unidades experimentais foram conduzidas para a realização da micromorfologia.

A seguir, nas Figuras 6 e 7 é apresentada a localização das quatro áreas experimentais:

área sob cultivo de banana em Cambissolo (CBN) – Latitude $24^{\circ}26'58.46''$ Sul e Longitude $47^{\circ}50'11.90''$ Oeste;

área de mata em Cambissolo (CMT) – Latitude $24^{\circ}26'34.06''$ Sul e Longitude $47^{\circ}49'36.30''$ Oeste;

área sob cultivo de banana Argissolo (ABN) – Latitude $24^{\circ}26'03.39''$ Sul e Longitude $47^{\circ}43'56.18''$ Oeste;

área de Mata Argissolo (AMT) – Latitude 24°26'03.39" Sul e Longitude 47°51'50.34" Oeste;

Na Tabela 1 está apresentada a caracterização de alguns atributos físicos e químicos dos solos estudados.

Tabela 1. Caracterização física: médias de densidade de partículas, argila, silte, areia total, argila dispersa em água e índice de floculação, matéria orgânica para duas classes de solo e dois manejos, no município de Registro, SP.

Variáveis	Usos/Solos			
	AMT	ABN	CMT	CBN
Dp (g dm ⁻³)	2,48 a	2,42 b	2,39 b	2,43 b
A (g kg ⁻¹)	472	333	330	393
S (g kg ⁻¹)	330	448	122	30
AT (g kg ⁻¹)	197	219	548	577
ADA (g kg ⁻¹)	52 a	22 b	40 b	52 a
IF (%)	89,51 b	94,95 a	93,17 a	88,08 b
MO (g dm ⁻³)	15	36	29	24

AMT: Argissolo Mata; ABN: Argissolo Banana; CMT: Cambissolo Mata; CBN: Cambissolo Banana; Dp: Densidade de Partícula; A: Argila; S: Silte; AT: Areia Total; ADA: Argila Dispersa em Água; IF: Índice de Floculação, MO, Matéria Orgânica. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

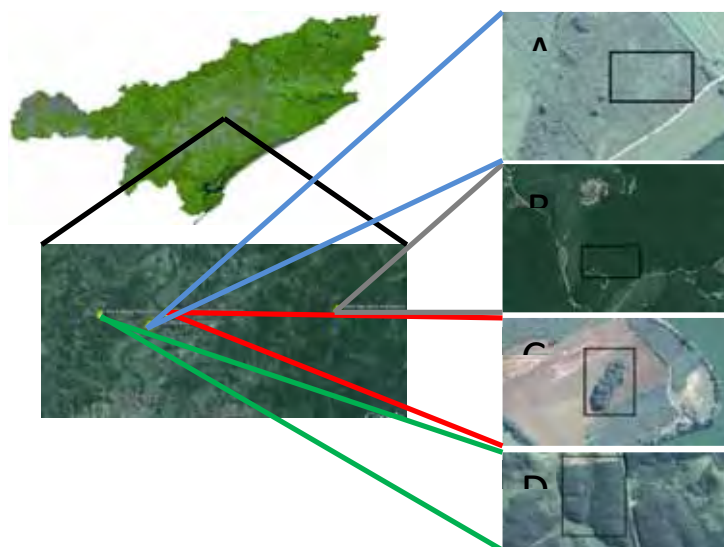


Figura 6. Imagens de satélite das áreas de amostragem, delimitando cada tratamento. Banana Cambissolo (A); Banana Argissolo (B); Mata Cambissolo (C) e Mata Argissolo (D).



Figura 7. Áreas experimentais. Cultivo de banana com cambissolo (CBN) (A); Cultivo de Banana com Argissolo (ABN) (B); Mata Nativa com Cambissolo (CMT) (C) e Mata nativa com Argissolo (AMT) (D).

As áreas cultivadas com banana, nunca tiveram outro tipo de cultura, anteriormente essas áreas eram de mata nativa, que foram derrubadas para o cultivo. Na área

de Mata com Cambissolo, a área tem algumas mudas de palmito Jussara plantadas pelo proprietário e na área de Mata Argissolo havia muda de plantas ornamentais, que eram comercializadas pelo proprietário.

5.3 Amostragem e coleta de dados

Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas. O procedimento de campo foi desenvolvido em função do atributo a ser avaliado. A coleta de amostras indeformadas, isto é, não perturbadas e destinadas aos ensaios de consolidação, determinação da relação de massa e volume dos constituintes do solo e micromorfologia foi feita utilizando o amostrador de Uhland com anel volumétrico de alumínio com dimensões de 69,5 mm de diâmetro e 25 mm de altura (Figura 8 e 9), em uma profundidade de 0 - 0,10 m. Os corpos-de-prova foram devidamente embalados com plástico filme (Figura 8 B), parafinados e encaminhados ao laboratório. As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de um enxadão e acondicionadas em saco plástico e encaminhadas juntamente com as amostras indeformadas ao laboratório de Solos da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Experimental de Registro.



Figura 8. Equipamentos utilizados e amostras no laboratório. Amostrador de Uhland (A); amostras prontas para serem moldadas (B) e após moldar um dos anéis (C).



Figura 9. Detalhe da amostragem. Utilização do amostrador de Uhland (A); detalhe do local amostrado (B) e amostra indeformada coletada (C).

5.4 Atributos investigados

5.4.1 Atributos físico-hídricos

Pelo método da pipeta (Day, 1965) foi determinada a textura, colocando-se solução de NaOH como dispersante químico e agitação à 6.000 rpm, durante o intervalo de tempo de 20 minutos. Também por esse método foi determinada a argila dispersa em água (ADA), sem acréscimo de solução de NaOH, determinando-se o índice de floculação (IF) com base na expressão descrita por EMBRAPA (1997):

$$IF = \left(\frac{AT - ADA}{AT} \right) \times 100 \quad (1)$$

Sendo,

IF: Índice de floculação (%);

AT: Argila total (g kg^{-1});

ADA: Argila dispersa em água (g kg^{-1}).

A porosidade total (PT), macroporosidade, microporosidade, foram determinados conforme os procedimentos descritos por EMBRAPA (1997). Para estas

determinações, as amostras foram colocadas para saturar por capilaridade em badeiras plásticas, com água até 2/3 da altura do anel (Figura 10 B). Foram colocados tecidos de poliéster, presos com um elástico, para evitar a perda de solo, permitindo somente a passagem de água. Todos os pesos foram tomados e anotados, inclusive o conjunto de tecido e elástico. Após a saturação do solo em água, os corpos-de-prova foram pesados, buscando conhecer a massa de água retida pelo solo. O procedimento seguinte foi levar os corpos-de-prova à unidade de sucção ao potencial matricial 60 centímetros de altura (0,06 atm), por aproximadamente 5 minutos, objetivando drenar o excesso d'água e padronizar o teor de água em todos os tratamentos.

Saindo da unidade de sucção os corpos-de-prova foram encaminhados ao consolidômetro e submetidos aos diferentes carregamentos (25, e 1600 kPa ao nível de pressão correspondente a pressão de préconsolidação (σ_p), lembrando que esta variou em função dos fatores propostos neste estudo.

Terminado este procedimento, os corpos-de-prova foram novamente saturados por 24 horas, e retornaram a unidade de sucção ao potencial matricial de 0,06 atm até estabilizar a drenagem d'água (Figura 10) e em seguida eram pesados e colocados na estufa à temperatura de 105°C, por um período de 24 horas, deve ser ressaltado que a massa do corpo-de-prova (anel + solo) era devidamente conhecida antes e depois da saturação.

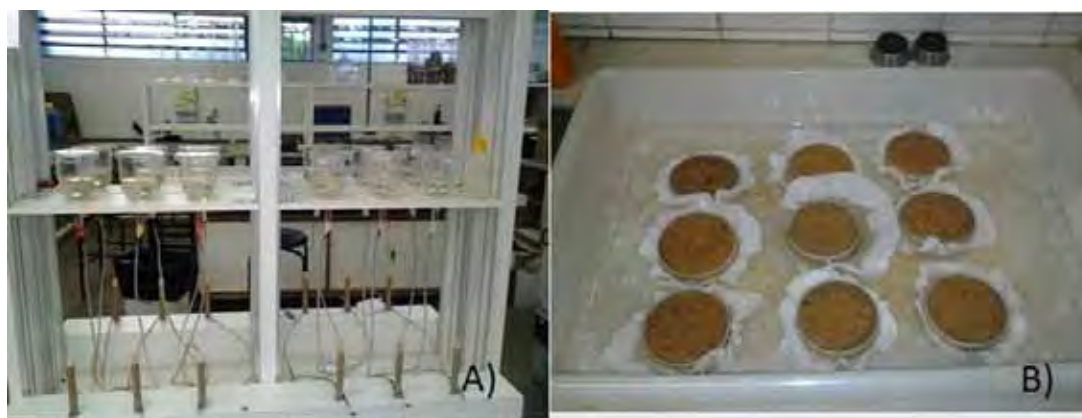


Figura 10. Detalhe da unidade de sucção (A); anéis sendo saturados em badeiras plásticas (B)

A microporosidade, então, foi determinada pela equação:

$$M = \frac{(a - b)}{c} \quad (2)$$

Sendo,

M: Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

a: Peso da amostra após ser submetida a uma sucção de 60 cm de coluna d'água (g);

b: Peso da amostra seca a 105°C (g);

c: Volume do cilindro (cm^3).

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade. Sendo que a porosidade total (PT) foi determinada pela expressão de Danielson e Sutherland (1986):

$$PT = \left[1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \right] \quad (3)$$

Sendo,

PT: Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

Ds: Densidade do solo (Mg m^{-3});

Dp: Densidade de partículas (Mg m^{-3}).

A estabilidade de agregados foi determinada pelo peneiramento em água, com um conjunto de peneiras de 4,5, 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,106 mm, determinando o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. O DMP foi determinado segundo Castro Filho et al. (1998) e o DMG, de acordo com Shaller e Stockinger (1953), pelas fórmulas:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi) \quad (4)$$

Sendo,

wi: Proporção de cada classe em relação ao total;

xi: diâmetro médio das classes (mm).

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^N wp \cdot \log xi}{\sum_{i=1}^N wi} \quad (5)$$

Sendo,

w_p : Peso dos agregados de cada classe (g).

w_i : Proporção de cada classe em relação ao total;

x_i : diâmetro médio das classes (mm).

A densidade do solo foi determinada segundo EMBRAPA (1997), pelo método do anel volumétrico:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

Sendo,

D_s : Densidade do solo (Mg m^{-3});

M_s : Massa do solo seco (g);

V_s : Volume total do solo (cm^3).

A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

5.4.2 Atributos mecânicos

O índice de cone (IC) foi determinado em laboratório, diretamente sobre o corpo-de-prova, utilizando o equipamento de bancada da marca Marconi, modelo MA-933 (Figura 11). Este procedimento, quando realizado em laboratório, permite controlar o teor de água do corpo-de-prova, condição necessária pra cumprir os objetivos deste estudo. A quantificação do IC foi realizada após a realização do K (condutividade hidráulica), pois para fazer esse teste o corpo-de-prova não poderia conter os orifícios deixados pelo penetrômetro. Para avaliação deste atributo, corpos-de-prova extras foram coletados, pois uma vez prospectados, ficava comprometida a quantificação dos vazios do solo (VTP, macro e microporosidade) e o estudo micromorfológico.



Figura 11. Penetrômetro de bancada da marca Marconi, modelo MA-933.

Os três níveis de carregamentos aplicados aos corpos-de-prova (25 e 1600 kPa e o terceiro correspondia o valor da pressão de préconsolidação (σ_p)), foram aplicados por um consolidômetro automático com interação homem-máquina, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, desenvolvido por Silva et al.(2007) (Figura 12). Os valores de σ_p dos corpos-de-prova de cada tratamento foram conhecidos previamente por meio de ensaios de compressibilidade, os quais foram realizados de acordo com metodologia de Dias Júnior (1994) a qual sugere a aplicação sucessiva de sete níveis de pressões (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa) até que 90% da deformação máxima na amostra seja obtida (Taylor, 1966).

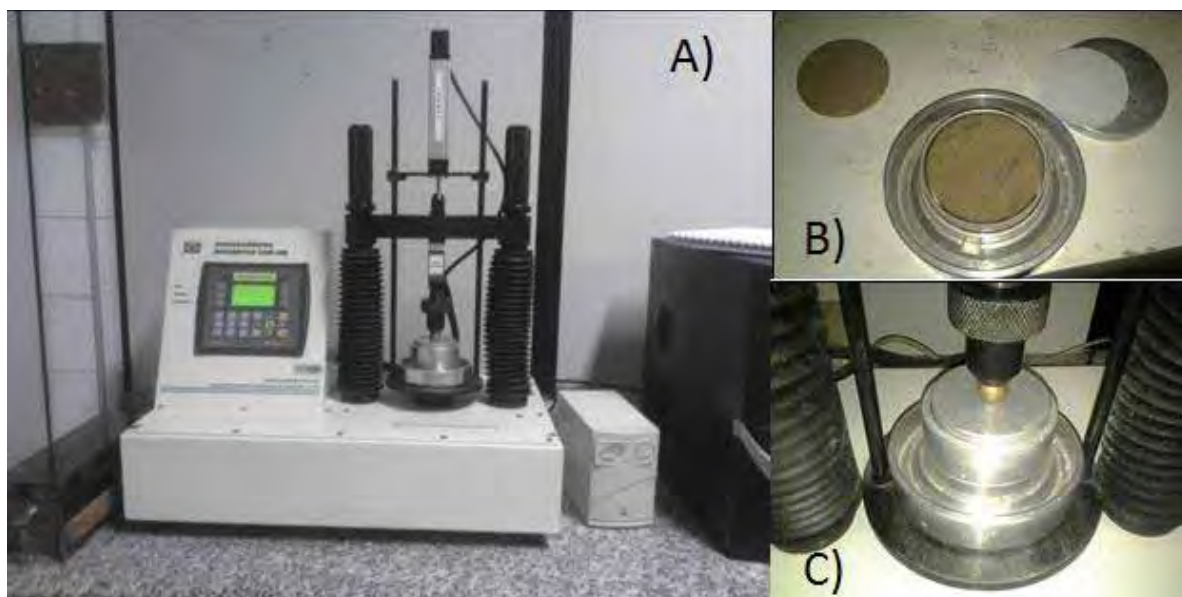


Figura 12. Consolidômetro automático com interação homem-máquina, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, desenvolvido por Silva et al.(2007b) (A); detalhe da montagem dos corpos de prova para a compressibilidade (B) e equipamento montado para a aplicação da tensão desejada (C).

Por meio do software CA LINKER (Figura 13), desenvolvido por Silva e Masquetto (2009), foram obtidas curvas de compressão do solo, das quais foram estimadas a pressão de preconsolidação (σ_p) e os índices de compressão (m), observando sugestões dos métodos M1 e M3 (Figura 14) (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1995).

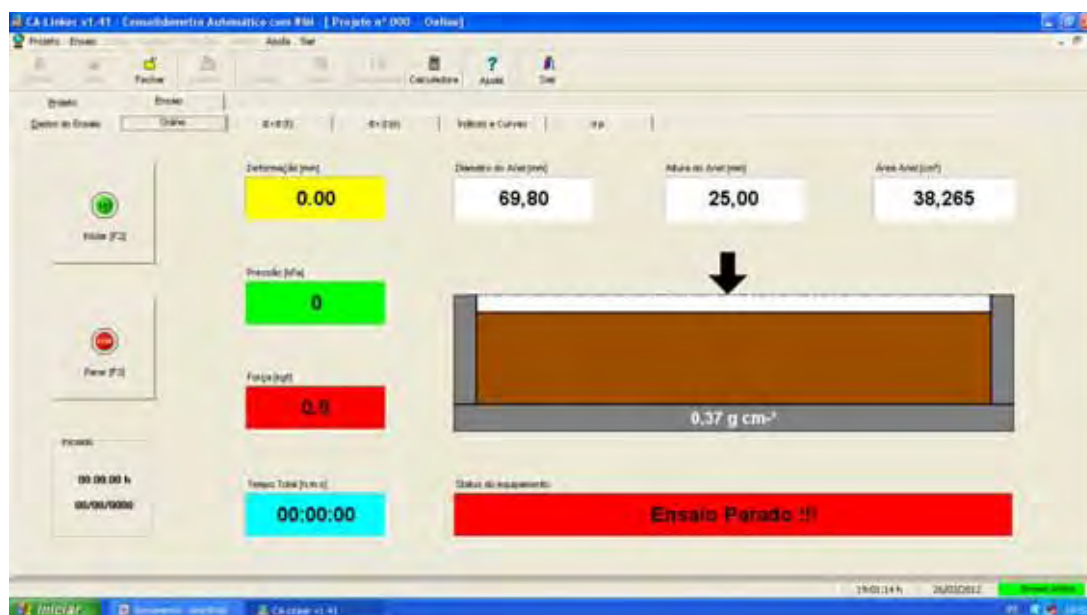


Figura 13. Detalhe do software CA LINKER, desenvolvido por Silva e Masquetto (2009).

