**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Influência do tamanho da amostra na determinação da curva de
retenção da água no solo**

Maria Laiane do Nascimento Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2016**

Maria Laiane do Nascimento Silva
Engenheira Agrônoma

**Influência do tamanho da amostra na determinação da curva de retenção da
água no solo**

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Silva, Maria Laiane do Nascimento

Influência do tamanho da amostra na determinação da curva de retenção da água no solo / Maria Laiane do Nascimento Silva. - - Piracicaba, 2016.

77 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Tamanho da amostra 2. Curva de retenção 3. Distribuição de poros 4. Capilaridade
I. Título

CDD 631.432
S586i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A meus pais, Francisco (Seu Lineus) e Raimunda,

e aos meus irmãos:

Arlan, Francisco (Orlando), Maria (Iolanda),

Francisca (Orleane) e Raimundo,

por todo amor e dedicação,

*Com amor **DEDICO.***

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar-me neste caminho, sem nunca me desamparar, pelas pessoas e oportunidades colocadas na minha vida, sem as quais não teria chegado até aqui.

A minha família, fonte maior de inspiração, por acreditar no meu potencial e acima de tudo por todo o amor e dedicação. Cada um dos meus passos é uma vitória nossa.

Aos meus professores, que tanto admiro e que contribuem para minha formação, profissional e pessoal, em especial, ao meu orientador, Paulo Leonel Libardi, à Jeane Cruz Portela e a Francisco de Assis de Oliveira, pela amizade, orientação.

Ao Fernando Henrique Setti Gimenes, que tanto me ajudou e instruiu no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Jussiara, Mikhael, Lília, Patrícia e Iara, que apesar da distância nunca estiveram ausentes.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Biossistema, pela convivência e aprendizado: Professor Sérgio O. Moraes, Professor Jarbas H. de Miranda, Verena, Helon, Ismael, Fernando Gimenes, Cezar, Luciano e Fernando Thomazini.

Ao Christopher Silva de Pádua, por toda ajuda, pela sua paciência e atenção.

Aos amigos da vila da Pós-graduação da Esalq: Leôncio, Veronika, Mônica, Renata, Daniela, Maria, pela convivência e aprendizado por meio das diferenças de cada um.

E a Esalq/USP e Cnpq, pela oportunidade de ter novos aprendizados e experiências.

*“Se o que nos consome fosse apenas fome
Cantaria o pão
Como o que sugere a fome
Para quem come
Como o que sugere a fala
Para quem cala
Como que sugere a tinta
Para quem pinta
Como que sugere a cama
Para quem ama
Palavra quando acesa
Não queima em vão”*

José Chagas

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 DESENVOLVIMENTO	17
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1.1 O solo como um sistema natural, sólido e poroso.....	17
2.1.2 Retenção da água no solo.....	18
2.1.3 Capilaridade	20
2.1.4 Curva de retenção da água no solo	21
2.1.5 Fatores que afetam a curva de retenção.....	24
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.2.1 Locais de amostragem	26
2.2.2 Amostragem	27
2.2.2 Caracterização e atributos dos solos	29
2.2.3 Curvas de retenção	31
2.2.4 Distribuição do tamanho dos poros do solo.....	33
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.3.1 Atributos físicos do solo que influenciam a retenção de água.....	35
2.3.2 Curvas de retenção	39
2.3.2.1 Latossolo	39
2.3.2.2 Nitossolo.....	43
2.3.3 Distribuição do tamanho dos poros do solo.....	48
2.3.3.1 Latossolo	48
2.3.3.2 Nitossolo.....	56
3 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS.....	65
ANEXO.....	71

RESUMO

Influência do tamanho da amostra na determinação da curva de retenção da água no solo