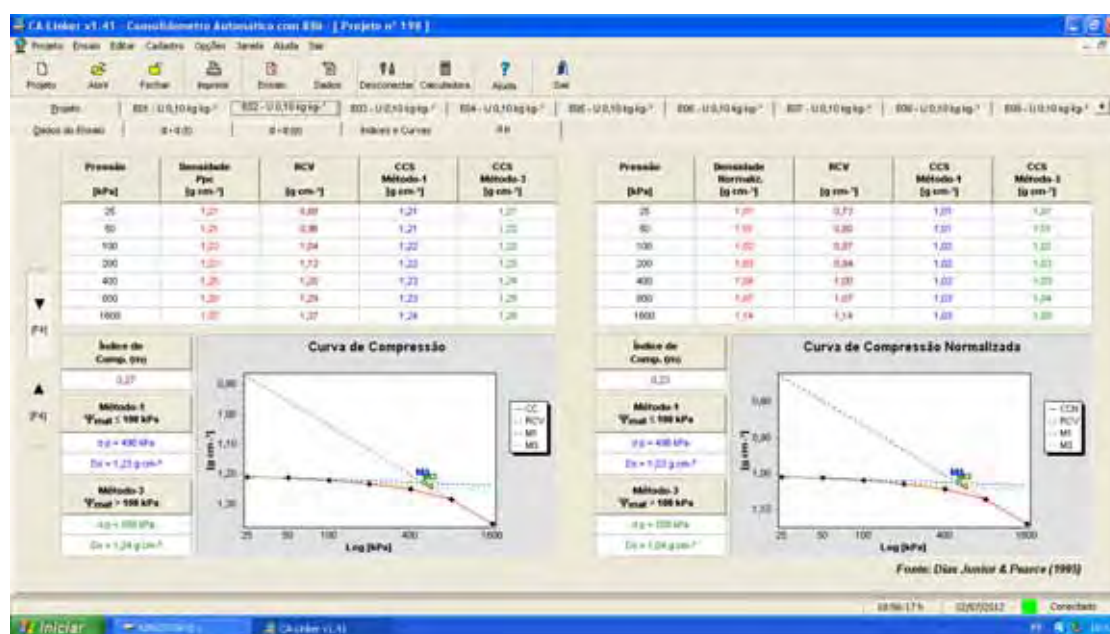


Figura 14. Observação dos métodos M1 e M3 proposto por Dias Júnior e Pierce (1995).

5.4.3 Condutividade Hidráulica (K)

A condutividade hidráulica do solo foi realizado em laboratório com um infiltrômetro de mini-disco da Dekagon Devices (Figura 15). O procedimento consistiu em colocar o equipamento sobre os corpos-de-prova, deixando a água fluir, sendo o volume de

água infiltrado conhecido a intervalos de 30 segundos em um período de 5 minutos. Entendendo que o teor de água do solo interfere diretamente na condutividade hidráulica, a determinação deste atributo só era realizada depois que os corpos-de-prova saíam da estufa, pois assim, garantia-se que o efeito sobre K, era função apenas dos efeitos dos tratamentos, em seguida eram saturados por 10 minutos, para que quebrasse a tensão superficial deixada pela redução do teor de água no solo, depois de ser levado à estufa.

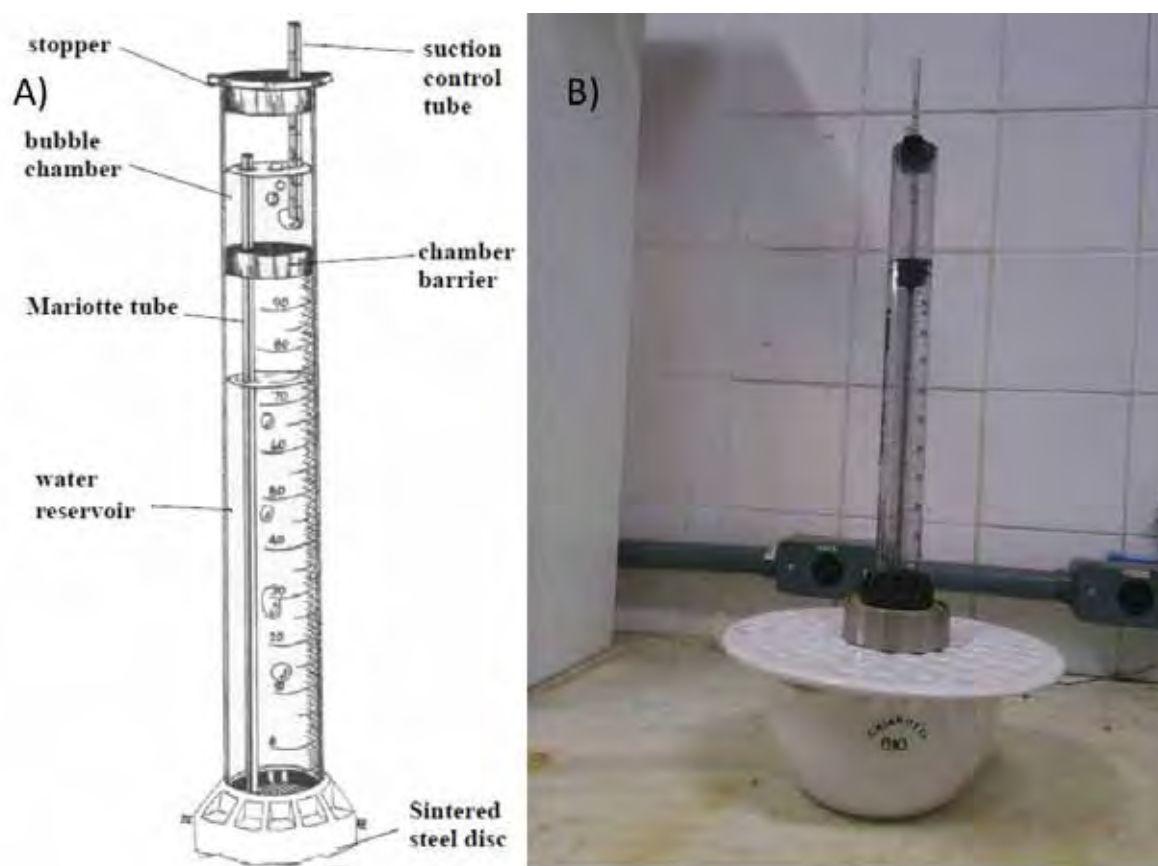


Figura 15. Esquema do equipamento utilizado no experimento, MiniDisk Infiltrometer (DECAGON DEVICE, 2012) (A) e infiltrômetro de mini-disco montado em laboratório (B).

O cálculo da infiltração de água no solo é feita pelo método proposto por ZHANG (1997):

$$I = C_1 \cdot t + C_2 \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

Sendo,

C_1 : Está relacionado com a condutividade hidráulica (m s^{-1});

C_2 : Está relacionado com a absorção do solo ($\text{m s}^{-1/2}$);

t: tempo (s).

A condutividade hidráulica (k) é medida pela equação:

$$k = \frac{C_1}{A} \quad (6)$$

Sendo;

k: Condutividade hidráulica;

C₁: Inclinação da curva de infiltração cumulativa versus a raiz quadrada do tempo;

A: Valor relacionado com parâmetros e Van Genuchten (tabelado).

5.4.4 Micromorfologia de Solos

Depois de aplicados os carregamentos e realizadas as avaliações físicas e mecânicas, 12 corpos-de-prova foram devidamente embalados e encaminhados ao laboratório de micromorfologia da Universidade de São Paulo – ESALQ – USP.

No laboratório as amostras foram impregnadas com resina poliéster não saturada, diluída com monômero de estireno, em uma proporção de 50% de resina para 50% de monômero, e misturada com pigmento fluorescente “Uvitex” ® (Ciba SpecialtyChemical) (Figura 16), que permite a distinção dos poros, quando iluminados com luz ultravioleta (MURPHY, 1986).

Foi utilizado, para controle do endurecimento das amostras, um catalisador, neste caso, o peróxido orgânico. A impregnação foi feita com auxílio de uma bomba de vácuo, que não deixa que nenhum dos poros fique sem a mistura. Este procedimento é feito repetidas vezes, para que todo o solo coletado mantenha-se com a mistura. Em seguida, após o endurecimento, utilizando-se de uma serra elétrica corta-se as amostras, no sentido vertical da amostra, as quais são lixadas com auxílio de um disco rotatório e um material abrasivo (carbureto de silício preto), de granulação grosseira (220 mesh). Em seguida as lâminas foram polidas em disco rotatório com aplicação de carbureto de silício verde (600 mesh), mantendo a amostra sempre úmida.

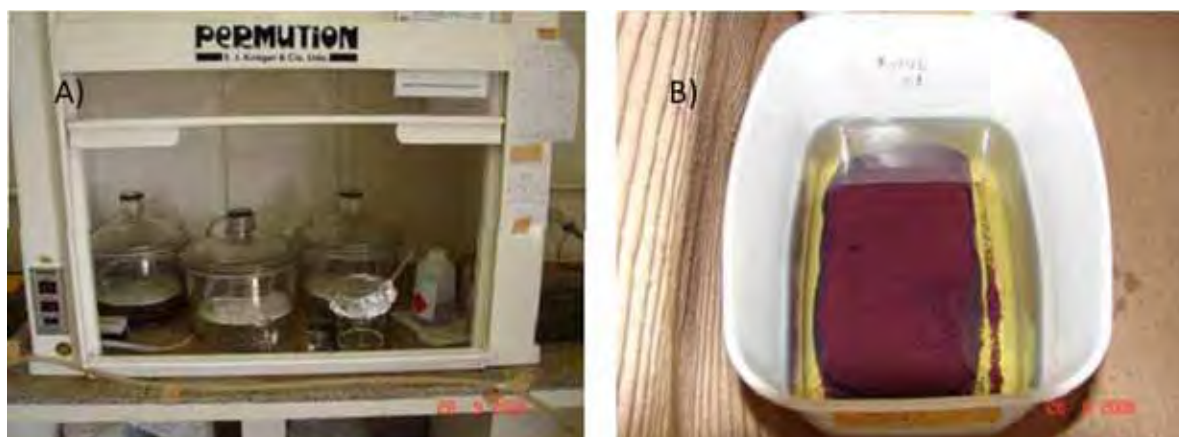


Figura 16. Detalhe da capela onde se realiza a impregnação das amostras (A); amostras sendo impregnadas (TOMA, 2008).

Após o polimento e adequação, as amostras são levadas ao laboratório de microscopia da Universidade de São Paulo, para a realização das análises de imagem. Um processo importante é a demarcação das áreas a serem fotografadas, a qual é realizada com o auxílio de um gabarito de acrílico e lápis com a ponta bem fina, tudo em luz negra (Figura 17), para ter uma melhor noção de onde estão os espaços porosos e dar uma boa caracterização, pelas imagens, do solo estudado.

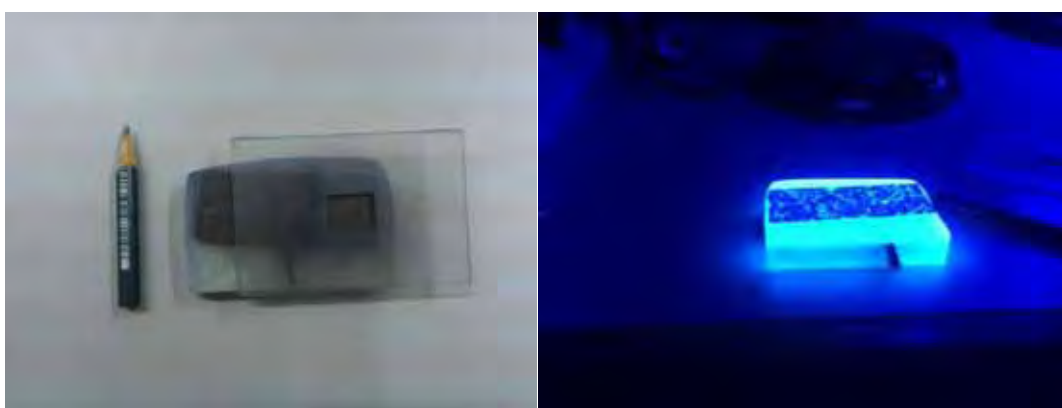


Figura 17. Gabarito para marcação da área fotografada e amostra em luz negra, pronta para ser marcada.

A etapa seguinte, uma das mais importantes, a aquisição da imagem, sendo que se não for bem feita a análise será imprecisa. Para a aquisição das imagens foi utilizada uma câmera em cores (SONY, modelo DFW-X700), em sistema CCD (Chargedcoupledevice), acoplada a uma lupa polarizadora (Zeiss) (Figura 18). As imagens

foram digitalizadas em 1024x768 pixels, com resolução espectral de 256 tons de cinza, aumentando-se em 10x, igualando um pixel a 156,25 μm .

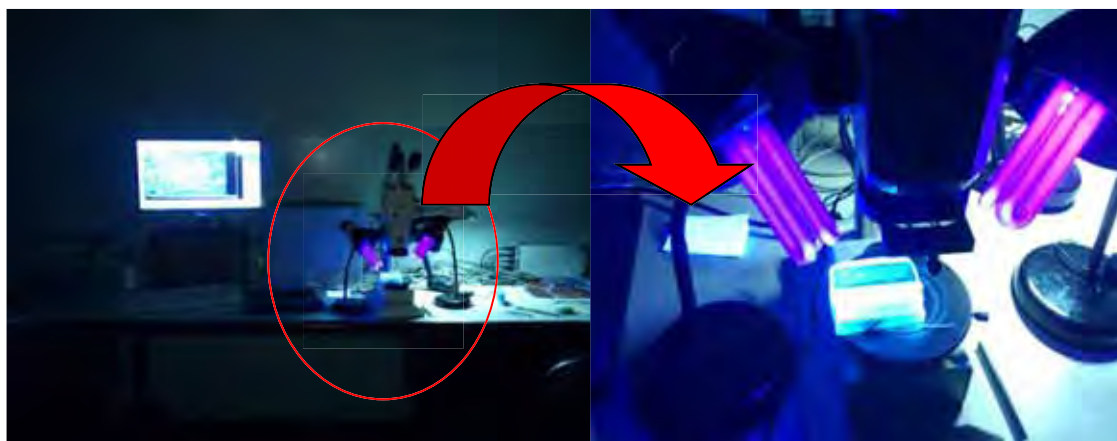


Figura 18. Detalhe do computador e da lupa utilizada para a realização das imagens.

A análise das imagens foi realizada no software Noesis ® VISILOG 5.4 (Figura 19.), onde os processos e quantificação são definidos pelos critérios de Cooper (1999) e otimizado por macros desenvolvida em linguagem Visual Basic no Microsoft ® Excel (JUHÁSZ, 2006) utilizado por Toma (2008). Nesse processo é utilizado a limiarização ou Threshold da imagem, que consiste em definir um limite de separação, a partir do qual será segmentada.

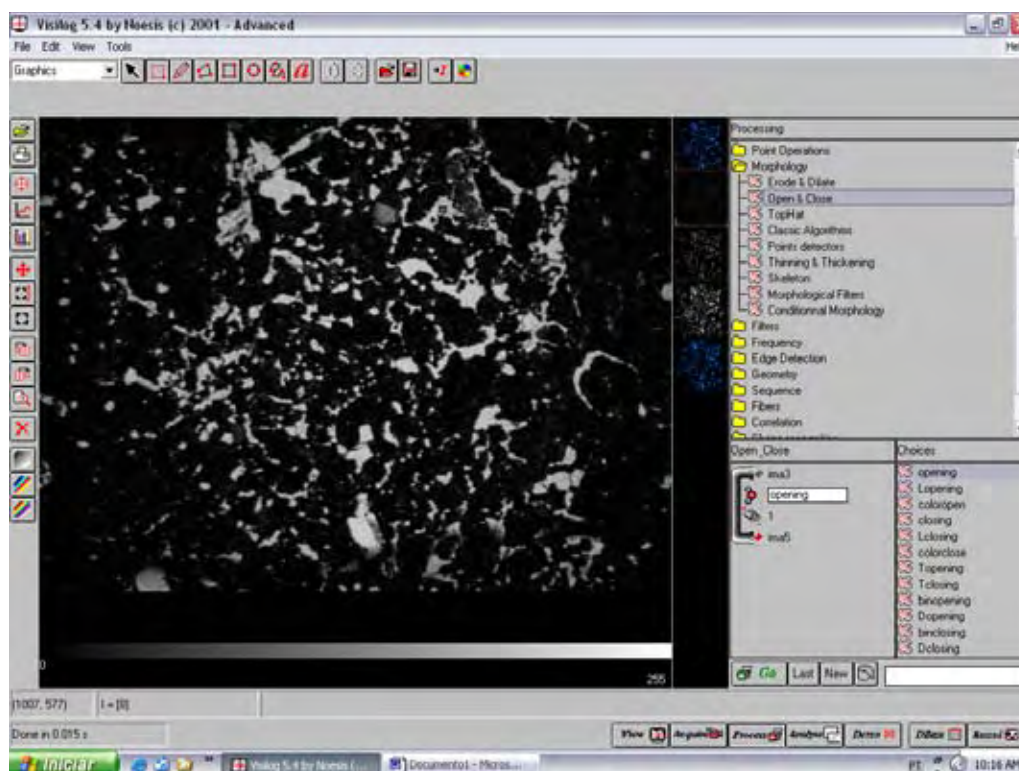


Figura 19. Visual do programa VISILOG 5.4.

A etapa seguinte é a de binarização, que consiste na segmentação da imagem em si, onde transforma a imagem em uma matriz de 0 (zero) e 1 (um), que foi delimitada pelo Threshold, para que os programas de análise de imagem consigam identificar quantitativamente os poros e determinar quais os seus formatos. Essa análise pode determinar índices de vazios, macro e mesoporos, porosidade total e formato de poros. O formato dos poros é definido por um algoritmo, colocado no programa, utilizando da morfologia matemática (Figura 20).

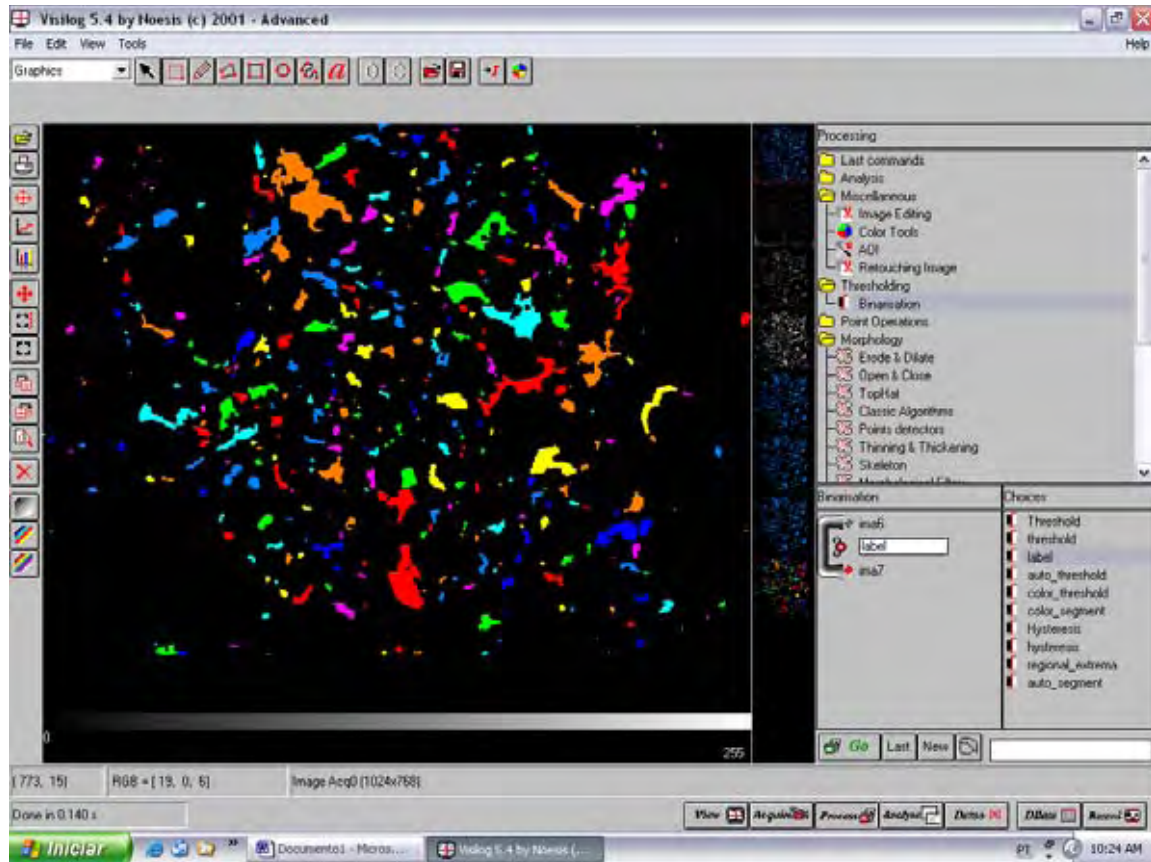


Figura 20. Algoritmo de morfologia matemática atuando na porosidade do solo.

A grande chave da morfologia matemática é o elemento estruturante, que nada mais é que um conjunto cuja forma e o tamanho são conhecidos para uma comparação aos que não há conhecimento. Os índices utilizados são:

$$I_1 = \frac{P^2}{(4\pi A)}, \quad (7)$$

onde P é o perímetro do poro e A sua área, e

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_I)_i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F)_j}, \quad (8)$$

em que N_I é o número de interceptos de um objeto na direção i ($i = 0, 45, 90$ e 135°), D_F é o diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0$ e 90°), m é o número de i direções e n é o

número de j direções. O índice I_2 é utilizado como complemento do índice I_1 para obter maior precisão na separação entre grupos (SOUZA et al., 2006).

O I_1 é igual a 1 (hum) para uma forma perfeitamente circular e é maior a medida que a forma desvia-se do círculo (Tabela 2) (COOPER, 1999; SOUZA et al., 2006). I_2 complementa o índice I_1 para ter uma alta precisão na separação entre os grupos de formas.

A porosidade foi calculada como a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total do campo, expresso em porcentagem. Os poros são divididos em três grupos, em função de sua forma: Arredondados, Alongados e Complexos e três grupos, em função de seu tamanho: Pequenos ($0,000156 - 0,0156 \text{ mm}^2$), Médios ($0,0156 - 0,156 \text{ mm}^2$) e Grandes ($> 0,156 \text{ mm}^2$), devidamente apresentados na Tabela 2.

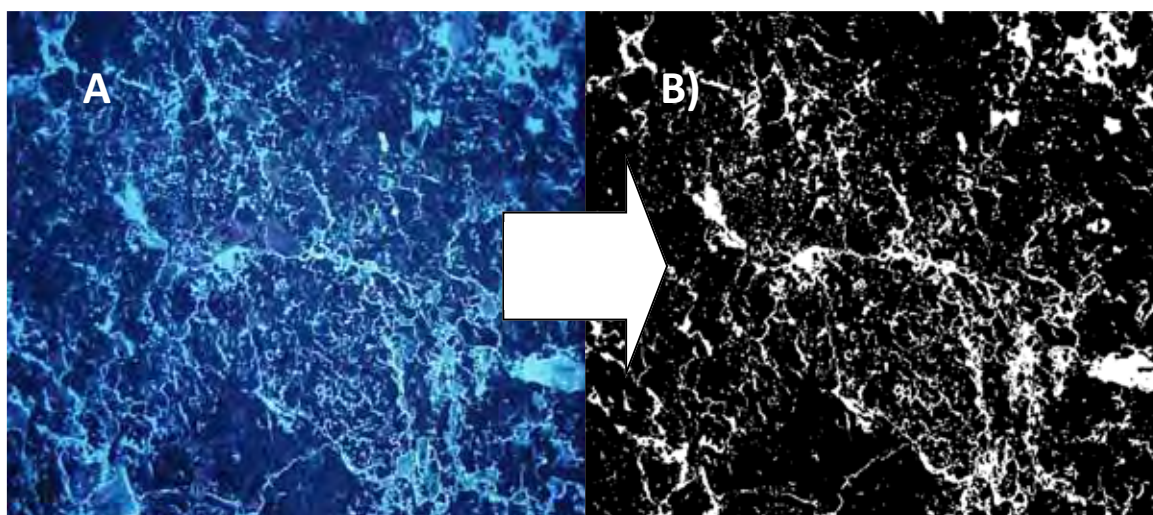


Figura 21. Detalhe da imagem em luz negra, evidenciando o pigmento nas áreas mais claras (A); imagem binarizada (B).

Tabela 2. Critérios para distinção entre grupos de formas de poros.

Poros	Índices de Formas	
	I_1	I_2
Arredondados	$I_1 \leq 5$	-
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$5 < I_1 \leq 25$ ou > 25	$> 2,2$

5.5 Sistematização dos dados e Estatística

A organização e sistematização dos dados foram realizadas em planilhas eletrônicas, compatíveis com as disponíveis no mercado. Todos os cálculos prévios das variáveis a serem analisadas foram realizados nas planilhas eletrônicas. O programa Sistema de Análise de Variância - SISVAR (FERREIRA, 2000), foi utilizado para realizar a estatística, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5%. A construção e dos gráficos foram realizados pelo programa Sigmaplot, versão 12.0 (Systat Software Inc.)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Atributos físicos

Os valores de ADA para AMT e CBN foram não diferiram estatisticamente e foram inferiores aos valores encontrados pra ABN e CTM, os quais, também, não diferenciam significativamente (Tabela 1). Quanto maior o valor de ADA apresentado, maior é a predisposição do solo a compactação, devido ao melhor arranjo da massa de solo (SILVA, A., 1997), portanto, analisando os dados, observa-se que AMT e CBN apresentam os maiores valores, indicando a maior predisposição desse solo a compactação. Ainda conforme a Tabela 3 verifica-se que o menor valor de ADA encontrado foi para ABN, seguido do CMT, indicando que esses solos/manejo tem uma menor predisposição à compactação. O mesmo ocorre com o IF, pois ADA e IF são variáveis inversamente proporcionais (EFFGEN et al., 2006). Os altos valores em ABN e CMT indicam que esses solos estão em um processo mais avançado de manutenção da estrutura do solo, pois a flocculação é a primeira condição para a formação de agregados (IORI, 2010).

Os valores de DMP e DMG são mostrados na Figura 22. Para DMG não houve diferença estatística entre AMT e CBN, pois são os que apresentaram a menor quantidade de matéria orgânica, em relação aos outros solos/manejos. Porém os demais manejos diferiram entre si e em relação aos outros, também, o mesmo ocorreu com o DMP. Apesar de CMT apresentar os maiores valores para DMP e DMG, não foram os que apresentaram os valores mais elevados de MO, o maior valor foi encontrado para ABN, porém a alta quantidade de silte apresentada nesse solo (Tabela 1) pode ter influenciado na ação da MO como agente cimentante.

O DMP e DMG, que são índices que mensuram a estabilidade de agregados, tem uma ligação forte com o IF. Portanto essa diferença está, parcialmente, ligada ao IF. Seguindo a linha de raciocínio, pode-se notar que o IF para ABN e CMT são os maiores, 94,95 e 93,17%, explicando os valores mais elevados, tanto para DMP quanto para DMG. Apesar de ABN apresentar o maior IF, CMT foi o que obteve maior valor para os dois índices. Ferreira (2010) destaca que a flocculação da argila é um pré-requisito para a agregação,

porém não suficiente, necessitando da presença de substâncias cimentantes. Os valores para AMT e CBN de 89, 51 e 88,08%, respectivamente, não diferem estatisticamente, explicando os baixos valores para DMP e DMG.

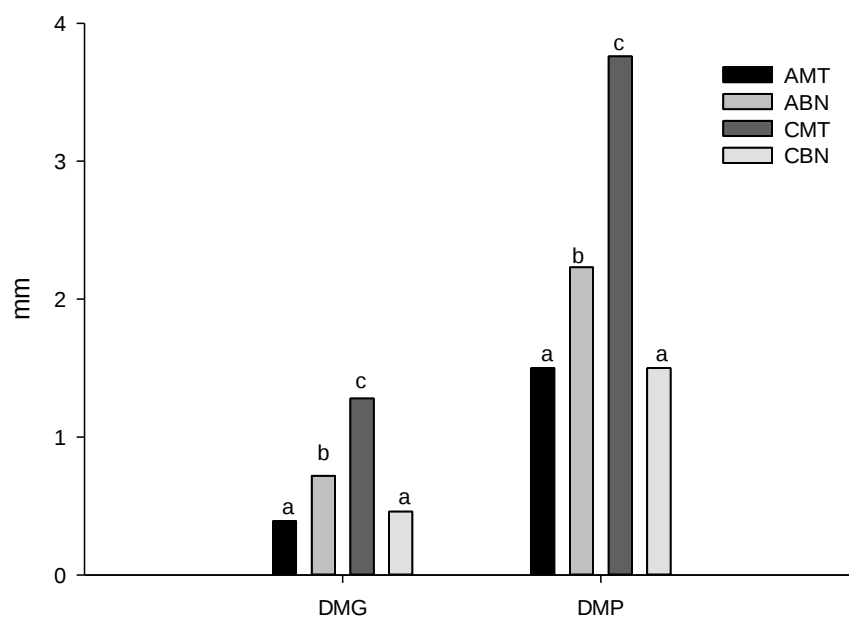


Figura 22. Dados médios de DMG e DMP, em relação a cada manejo/solo, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

A figura 23 demonstra a distribuição de macroporos de corpos-de-prova dos distintos solos e seus respectivos uso/manejo, submetidos aos diferentes carregamentos. Percebe-se que nos manejos de AMT e ABN, não houve diferenças significativas quanto a pressão, já nos manejos de CMT e CBN houve diferença significativa entre a pressão de 25 kPa, quando comparada com as demais, isso ocorre, isto é uma observação evidente, por se tratar do menor da menor carga aplicada. A redução da quantidade de macroporos é consequência da composição granulométrica menores teores de argila e silte facultando, portanto, maior aproximação das partículas, diferentemente do observado no Argissolo.

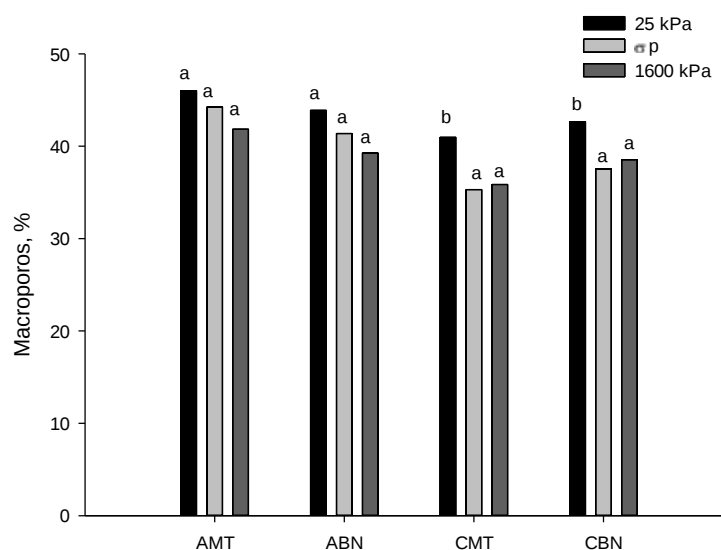


Figura 23. Dados médios de macroporos, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

Nos Argissolos as cargas não tiveram tanta influência, pois são solos mais bem estruturados e com uma participação maior das argilas e silte (Tabela 1). Também é possível notar que nos Argissolos, apesar de observar diferença significativas entre as cargas aplicadas, verifica-se que a redução da porosidade se dá diretamente proporcional à intensidade da carga, muito provavelmente devido à contribuição do particulado mais fino (argila e silte) presente neste solo

No AMT, tomado no estudo como área de referência a quantidade de macroporos foi maior do que a área de ABN, o que condiz com a realidade. Já nos Cambissolos isso não ocorreu, fato que pode ser explicado pelos constantes alagamentos, devido às enchentes que acarretam a região, contribuindo em ciclos sucessivos para a deposição de material. Deve ser ressaltado que os solos da Região do Vale do Ribeira apresentam grande quantidade de material 2:1, dando a esse solo um forte poder de contração e dilatação, quando secos e saturados, respectivamente. Este fenômeno interfere no desenvolvimento da estrutura do solo e, conseqüentemente a porosidade.