A curva de retenção da água no solo é um dos principais instrumentos para avaliar a qualidade física dos solos e possibilitar seu manejo adequado. Por meio da Teoria da Capilaridade vários equipamentos foram desenvolvidos para determinar a intensidade com que a água está retida ao solo, porém, pouco se tem dado atenção para verificar se os pressupostos para o real funcionamento da teoria estão sendo atendidos. Um aspecto refere-se ao tamanho da amostra utilizada para determinar a curva de retenção, de modo que haja continuidade dos feixes capilares na amostra e placa porosa. Desta forma, este trabalho propõe avaliar diferentes tamanhos de amostra indeformada para a determinação da curva de retenção. Para isso, coletaram-se amostras em anéis volumétricos cilíndricos de três tamanhos (altura) diferentes (T1 – 0,075 m; T2 – 0,05 m; T3 - 0,025 m;) e mesmo diâmetro interno (0,07 m), dos horizontes diagnósticos de um Latossolo e um Nitossolo em áreas experimentais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), Piracicaba - SP. Realizou-se a caracterização física destes solos, por meio da análise granulométrica, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total e teor de carbono orgânico. As curvas foram determinadas para cada tamanho de amostra, utilizando-se o Funil de Haines, para as tensões 0,5, 1, 4, 6 e 10 kPa, e a Câmara de Pressão de Richards para 33, 100 e 500 kPa. As curvas de retenção foram ajustadas pelo modelo utilizado por van Genuchten. Estimadas as curvas, avaliou-se a distribuição de poros do solo das amostras, determinando-se a curva de frequência acumulada de poros em função do logaritmo do raio e, depois pela diferenciação das equações de ajuste das curvas de retenção, a curva diferencial de frequência acumulada de poros. Os resultados mostram que o Latossolo, por ter textura arenosa no horizonte estudado, não apresentou diferença significativa nas curvas de retenção para os tamanhos das amostras estudadas. Verificou-se pouca modificação na distribuição dos poros deste solo, que possui teor elevado das frações areia fina e muito fina, e desenvolveram papel importante para a retenção de água. O Nitossolo, por sua vez, apresentou diferença significativa da curva obtida pela amostra de menor tamanho (T3), havendo maior retenção de água com a diminuição do tamanho da amostra. Devido a sua textura muito argilosa, o arranjo estrutural deste solo foi diferenciado ao se utilizar as amostras maiores, com provável interrupção e descontinuidade dos feixes capilares. Consequentemente, houve também alteração na distribuição dos poros, com redução dos mesoporos e aumento dos microporos. Desta forma, pode-se concluir que o tamanho da amostra influenciou a curva de retenção da água devido à complexidade estrutural do solo, que provavelmente é diferente nas amostras maiores por causa da continuidade dos feixes capilares, principalmente no Nitossolo. Em outras palavras, quanto menor o tamanho da amostra há menor diferenciação no arranjo de poros, ou seja, maior proximidade da real condição do solo e, assim, uma interpretação da retenção de água “mais correta” por meio da Teoria da Capilaridade.

Palavras-chave: Tamanho da amostra; Curva de retenção; Distribuição de poros; Capilaridade