Pires et al. (2009), utilizaram a análise de imagens para possíveis modificações na distribuição do tamanho, número e formato dos poros de amostras de solos,

depois de submetidas a sequências de ciclos de umedecimento e secamento. Segundo os autores, tais ciclos produzem mudanças significativas nos poros irregulares grandes.

Collares et al.(2008), destaca que os valores mínimos de macroporosidade em um solo é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ou seja, 10% de macroporos, destinado a aeração do solo. Esse valor é limitante para o desenvolvimento do sistema radicular. Os solos apresentados nesse experimento indicaram uma ausência de limitação no arejamento do solo.

Os dados de microporos são apresentados na Figura 24. Observa-se que o carregamento aplicado acima da pressão de preconsolidação (σ_p), especificamente no Cambissolo sob o cultivo de banana (CBN) reduziu significativamente a microporosidade, quando comparado aos carregamentos de 25 kPa, denotando, portanto a maior fragilidade deste solo sob este tipo de uso/manejo, pois essa redução denota uma maior compactação desse solo e uma maior densidade.

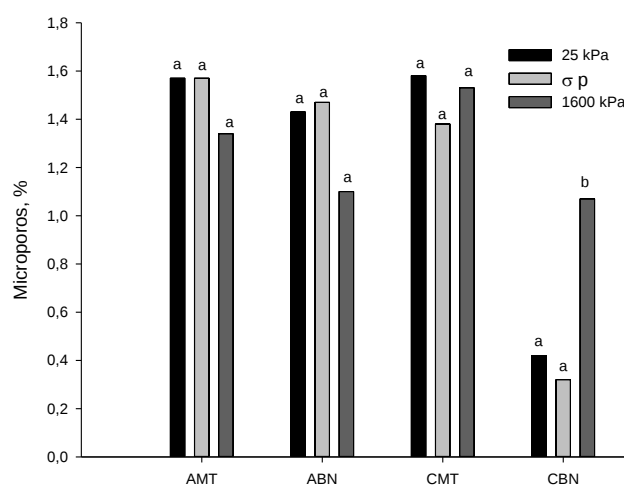


Figura 24. Valores médios, em porcentagem de microporos, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

Essas alterações se dão, pois, sendo o solo um corpo poroso e quando submetido à compressão, a mesma massa de material sólido por ocupar um volume menor, afeta sua estrutura. Essa desestruturação do solo causa alterações na quantidade, tamanho, formato e orientação de espaços vazios, consequentemente, a relação entre macro e microporos e a continuidade de macroporos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). Essa

modificação pode ser atribuída à distribuição da porosidade total e da macroporosidade (LIBARD, 2002; RICHART et al., 2005) e o aumento da microporosidade (MACHADO e FAVARETTO, 2006). Boone e Venn (1994) destacam que no processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores.

Silva e Kay (1996), por outro lado, citam que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco pela compactação, sendo que em solos compactados há uma redução da porosidade total e dos macroporos, enquanto volume de microporos permanece inalterada (DIAS JÚNIOR, 1996). Os dados de microporosidade para CBN foram os mais baixos, em relação a todos os tratamentos, estando estes resultados em consonância com a distribuição granulométrica encontrada para este solo, onde foram observados porcentagens maiores de areia e argila.

Para o volume total de poros calculado, apresentado na Tabela 3, não houve diferença estatística, nem na condição de consistência plástica e nem na condição de consistência tenaz, porém a diminuição do total de poros nos solos na condição plástica, conforme as cargas aplicadas aumentam. Já os solos na condição tenaz não apresentam grandes reduções em sua porosidade, isso demonstra, claramente, que a umidade do solo é um fator limitante para a compactação. Segundo Kondo e Dias Júnior (1999) um dos grandes entraves às operações motomecanizadas é a suscetibilidade à compactação do solo, que limita o seu manejo em condições de umidade excessiva.

Para a condição em que os corpos-de-prova foram submetidos à consistência plástica (teor de água acima do limite plástico do solo) o AMT apresentou os maiores valores de porosidade total, sendo 54,57% para o carregamento de 25 kPa, 47,58% para o carregamento correspondente a pressão em σ_p e 43,41% para o carregamento de 1600 kPa. Os menores valores foram apresentados pelo CMT, sendo 42,54% para a pressão de 25 kPa, 37,38% para a pressão em σ_p e 36,68% para a pressão de 1600 kPa.

Analisando os dados da Tabela 3, pode-se notar que os da porosidade da mata nativa (referência) são maiores que os dados dos solos cultivados com banana, o que era esperado para as condições analisadas.

Tabela 3. Valores médios do VTP calculado, em relação a cada solo/manejo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Médias seguidas por mesma letra nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

Solo/Manejo	Cargas Aplicadas		
	25 kPa	σ_p	1600 kPa
		%	
<i>AMT_{cp}</i>	54,57a	47,58a	43,41 ^a
<i>ABN_{cp}</i>	45,31a	42,84a	40,36 ^a
<i>CMT_{cp}</i>	42,54a	37,38a	36,68 ^a
<i>CBN_{cp}</i>	43,07a	39,37a	37,86 ^a
<i>AMT_{ct}</i>	49,73a	49,33a	47,71 ^a
<i>ABN_{ct}</i>	46,56a	45,73a	43,67 ^a
<i>CMT_{ct}</i>	48,82a	44,77a	44,63 ^a
<i>CBN_{ct}</i>	53,36a	53,08a	52,81 ^a

cp: Consistência Plástica; ct: Consistência Tenaz

Na Figura 25 são apresentados os dados de porosidade obtidos do ensaio de compressão uniaxial. Houve diferença estatística para a pressão de 1600 kPa, na condição de consistência plástica. Pode-se observar, também que os valores de porosidade na pressão de 1600 kPa diminuíram quando comparados com os outros tratamentos, pois quanto maior a carga aplicada, maior é a redução de poros, deixando assim o solo mais compactado. Já para os corpos-de-prova submetidos à condição de consistência tenaz, não houve diferença estatística. Como na consistência tenaz há uma contração do solo, diminuindo a possibilidade de redução dos poros.

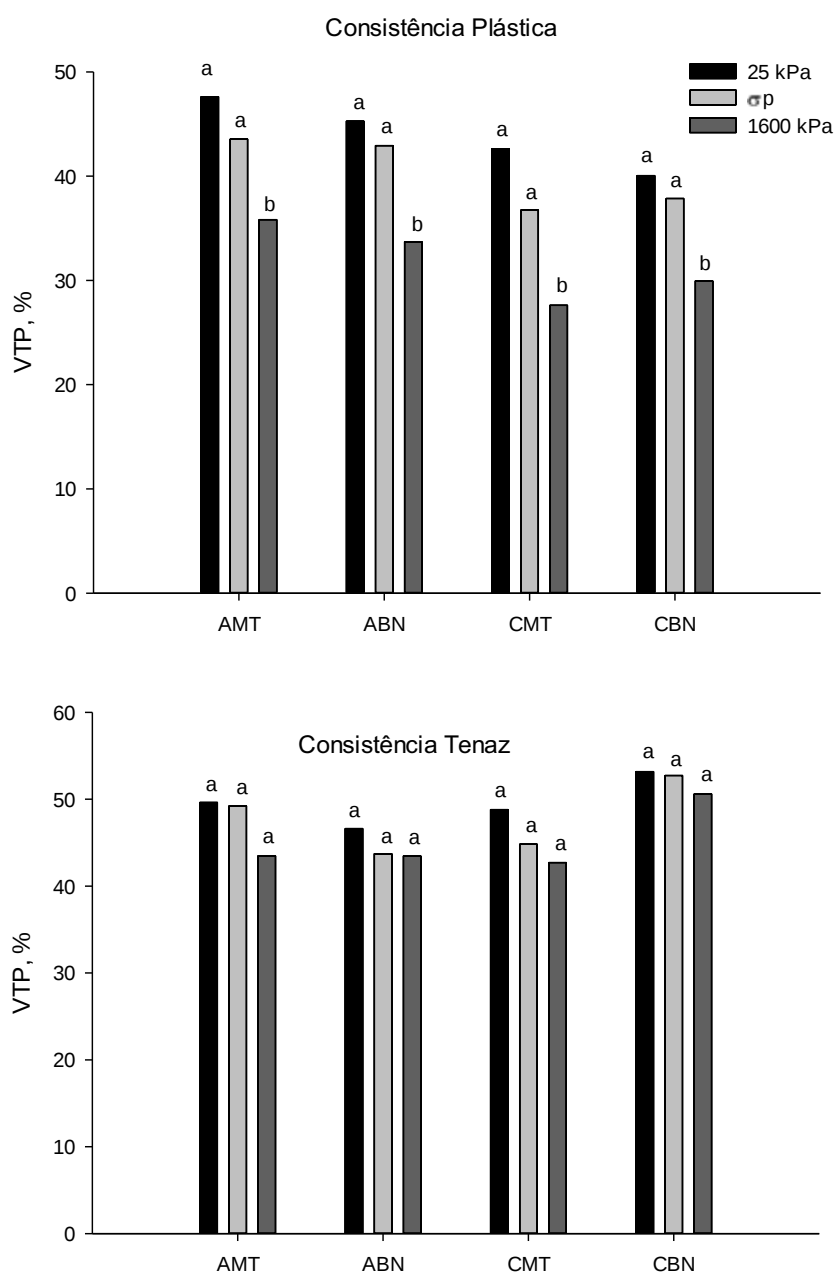


Figura 25. Valores médios, em porcentagem de porosidade calculada, obtidos a partir de índices da relação de massa e volume do ensaio uniaxial, em relação a cada manejo/solo, nas condições de consistência tenaz e plástica. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

A Figura 26 destaca os valores de D_s , para cada manejo/solo apresentado neste trabalho. Os dados não tiveram diferenças estatísticas para nenhum dos tratamentos, porém é possível observar que o comportamento da densidade em relação a

umidade e a carga aplicada tem uma grande relação. Pode-se notar que nos solos que foram saturados, as pressões de 1600 kPa apresentam os maiores índices de D_s , fato também observado nos solos com menos umidade. Curi (1993) diz que a compactação causada por compressão, diminui o volume do solo, pois ocasiona um rearranjo mais denso das partículas, conferindo um aumento da densidade do solo (JORGE, 1985).

Borges et al. (1999), com o auxílio de uma prensa hidráulica, aplicou diferentes carga, em valores crescentes em um solo, obtendo valores em mesma escala, fato observado por Foloni (1999) e Foloni et al. (2003).

Vasconcelos et al. (2004) encontrou em um mesmo perfil de solo, densidades de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ e de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ em profundidade, onde representavam áreas não compactadas e áreas compactadas, respectivamente, que impediam o crescimento radicular. Muitos dados, principalmente para os solos saturados, indicam áreas compactadas em especial nas cargas de 1600 kPa, tendo valores de até $1,51 \text{ g cm}^{-3}$.

Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40$ a $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ para os franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para os franco-arenosos, onde Mg m^{-3} tem os mesmo valores de g cm^{-3} . Como os valores são muito diferentes para cada textura, vale uma avaliação pontual. AMT apresenta textura argila, ABN franco-argiloso e CMT e CBN apresentam textura franco-argilo-siltoso.

Levando em consideração os valores propostos por Reichert et al. (2003), o valor para AMT ($1,40 \text{ g cm}^{-3}$) ultrapassou o limite crítico para a textura na pressão de 1600 kPa na condição saturada, ou seja, o solo está em um nível de compactação alto. No solo de ABN ocorreu o mesmo do AMT, somente a D_s para 1600 kPa saturado ultrapassou o limite para essa textura ($1,44 \text{ g cm}^{-3}$). CBN apresentou valores altos tanto para σ_p quanto para a pressão de 1600 kPa, na condição plástica ($1,47$ e $1,51 \text{ g cm}^{-3}$), respectivamente.

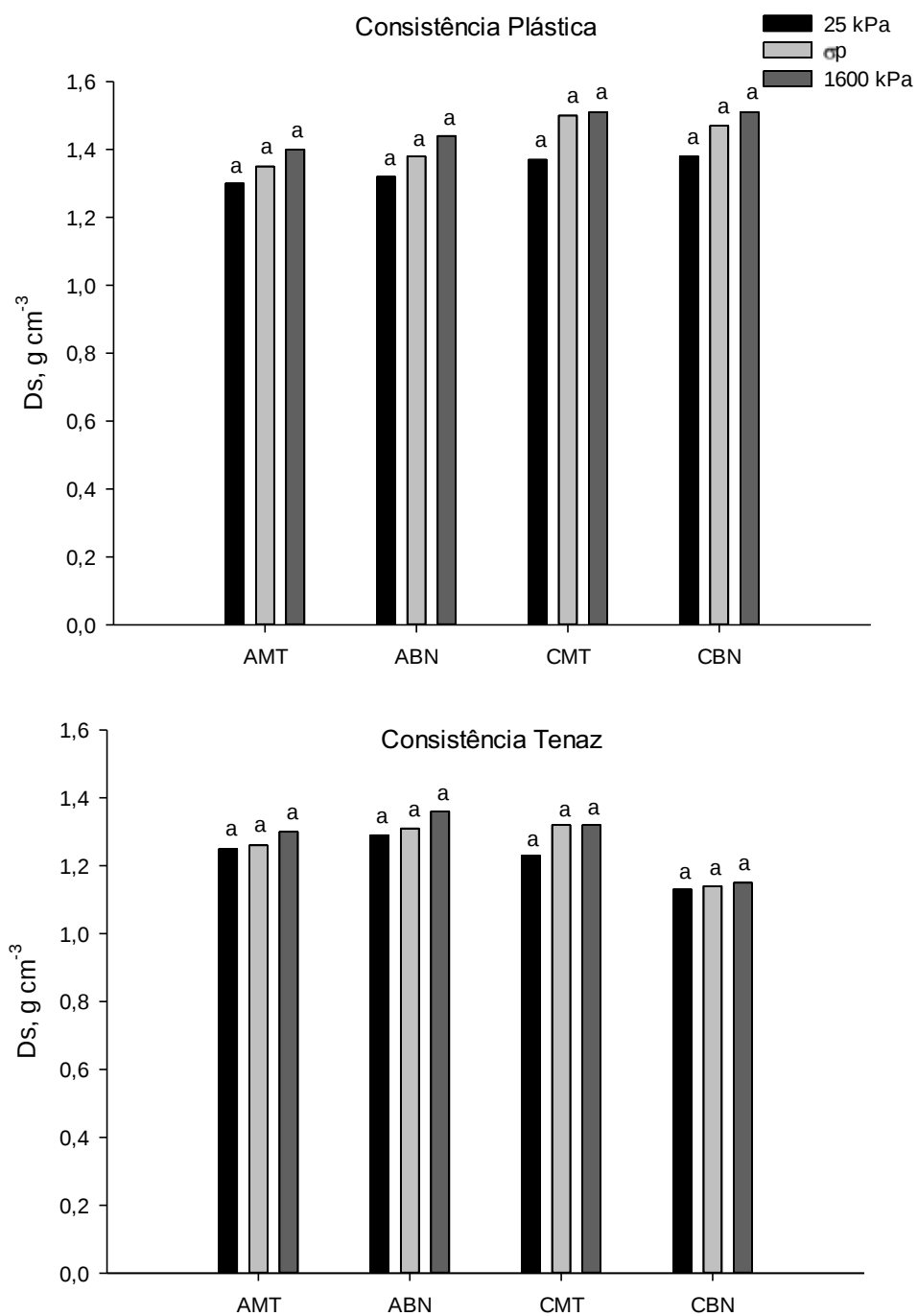


Figura 26. Valores médios da Ds, em relação a cada manejo/solo, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas consistências plástica e tenaz. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

Para o CMT aconteceu o mesmo do CBN, apresentando valores elevados para σ_p e 1600 kPa (1,50 e 1,51 cm⁻³). Para a condição tenaz do solo, não houve densidade elevadas. Esse fato mostra o que ocorreu nos solos do CMT e CBN (condição plástica), que apresentaram os menores valores para macroporos na σ_p (Figura 26). Na pressão de 1600 kPa todos os solos/manejo apresentaram redução na macroporosidade na consistência plástica, o mesmo é observado na porosidade total. Machado e Favaretto (2006) destacam que na camada superficial do solo, normalmente, a densidade é menor, devido a maior concentração de material orgânico, o qual atua como agente agregador, aumentando os espaços porosos.

O comportamento do índice de cone (IC) avaliado em corpos-de-prova depois de submetidos aos distintos carregamentos é apresentado na Figura 27. Para o carregamento de 25 e o carregamento referente á pressão de σ_p não houve diferença significativa para AMT, porém, em todos os tratamentos, menos os de AMT, para a pressão de 1600 kPa houveram diferenças significativas. Nas pressões de 25 kPa, houve uma maior absorção de água quando foram realizado os procedimentos de quebra de tensão superficial, onde o solo foi umedecido por um período de tempo, após sair da estufa, esse fato pode explicar os baixos valores para essa carga, explicando também os altos valores. Observa-se que os valores de IC para a pressão de 1600 KPa são altíssimos, chegando a valores de 7,50 MPa, no caso dos corpos-de-prova do ABN submetidos a condição de consistência plástica.

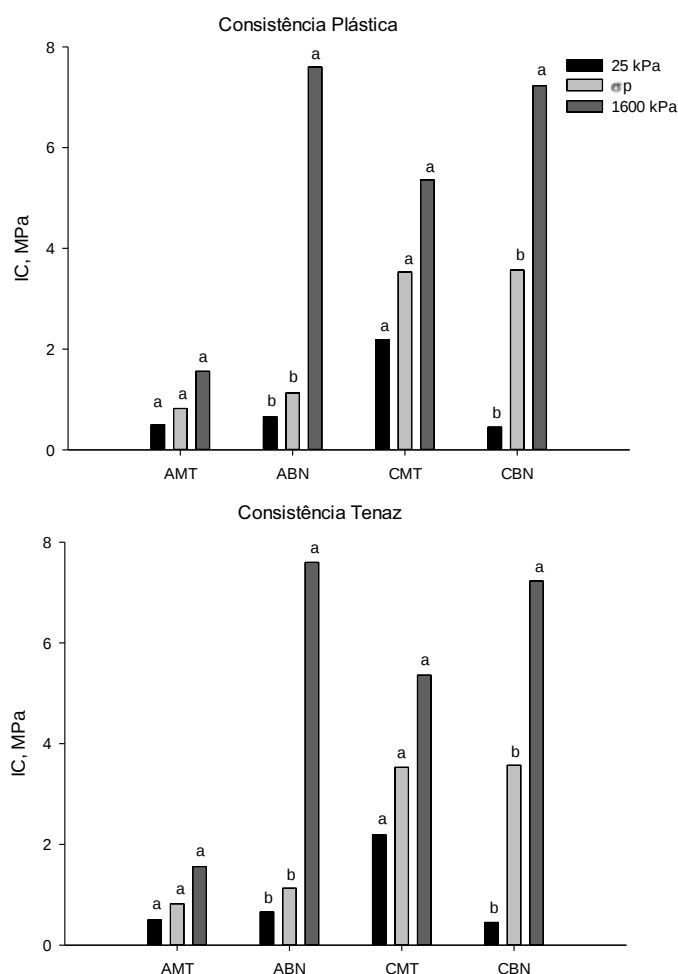


Figura 27. Valores médios de IC, em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

Camargo et al. (2000) empregam a classificação de compactação entre 1 MPa e 2 MPa, que pode ocorrer limitação ao desenvolvimento das raízes de algumas espécies de solo de textura argilosa, e de compactação severa para valores de resistência do solo superiores a 2 MPa, considerando altamente restritivo à penetração, ramificações e crescimento das raízes. O manejo de AMT teve o menor grau de IC, tanto para a condição saturada, como a tenaz, isso indica que o solo tem baixa predisposição à compactação. Os demais manejos/ solos apresentaram altos valores de IC para as pressões aplicadas, indicando alta possibilidade de compactação adicional. Os altos valores para as cargas de 1600 kPa podem ser explicados pela forma como os anéis foram submetidos ao ensaio de resistência a

penetração. Os ensaios somente começaram depois de todo o procedimento de compressibilidade e logo após serem levados à estufa, em seguida foram umedecidos por 10 minutos para quebrar a tensão superficial do solo, para que pudesse ser realizado o K, e somente em seguida era feito o IC.

Os valores baixo para 25kPa e σ_p , o qual não diferiram estatisticamente, entre si, foram devidos à água absorvida tanto pelo umedecimento, quanto pelo ensaio de K, como o solo ainda estava bem estruturado, absorveu bastante água e os valores altos para 1600 kPa deve-se à baixa absorção de água, pois o solo já tinha sua estruturação comprometida.

6.2 Atributos hídricos

A Figura 28 mostra os valores médios para condutividade hidráulica (K), mostra diferença na pressão de 25 kPa para AMT em corpos-de-prova submetidos à consistência plástica, as demais não diferem estatisticamente. O valor elevado de K para AMT prova que o solo não sofreu influência da compactação, como nos outros solos/manejos. A infiltração de água foi mais eficiente nesse solo, pois há uma menor compactação e uma melhor distribuição dos poros. Camargo e Alleoni (1997) dizem que os macroporos são mais facilmente afetados pela compactação e, por ocorrer por esses poros à movimentação rápida, e não limitada da água, conseqüentemente, a infiltração, a permeabilidade e a drenagem do solo são prejudicadas. Em solos compactados a temperatura diminui, conseqüentemente a viscosidade da água aumenta, ocasionando uma diminuição da condutividade hidráulica do solo (BRANDÃO, 2006).

Os valores para a pressão de 25 kPa são os maiores apresentados, em todas as situações. As melhores taxas de infiltração do solo ocorreram na condição tenaz do solo, isso é facilmente explicado pelo fato do solo não sofrer grandes alterações quando se aplica uma carga no corpo-de-prova, pois há um menor rearranjo das partículas do solo.

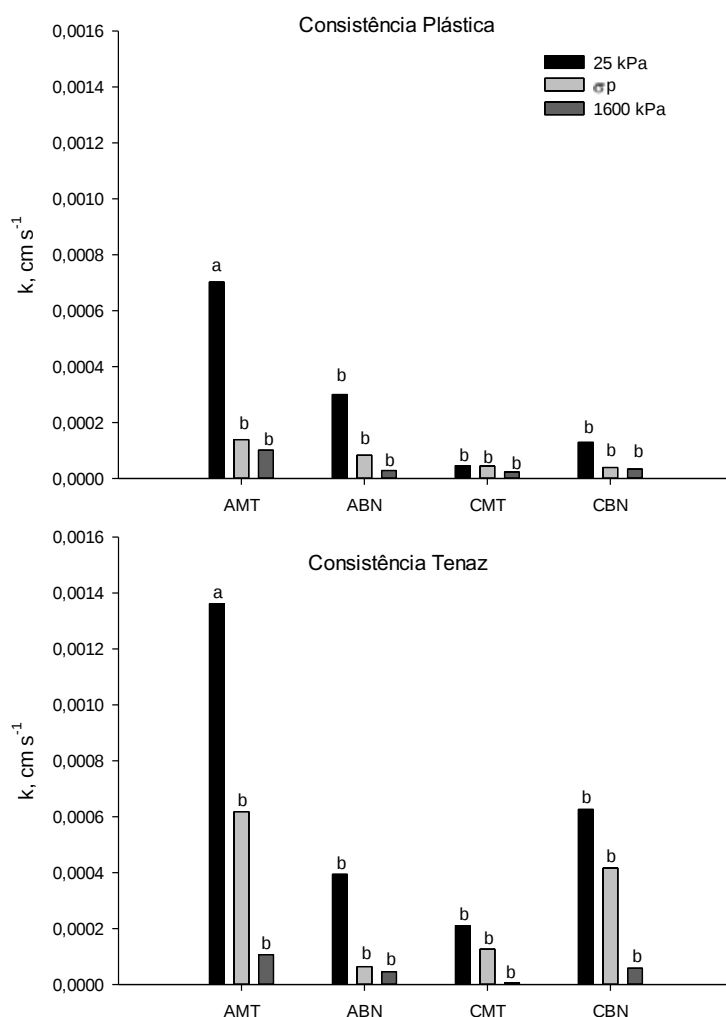


Figura 28. Valores médios de K , em relação a cada manejo/solo aplicado, em uma profundidade de 0-0,10 m, nas condições tenaz e saturado. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%.

6.3 Análise por processamento de imagens

A Figura 29 apresenta os valores médios de porosidade total nos corpos-de-prova estudados pelo processamento digital de imagens e a Figura 30 os dados médios da porosidade calculada.

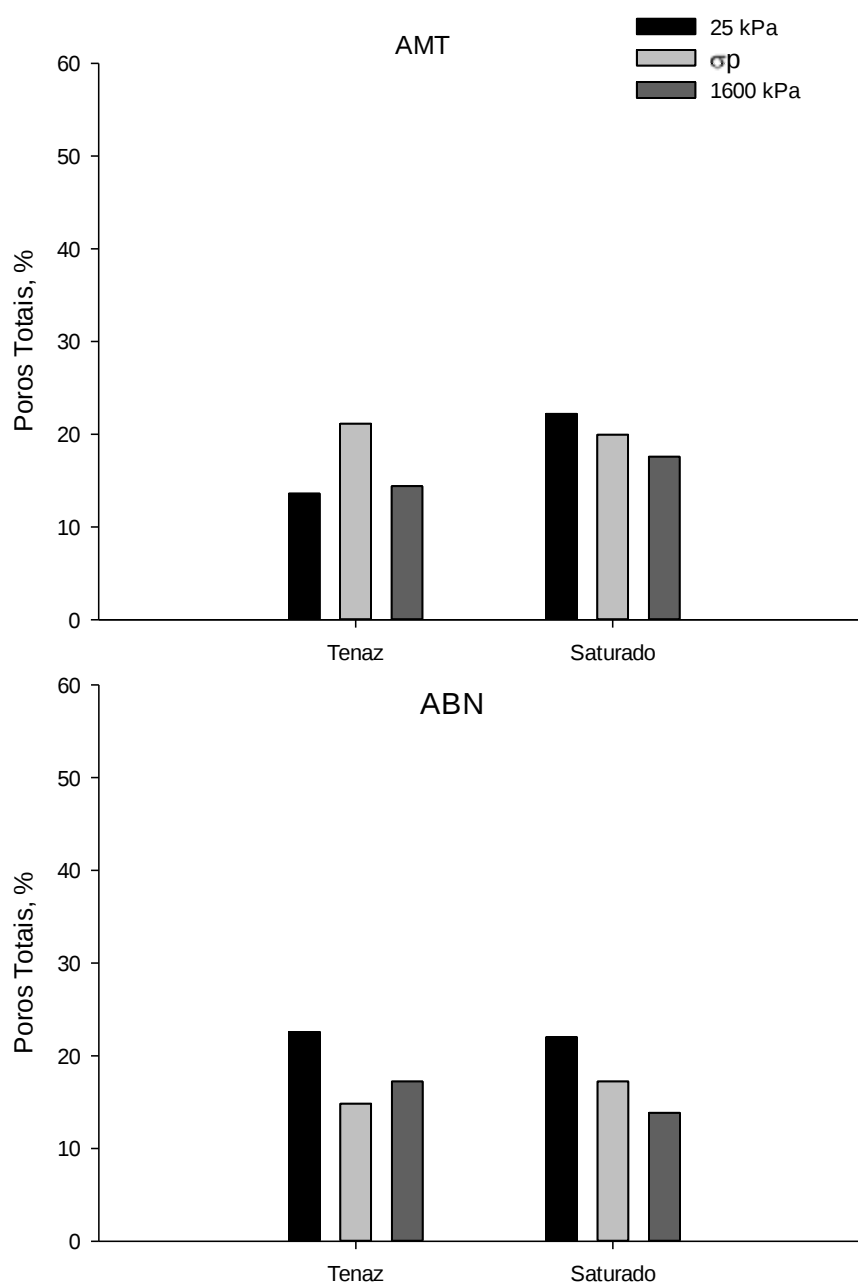


Figura 29. Dados médios de poros totais, obtidos pelo processamento digital de imagens.

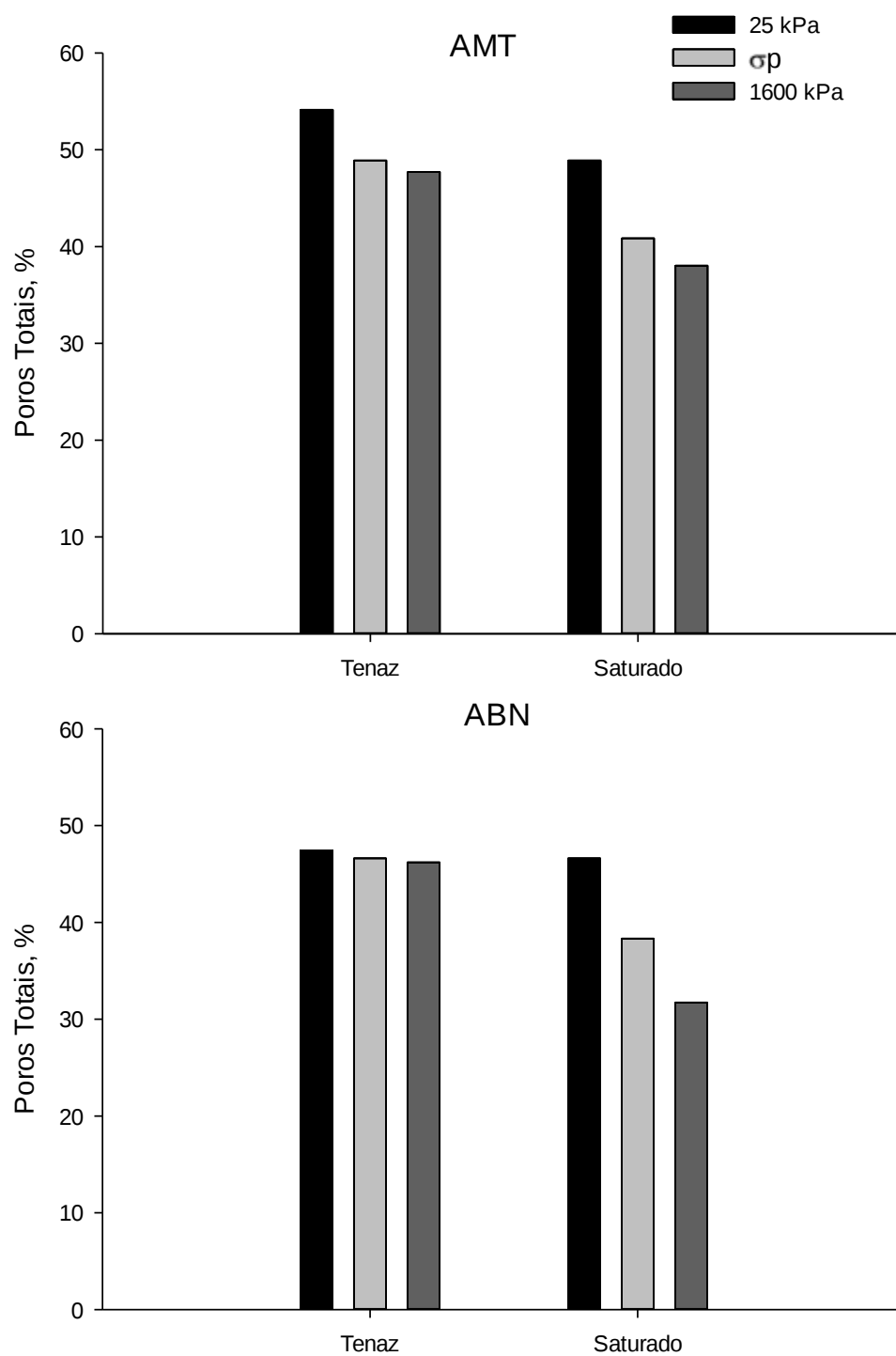


Figura 30. Valores médios da porcentagem de poros totais, obtidos pelo cálculo de VTP.

Para o VTP calculado, sempre com a maior porcentagem em 25 kPa seguido pelo σ_p e depois pela pressão de 1600 kPa, tanto no saturado quanto no tenaz. Os resultados da análise de imagens são completamente diferentes, pois nesse tipo de análise leva-se em consideração qualquer imperfeição ou rachadura nas amostras, o que não é considerado quando se calcula pela fórmula tradicional. Os solos saturados, para a análise de imagens seguem o mesmo padrão do tradicional, logicamente com valores bem diferentes, já os solos com menor teor de água apresentam comportamentos diferentes dos demais, isso se deve a prováveis rachaduras sofridas no meio dos anéis, quando se aplicavam as cargas, ocasionando assim fissuras que nesse tipo de análise podem ser confundidas com poros complexos.

De maneira geral, pode-se dizer que a análise digital de imagens, em conjunto com as observações micromorfológicas têm se mostrado uma eficiente técnica na quantificação de alterações na estrutura do solo, muito útil para diferenciar funções na porosidade entre sistemas de manejo (LAMANDÉ et al., 2003; PAGLIAI et al., 2004), porém, para solos com menores teores de água, podem haver restrições quanto as suas análises, pois alguns solos apresentam comportamentos diferenciados, como a dilatação e contração, nos solos com material 2:1.

As Figuras 31 a 42 representam os gráficos referentes a cada carregamento aplicado (25, σ_p e 1600 kPa) nos corpos-de-prova, para as consistências desejadas, obtendo-se gráficos de formatos de poros e a comparação com sua imagem binária mais representativa.

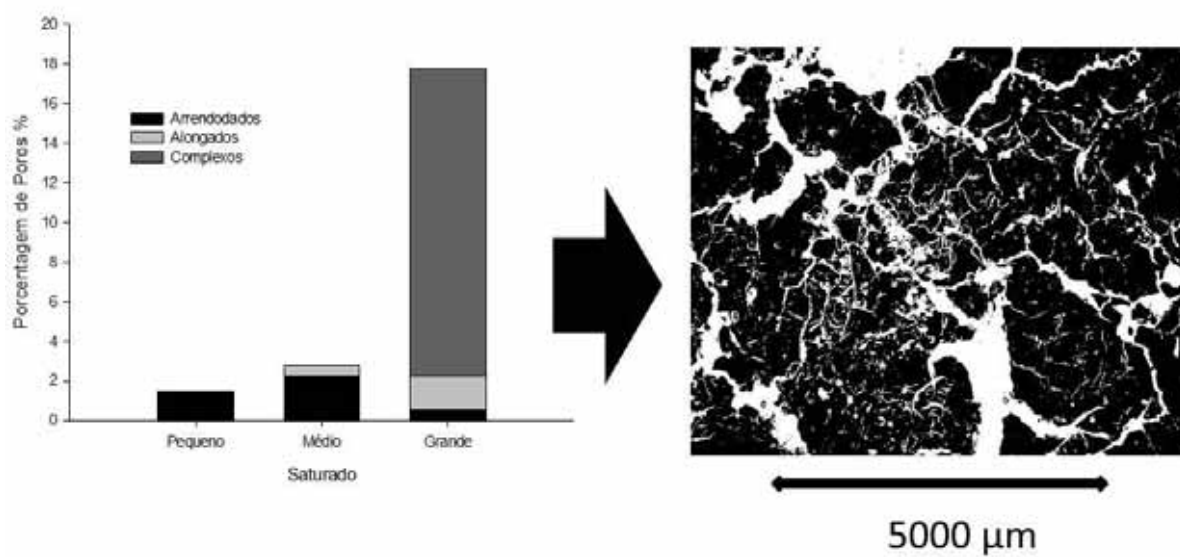


Figura 31. Distribuição do número de poros em classes, para ABN, pressão de 25 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

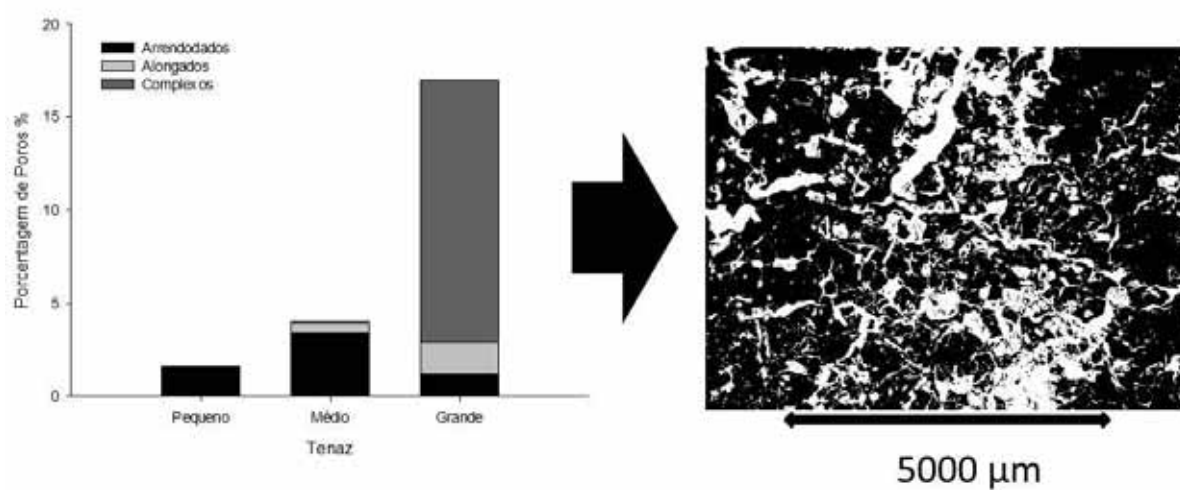


Figura 32. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 25 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

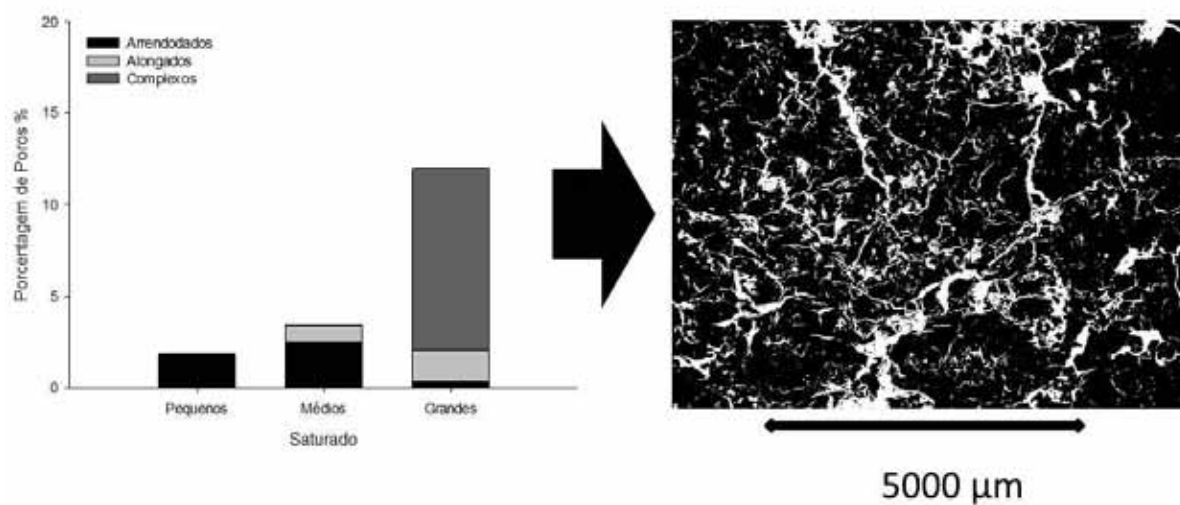


Figura 33. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de σ_p saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

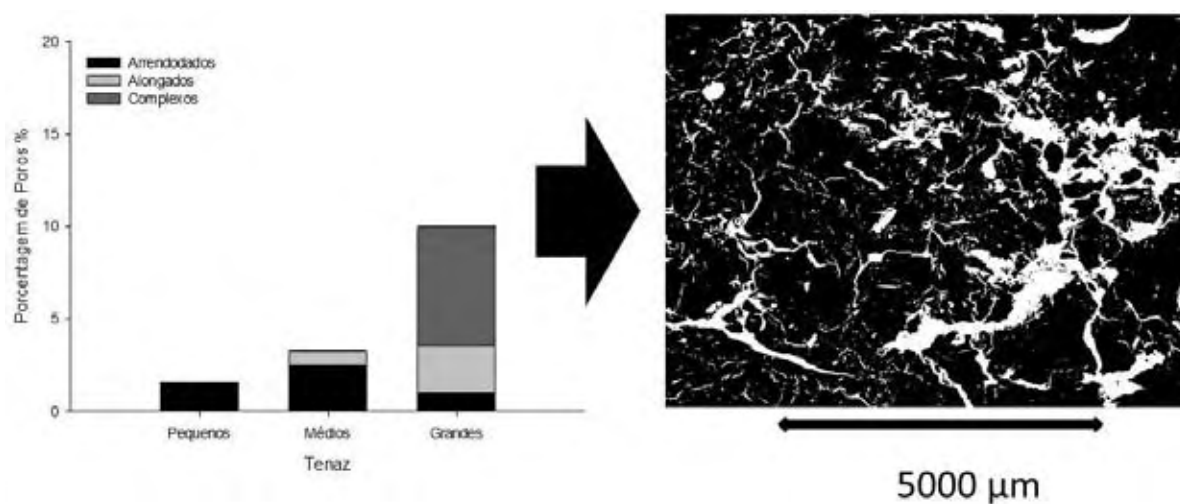


Figura 34. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de σ_p tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

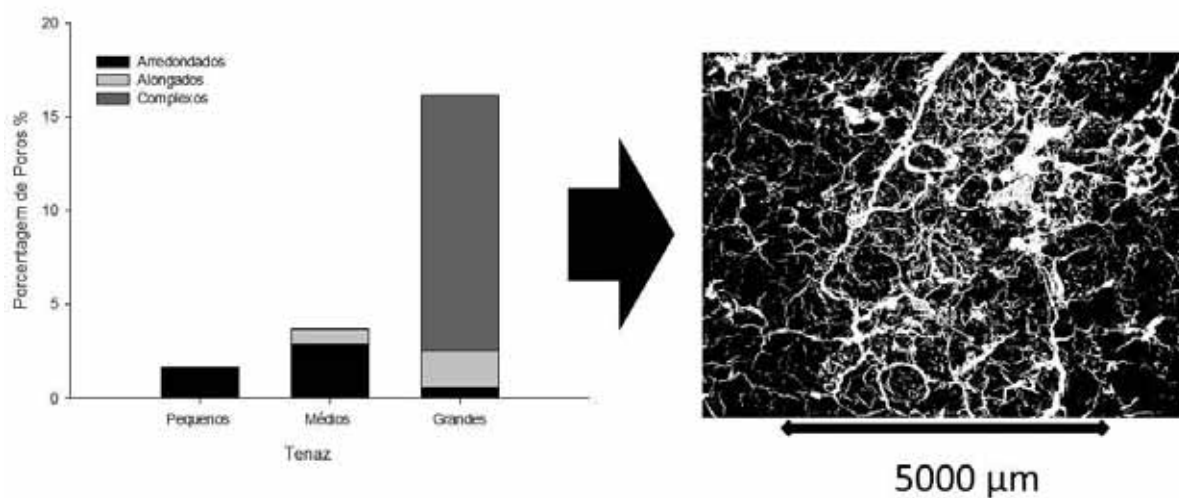


Figura 35. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 1600 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

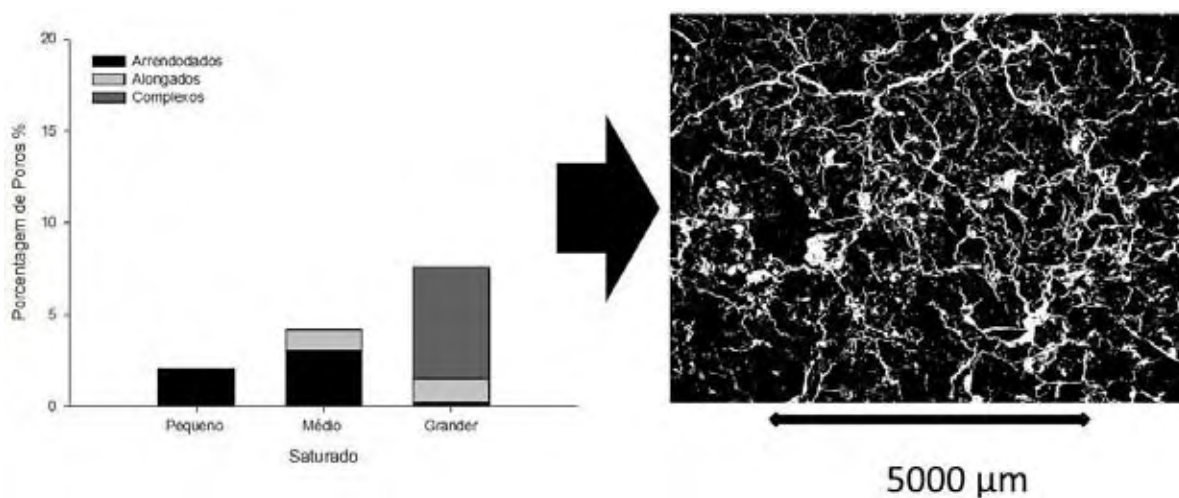


Figura 36. Distribuição do número de poros em classes de poros, para ABN, pressão de 1600 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

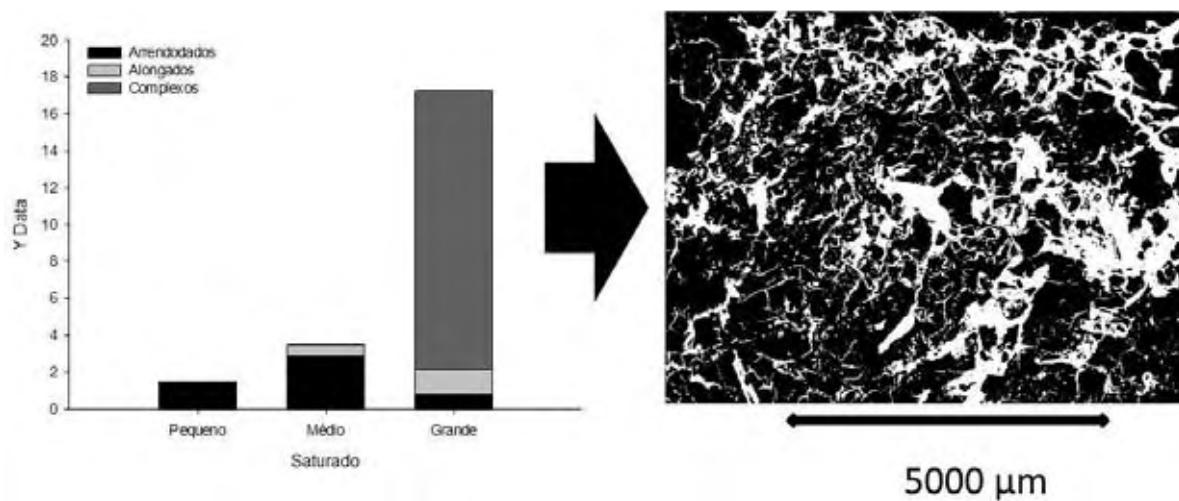


Figura 37. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 25 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

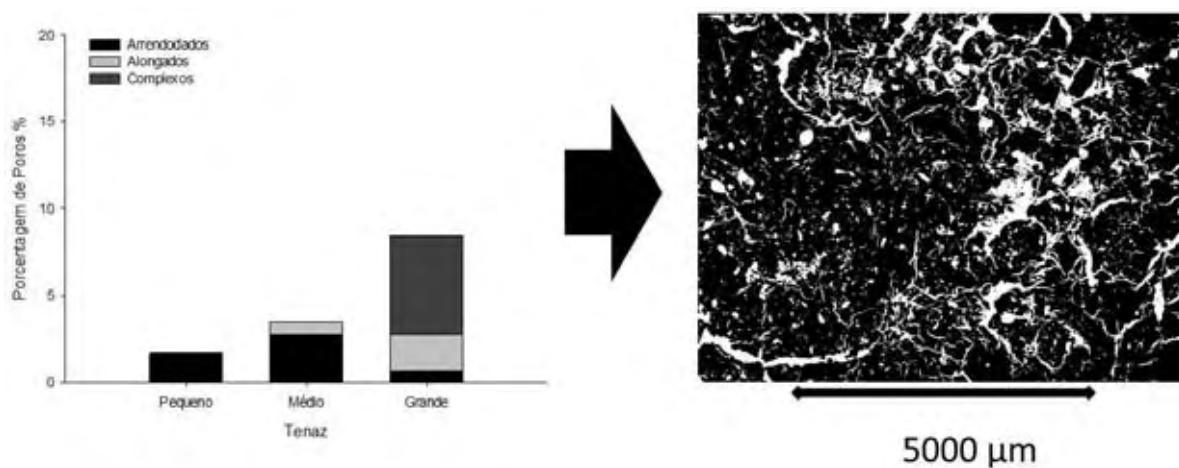


Figura 38. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 25 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

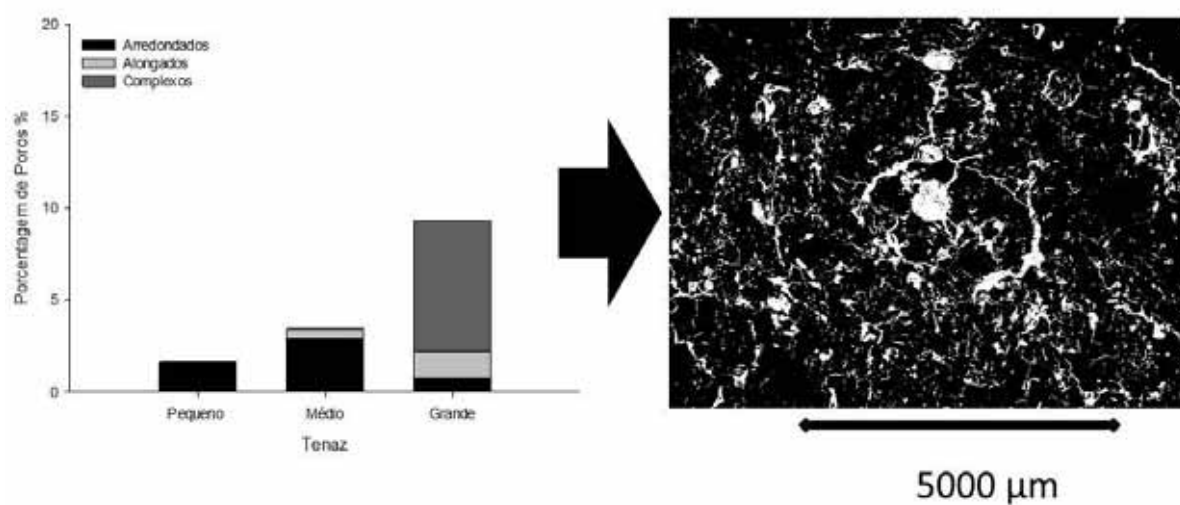


Figura 39. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de σ_p saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

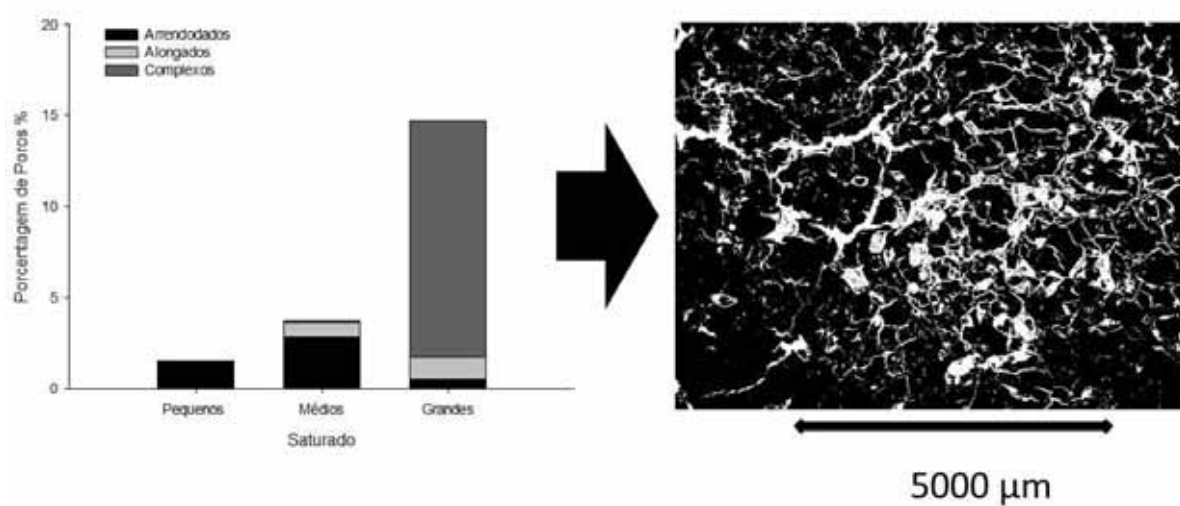


Figura 40. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de σ_p tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

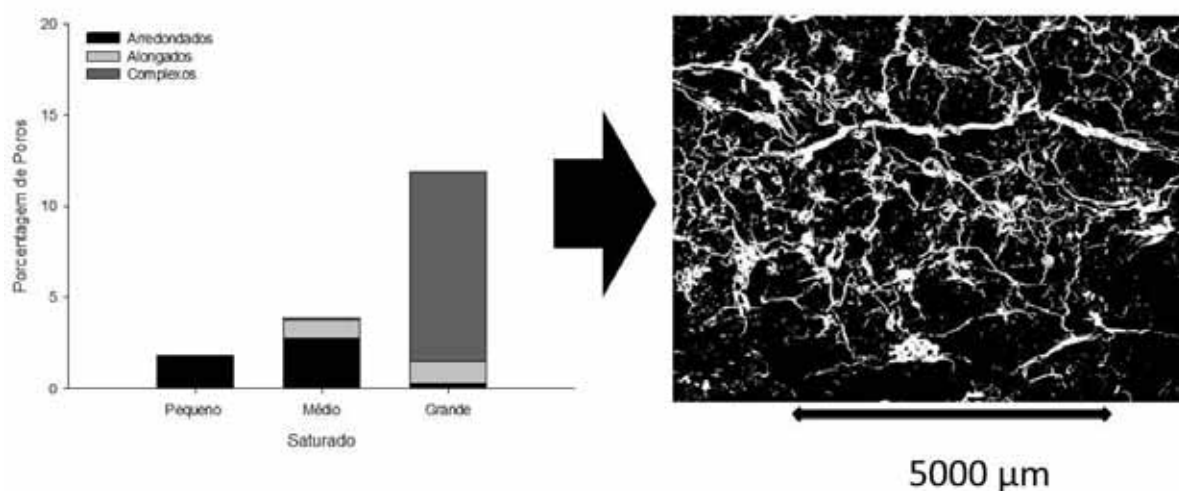


Figura 41. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 1600 kPa saturado. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

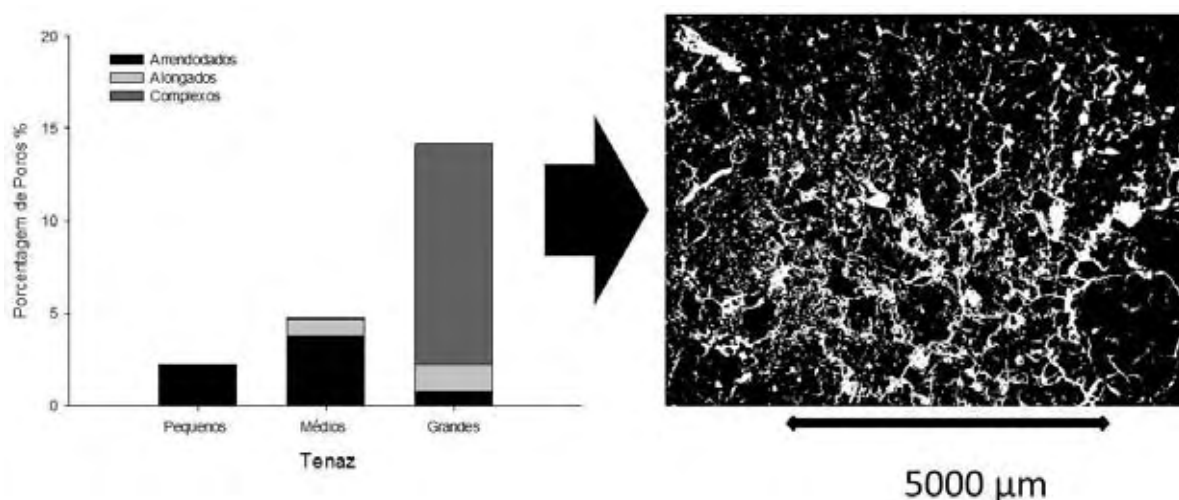


Figura 42. Distribuição do número de poros em classes de poros, para AMT, pressão de 1600 kPa tenaz. Imagem binarizada (porosidade em branco e fase sólida em preto).

Nas Figuras 31, 32, 37 e 38, que são referentes aos tratamentos de banana e mata nativa a uma pressão de 25 kPa, ABN saturado, ABN tenaz, AMT saturado, AMT tenaz, respectivamente, podemos notar que há uma distribuição de poros e grande quantidade de poros complexos, que são poros de empacotamento e canais. Alguns desses canais podem estar preenchidos por raízes em vários estádios de decomposição, ocorrendo ainda preenchimento relacionado à atividade da fauna do solo. Nota-se, também, que a estrutura do solo possui macro e microagregados em sua composição, segundo Silva et al.

(1998) esses macroagregados tem origem ligada aos altos teores de matéria orgânica presente na camada superficial.

Nos demais tratamentos, referentes as pressões de σ_p (saturado e tenaz) e 1600 kPa (saturado e tenaz), contidas nas Figuras 33, 34, 35, 36, 30, 40, 41 e 42, respectivamente, pode-se notar uma estrutura mais maciça, isso ocorre em solos compactados, onde ocorre a deformação dos agregados originais, parcial ou total e, dependendo do grau de compactação, agregados podem passar de uma forma granular pequena e muito pequena, para uma estrutura mais contínua, ou seja, maciça, como citam Castro et al. (2003), essa mudança causa a redução da porosidade total.

A predominância é de poros complexos, em todos os tratamentos. Nos tratamentos em que sofreram pressões mais elevadas, percebe-se que houve uma diminuição da porosidade, tanto de poros alongados, como de arredondados grandes e médios, porém os arredondados pequenos quase não se alteraram. Há presença de poros alongados é um importante fator, pois esse tipo de poro é importante do ponto de vista agrônômico, pois são tipicamente poros de transmissão (PAGLIAI et al., 1983).

A Tabela 4 apresenta os valores totais para cada tipo de poro analisado, obtidos através dos corpos-de-prova que foram submetidos a diferentes carregamentos, encontrando valores para poros arredondados, alongados e complexos.

Tabela 4. Dados dos tipos de poros presentes em cada tratamento descrito.

Tratamento	Tipos de poros		
	Arredondado	Alongado	Complexo
	%		
AMT 25 kPa Saturado	5,10	2,00	15,10
AMT σ_p Saturado	4,87	2,01	13,08
AMT 1600 Saturado	4,92	2,14	10,52
AMT 25 kPa Tenaz	5,04	2,84	5,72
AMT σ_p Tenaz	5,24	1,96	7,18
AMT 1600 Tenaz	6,82	2,30	12,01
ABN 25 kPa Saturado	4,24	2,25	15,52
ABN σ_p Saturado	4,68	2,57	9,98
ABN 1600 kPa Saturado	5,37	2,34	6,16
ABN 25 kPa Tenaz	6,16	2,33	14,09
ABN σ_p Tenaz	5,10	3,30	6,45
ABN 1600 kPa Tenaz	5,10	2,70	13,62

Curmi et al. (1994) estudaram o efeito do uso agrícola na modificação da estrutura e da porosidade do solo, verificaram que a compactação induzida pelo cultivo afetou, de forma diferencial, cada classe de poro, sendo que os poros oriundo da fauna e floram são os mais afetados. Esse fato é observado nas pressões de 1600 kPa, onde há um decréscimo dos poros do tipo complexos, nas pressões de σ_p , isso também acontece, em relação a menor pressão.

Na Tabela 5 foi possível observar as alterações na quantidade de poros por tratamento, observando que nos solos saturados houve uma redução nos poros complexos passando de 15,10% na pressão de 25 kPa para 10,52% na pressão de 1600 kPa, o mesmo ocorre com os poros arredondados. No ABN e de 15,52% em 25 kPa para 6,16%. Porém, com os poros arredondados não ocorreu o mesmo que no AMT, havendo um pequeno acréscimo com a pressão. O fato de ter ocorrido o aumento, mesmo que pequeno, na porosidade arredondada no ABN, leva a crer que esse aumento é devido à compactação do solo. Segundo Horn et al. (1995), há uma tendência dos macroporos transformarem-se em poros arredondados e/ou alongados, de menor tamanho, aplicada uma pressão a resistência do solo é superada.

Os solos na condição tenaz não seguem o mesmo comportamento, isso pode ser consequência das cargas aplicadas nos anéis, causando rachaduras ou fissuras nos solos, promovendo assim, o aumento equivocado da porosidade complexa. Observa-se que para AMT um aumento gradativo dos valores da porosidade complexa em função do aumento da carga. Em ABN, os valores encontrados para a carga referente σ_p estão de acordo com esperado, muito embora os resultados para a carga de 1600 kPa tenha sido muito alto, provavelmente, também, em decorrência das rachaduras impostas pela carga aplicada.

7 CONCLUSÕES

Os níveis de carregamentos aplicados aos corpos-de-prova provocaram alterações nos índices físicos e mecânicos do solo, sendo a intensidade destas alterações função da condição de consistência do solo, classe do solo e uso/manejo.

O processamento digital de imagens permitiu quantificar alterações na estrutura (macroporos, mesoporos e porosidade total) do Argissolo Vermelho-Amarelo, mostrando-se uma ferramenta sensível às variações do teor de água e dos carregamentos aplicados aos corpos-de-prova, confirmando, em parte, os resultados obtidos por avaliações e análises de rotina empregadas na física e mecânica do solo.

Os corpos-de-prova do Argissolo Vermelho-Amarelo, quando avaliados na condição "tenaz" e submetidos a carregamentos superiores a capacidade de suporte de carga do solo, definida pela pressão de préconsolidação (σ_p) superestimaram a quantidade de poros complexos, em decorrência das fissuras provocadas durante os ensaios de compressão uniaxial.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. Viçosa, 2008, 79 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil&TillageResearch**, Amsterdam, v.102, n.1, p.14-18, Jan. 2009.

ALMEIDA, A. B. **Propriedades físicas de um latossolo vermelho manejado com material orgânico e submetido à compactação**. Universidade Estadual Paulista, 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura). Botucatu: UNESP, 2009).

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28: 337-345, 2004.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B. S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.23-21, jan./fev. 2008.

BENDINI, H. N.; SILVA, R. B. Uso do NDVI e modelo linear de mistura espectral na determinação de áreas de interesse para estudos do uso de ocupação do solo na sub-bacia do

Rio Ribeira de Iguape. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza, **Anais ...** Fortaleza: UFC, 2009. 1. CD ROM. BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38:849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 557-580, 2004.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F. E.; BORGES, E. V. S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1663-1667, 1999.

BRANDÃO, V. dos S. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120p.

BULLOCK, P. The changing face of soil micromorphology. In: STOOPS, G.; ESWARAN, H. **Soil Micromorphology**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986. p. 21-38.

BULLOCK, P.; THOMASSON, A. J. Rothamsted studies of soil structure. II. Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 30, p. 391-413, 1979.

CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, J. R.; ROLOFF, G. A sustentabilidade de um Cambissolo após a colheita de Pinus no sistema fuste. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMA DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 11., 2000, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2000, p. 274-290.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: [s.n.], 1997. 132 p.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLodi, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W.J.; ARMANDO, M.S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:1153-1155, 2004.

CARVALHO JUNIOR, O. A. et al. **Quantificação do índice de vazios do solo utilizando técnicas de processamento digital de imagens**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento/ Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X: 60, 15p. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527-538, maio/jun. 1998.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: ICSMFE 1936. p.60-64.

CASTRO, S. S. de. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas**. Apostila. Goiânia/Campinas: UFG/UNICAMP/FUNAPE, 2002. 143 p.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (Eds). Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 107-164, 2003.

CBH-RB – Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul. **Relatório da Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 11**. Disponível em: < http://geolig.igc.usp.br/geoproc/rs_ugrhi_rb/app/RS-2522%20Pluviometria_pag281_324.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2012.

COLLARES, J. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v.32, n.3, p. 933-942, 2008).

CORTÉS-TARRÁ, I. L.; LUIZÃO, F.; FERNANDES, E; WANDELLI, E; TEIXEIRA, W; MORAIS, W.; BARROS, E. Relações entre os grupos funcionais da macrofauna e o volume dos macro-poros do solo em sistemas agrossilviculturais da Amazônia Central. CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 6, 2003, Fortaleza. **Anais...**, Fortaleza: Editora da Universidade Federal do Ceará, 2003. p.643-645

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásico**. Piracicaba, 1999, 130 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COOPER, M.; Vidal-Torrado, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S.; JORGE, L. A. C. Métodos e aplicações do processamento de imagens digitais. In: CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN NETO, L.; COLNAGO, L.A. (Ed.). **Instrumentacao agropecuaria: contribuicoes no limiar do nosso seculo**. Brasília: Embrapa-SPI ; São Carlos: Embrapa-CNPDI, 1996. p. 91-151.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1993. 90 p.

CURMI, P.; KERTTZMAN, F. F.; QUEIROZ NETO, J. P.. Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil). In: RINGROSE-VOASE A.J. & HUMPHERYS G.S., eds. Soil micromorphology: studies in management and genesis. In: INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 9., Townsville, 1994. Proceedings. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 596-579. (Developments in Soil Science, 22).

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1986. v.1, p.545-66.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965, v.1, p. 545-66.

DECAGON DEVICE, Inc. Mini disk infiltrometer: **User's manual version 10**. Disponível em: <http://www.decagon.com/education/minidisk-infiltrometer-manual/>. Acesso em: 18 jun. 2012.

DEEKS, L.K. et al.. Quantification of pore size distribution and the movement of solutes through isolated soil blocks. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, p. 65-86, 1999.

DIAS, F. da C. **Uso do software image j para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Notas de aulas de física do solo**. Lavras: Departamento de Ciência do Solo, UFLA, 1996. 168 p.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C.; AZEVEDO, M.B. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, Lavras, v.8, p. 103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Cambissolos em sistemas florestais. **Cerne**, Lavras, v.8, n.1, p.103-114, jan./fev. 2002.

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, S.R.; SANTOS, N.S.; ARAUJO JUNIOR, C.F. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p. 2245-2253, nov./dez. 2008.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do Solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 55 – 94, 2000.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-192, jun. 1996

.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114 p. (Tese de Doutorado).

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **ScientiaAgricola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.248-255, maio/jun. 2005.

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994, p. 3-21. (SpecialPublication, 35).

EFFGEN, E.M.; DARDENGO, M.C.J.D.; SILVA, P.A.; PASSOS, R.R.; EFFGEN, T.A.M. Caracterização de atributos físicos de solos em área sob cultivo de sorgo no sul do Estado do Espírito Santo. X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos-SP, p.2842-2845, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ENCIDE, A. P. **Métodos não convencionais para avaliação da porosidade e da densidade do solo de um latossolo vermelho**. 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In ... 45^a Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP. 2000.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed). Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2010.

FERRERAS, L.A.; BATISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:161-170, 2001

FIGUEIREDO, Getulio Coutinho et al. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. 2011, vol.35, n.2, pp. 389-402. ISSN 0100-0683.

FREDDI, O. da S., CENTURON, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. da. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, 2007.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**. Costa Rica: IICA, 1975.

FOLONI, J. S. S. **Crescimento radicular da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e de cinco adubos verdes em função da compactação do solo**. 1999. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38:947-953, 2003.

GEOMAPAS. **Mapa do Vale do Ribeira**. Disponível em: <<http://geomapas.net.br/mapa-regionais.html>>. Acesso em: 25 fev. 2012.

GOMES, G. L. **Diagnóstico de áreas degradadas por voçorocas no município de Alterosa, MG**. 2006. 59 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2006.

GOMES, M.R.M. **Análise de imagens no estudo da porosidade em latossolo cultivado com batata (*Solanumtuberosum*L.) sob dois sistemas de irrigação.** Universidade Estadual Paulista, 2008. 50 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura). Botucatu: UNESP, 2008.

GONÇALVES, F.C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos.** Universidade Estadual Paulista, 2011 96 p. Tese (Doutorado em Agricultura). Botucatu: UNESP, 2011.

GONZALEZ, R. F.; WOODS, R. E. **Digital ImageProcessing.** 3ª ed. Nova Jérsei: Person Education, 2007.

GONZALEZ, R. F.; WINTS, P.A. **Digital ImageProcessing.** Reading: Addison- Wesley Publishing, 1987, 431p.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Soil Science**, New York, v.6, n.1, p.65-100, Jan. 1987.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C., (Ed). **Mechanics andrelated process in structured agricultural soils.** Amsterdam: Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

HEINZE, B. C. L. B. **A importância da Agricultura Irrigada para o Desenvolvimento da Região Nordeste do Brasil.** 2002. 59 f. Monografia (MBA em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada) – ECOBUSINESS SCHOOL/ FGV, Brasília, 2002.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics.** New York: Academic Press Inc. 1982. 362 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Amsterdam, v.11, n.1, p.53- 71, Mar. 1988.

HORN, R.; DOMZZAI, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soil and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n. 1-2, p. 23-36, 1995.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade de um solo sob pastagem. **PesquisaAgropecuáriaBrasileira**, 35:1493–1500, 2000.

IORI, P. **Impacto do uso do solo em áreas de proteção permanente da sub-bacia Rio Ribeira de Iguape, SP.** Lavras, 2010, 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems and Environment**, 79: 9-16, 2000.

JAIN, A. K. **Fundamentals of digital image processing.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall International Editions, 1989.

JARVIS, N.J.; MESSING, L. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. **Soil Science Society of America Journal**, 59:27-34, 1995.

JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. Processamento de imagem em ciências do solo – raízes, morfologia e cobertura do solo. In: VAZ, C. M. P.; MARTIN-NETO, L; CRESTANA, S. (Org.). **Instrumentação avançada em ciências do solo.** São Carlos: Embrapa, 2007, cap. 7.

JORGE, J. A. **Física e manejo dos solos tropicais.** Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328 p.

JUHÁSZ, C. E. P. **Relação do solo-água-vegetação em uma Topossequência localizada na Estação Ecológica de Assis, SP.** 2005. 110 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador de qualidade física do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002, Cuiabá. **Resumos expandidos.** Cuiabá: SBCS, 2002. (CDROM).

KLEIN, V. A. **Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira.** Passo Fundo: ed. UPF, 2005. 61 p.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.211-218, fev.1999.

LAL, R.; MILLER, F.P. Soil quality and its management in humid subtropical and tropical environments. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 17., 1993, Palmerston North. **Proceedings..** Palmerston North: New Zealand Grassland Association, 1993. p.1541-1555

LAMANDÉ, M.; HALLAIRE, V.; CURMIA, P.; PÉRÈS, G.; CLUZEAU, D. Changes of pore morphology, infiltration na earthworm community in a loamy soil under diferente agricultural managements. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n.3, p. 637-649, 2003.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America Special Publication Number 35, 1994. p.37-51.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil&TillageResearch**, Amsterdam, v.19, n.2-3, p.275-286, Feb. 1991.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R. de; LEÃO, T. P.; COOPER, M., SILVA, A. P. da; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005.

MACHADO, A. de M. M.; FAVARETTO, N. Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos. In: LIMA, M. R. et al. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/ Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 234-254.

MEDEIROS, R. D. de; SOARES, A .A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 940-947, 2005.

MERMUT, A. R. **Introduction to soil micromorphology**. Saskatoon: University of Saskatchewan Department of Soil Science, 1992. 115 p.

MIRANDA, E. E. V.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PINTO, J. A. O.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; LASMAR JUNIOR, E. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, n.6, p. 1506-1515, nov./dez. 2003.

MULTIQUIP DO BRASIL. **Manual de compactação de solo**. Disponível em: <http://www.multiquip.com.br/imagens/catalogo/Catalogo_Compacta%C3%A7%C2%A6odeSolo_20050822132416.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2012.

MURPHY, C.P. **This section preparation of soil and sediments**. Rothamsted: A. B. Academic Publ., 1986. 149 p.

NEVATIA, R. Image segmentation. In: YONG, T. Y.; FU, K. S. **Handbook of pattern recognition and image processing**. London: Academic Press, 1986. P. 215-232, 1978.

NUNES, L.A.P.L. **Qualidade de um solo cultivado com café e sob mata secundária no Município de Viçosa-MG**. Universidade Federal de Viçosa, 2003. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Viçosa: UFV, 2003, 102p.

OLSZEWSKI, N.; COSTA, L. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; RUIZ, H. A.; ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 901-909, 2004.

PAGLIAI, M. **Effects of different management practices on soil structure and surface crusting. Microphologie des sols – soil micromorphology**. In: Internacional working meeting in soil micromorphology. Proceedings. Plasir : Association Française pour L' Étude du Sol, p. 415-421. 1987.

PAGLIAI, M.; BIISDOM, E.B.A.; LEDIN, S. Changes in surface structure (crusting) after application of sewage sludge and pig slurry to cultivated agricultural soils in northern Italy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 30, p. 35-53, 1983.

PÉREZ, D. H. **Gênese, transformação e evolução de sistemas pedológicos em Conceição do Araguaia – Pará: relações com a morfologia da vertente**. 1999. Dissertação (Mestrado

em Geografia e Organização do Espaço) – UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1999.

PELÁ, A. **Efeito de adubos orgânicos provenientes de dejetos de bovinos confinados nos atributos físicos e químicos do solo e na produtividade do milho**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

PIRES, L.F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água**. 2006. 271 p. Tese (Doutorado em Ciências/ Energia Nuclear na Agricultura e no Meio Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2006.

PIRES, L. F. et al. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, RJ, v. 81, n.1, p.151-161, 2009.

PROTZ, R.; SHIPITALO, M.J.; MERMUT, A.R. Image analysis of soil- present and future. **Geoderma**, Amsterdam, v.40, p.115-125, 1987.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.** 27:29-48, 2003.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação de solo: Causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

RESENDE, M; CURTI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia**: Base: para distinção de ambientes. 5 ed. Lavras: Ed. UFLA, 2002. 322 p.

RESERVA DA BIOSFERA. **Diretrizes para a política de conservação e desenvolvimento sustentável da Mata Atlântica**. Série Caderno da Reserva da Biosfera, Caderno 13, CETESB, São Paulo, 1999.

RINGROASE-VOASE, A. J. Measurement of soil macropore geometry by analysis of sections through impregnated soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 183, p. 27-47, 1996.

RINGROSE-VOASE, A. J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 673-684, 1984.

RINGROSE-VOASE, A.J.; NYS, C.. One-dimensional image analysis of soil structure. 11. Interpretation of parameters with respect to four forest soil profiles. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, n.3, p.513–527, 1990.

SENA JUNIOR, D. G.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M. Algorithm for classification of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*, Smith) damaged corn plants on digital images. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 5, n. 3: p. 502 – 509, 2001.

SCHALLER, F. W.; STOCKINGER, K. R. A comparison of five methods for expressing aggregation data. **Soil Science of the Society American Proceeding**, Madison, v. 17, p. 310-313, 1953.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing**: models and methods for image processing. 2. ed. San Diego, CA: Academic Press, 1997. 522 p.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. Counter analysis methods for grouping means in the analysis of variants. **Biometrics**, Washington, v.30, p. 507-512, 1974.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.1, p. 58-64, 2009.

SILVA, A. J. N. et al. Influência do cultivo da cana-de-açúcar em latossolos amarelos coesos do Estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 515-525, 1998.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; Camada de resíduo e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.1, p.89-93, jan. 2007.

SILVA, A. P. Distribuição de poros de Argissolo Vermelho-Amarelo sob pomares de laranja: uma abordagem multivariada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro. UFRJ, 1997. 1 CD-ROM.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v. 184, n. 2, p. 323-329, 1996.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.1-18.

SILVA, M. A. S. da; MAFRA, Á. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 491-497, 2005b.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVAF, A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 973-983, 2003.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MASQUETTO, B. J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 607- 615, jul./ago. 2007.

SILVA, R. B. da **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolosob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. Lavras, 2002, 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SILVA, R. B.; MASQUETTO, B. J. CA-Linker: sistema para monitoramento, aquisição e processamento de parâmetros físicos e mecânicos em tempo real, gerados em ensaios de consolidação uniaxial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFC, 2009. 1 CD-ROM.

SILVA, S. H. M. G. **PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA IDENTIFICAÇÃO DA SIGATOKA NEGRA EM BANANAIS UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. 2008. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

SILVA, V. R. da, REINERT, D. J., REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 785-801, 2000.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; CASTRO, S. S. de. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p.1005 - 1014, 2005.

SOUZA, Z. M.; MARQUES-JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.41, n.3, p. 497-492, mar. 2006.

SPÓSITO, M. B. **Dinâmica temporal e espacial da mancha preta (Guignardiacitricarpa) e quantificação dos danos causados à cultura dos citros**. Tese de Doutorado: ESALQ - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER Jr., J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.

TEIXEIRA, E. F.; CICERO, S. M.; NETO, D. D. Análise de imagens digitais na avaliação de plântulas de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 28, n. 2, p.159 – 167, 2006.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organicmatterandwater-stableaggregates in soil. **Journal Soil Science**, 33:141-162,1982.

TOMA, R. S. **Efeito da aplicação de composto orgânico sobre o processo de encrostamento e a recuperação de solos degradados pela erosão hídrica**. Dissertação (Mestre/Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2008.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDE, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; MOREIRA, J. A. A.; URCHEI, M. A.; HERNANI, L. C.; GAUDÊNCIO, C. A.; PRIMAVESI, O.; FRANZ, C. A. B. Compactação do solo. In: SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. (Org). **Sistema Pantio Direto**. Brasília: Embrapa - SPI, 1998. p. 104-118.

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em Ciências do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2:195-276, 2002.

VASCONCELOS, A. C. M.; PRADO, H.; LANDELL, M. G. A. **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção**. Ribeirão Preto: IAC, 2004. 31 p. (Relatório de pesquisa do Projeto RHIZOCANA).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre a qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 11-19, 2004.

WILDING, L. P.; FLACH, K. W. Micropedology and soil taxonomy. In: **Soil micromorphology and soil classification**. Soil Science Society of America, Madison, p. 1-15, 1985.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society American Journal**, p. 1024-1030, 1997.

ZIPARRO, V. B.; GUILHERME, F. A. G.; ALMEIDA-SCABBIA, R.; MORELLATO, L.P. Levantamento florístico da Floresta Atlântica no Sul do Estado de São Paulo, Parque Estadual Intervales, Base Saiba-dela. **Biota Neotropica** 5(1), p. 1-20, 2005.