ABSTRACT

Sample size effect on the determination of the soil water retention curve

The soil water retention curve is one of main tools to assess the physical quality of the soil and to make possible its adequate management. By means of the Capillary Theory, many instruments have been developed to determine the water retention forces in soil, but, little attention has been given to check whether the assumptions for the application of the theory are being attended. One aspect relates to the sample size used to determine the retention curve, so that there is capillary continuity of the sample and porous plate. Thus, this study aimed to evaluate different sizes of undisturbed cylindrical samples for determination of the retention curve. The samples were collected from diagnostic horizons of Latosol and a Nitosol, in experimental areas of the Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), Piracicaba - SP. Three volumetric rings with three different heights (T1 – 0,075 m; T2 – 0,05 m; T3 - 0,025 m;), were used the diameter of the rings were the same for the three sizes (0,07 m). The physical characterization soils were made by the granulometric analysis, bulk density, particle density, porosity and organic carbon. The curves were determined for each sample size, using the Haine's funnel, for tensions 0.5, 1, 4, 6 and 10 kPa, and Richard's pressure chamber for 33, 100 and 500 kPa. The pore size distribution of the soil was evaluated first by determining the cumulative frequency curve of pore radius, and then, by differentiating fitting equation of fluis curve to obtain a differential curve of pore cumulative frequency. The retention curves were fitted by the model used by Van Genuchten. The results showed that in the Latosol there was no significant difference in retention curves for the sizes of the samples studied. There was little change in pore distribution of the fluis soil with high content of fractions fine and very fine sand, that developes significant role in soil water retention. The Nitosol exhibited significant difference of the curve obtained by the smallest size sample (T3), with greater water retention with the decreasing of the sample size. Because of its very clayey texture, the structural arrangement of this soil was different when larger samples were used, with probable interruption and discontinuity of capillaries. Consequently there was also a change in the pore distribution, with reduction of mesopores and an increase of micropores. Thus, it can be conclude that the sample size influenced the soil water retention curve due to the structural complexity of the soil that probably is different in the bigger sample because of the continuity of the capillary budles fluit was more affected in the Nitosol. In other words, the smaller the sample size, the smaller the difference in the arrangement of pores, that is, more closeness of the actual condition of the soil and so a "more correct" interpretation of soil water retention by capillary theory.

Keywords: Retention curve; Sample size; Pore size distribution; Capillarity

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material sólido e poroso, portanto, composto de uma parte sólida que são partículas minerais e orgânicas de variada composição, forma e tamanho (sólidos do solo) e de um espaço poroso (poros do solo) resultante do arranjo destas partículas o qual pode ser ocupado por uma solução gasosa (ar no solo) e/ou por uma solução aquosa (água no solo). Pode-se definir, assim, um sistema sólido-solução-ar dinâmico e complexo, cujos processos que dentro dele ocorrem resultam da interação entre suas três fases (sólido, líquido e gasoso) e as diversas formas de vida que nele se desenvolvem. Dessa forma, a compreensão de como acontecem essas interações é de grande importância para que haja o emprego de técnicas adequadas de uso e manejo deste sistema de forma sustentável.

O movimento da água no solo se dá no sentido da diminuição do seu potencial total que é o estado energético da água no solo em relação ao de outra que não tem interação com a matriz, e pode ser quantificado pela combinação dos seguintes componentes: o potencial gravitacional, o potencial mátrico e o potencial de pressão. Dentre estes, o potencial mátrico não pode ser medido analiticamente, assim a curva de retenção da água no solo ou simplesmente curva de retenção tem sido a forma mais utilizada para ilustrar a relação entre o conteúdo de água no solo e a energia com que ela está retida (potencial mátrico). Vários métodos foram desenvolvidos com base na Teoria da Capilaridade para quantificar a água no solo em função de seu potencial mátrico, dentre eles pode-se destacar a Câmara de Pressão com placa porosa (ou de Richards) e o Funil de Placa Porosa (ou de Haines).

A curva de retenção é um dos principais instrumentos para avaliar a qualidade física dos solos e possibilitar o seu manejo adequado. Porém, é importante deixar claro que esses resultados partem de um modelo teórico que trata o solo como um conjunto de capilares, quando na verdade ele é completamente irregular e heterogêneo. Dessa forma, as análises e determinação da curva devem ser feitas de modo que as amostras de solo apresentem continuidade entre os poros da placa e amostra e o mínimo de modificação estrutural, para que a retenção de água possa ser explicada pela teoria da capilaridade.

A manutenção da estrutura do solo nas amostras destinadas à determinação da curva de retenção é um importante fator que precisa ser considerado. O espaço poroso deve ter o mínimo de modificações, para que se mantenha a conectividade entre os poros na amostra, de forma que estes funcionem como capilares onde acontecem as interfaces água/ar, assim como ocorre naturalmente no solo. Neste sentido, o tamanho da amostra (indeformada) para realização das análises e obtenção do potencial mátrico (ou tensão) deve ser levado em consideração, pois pode interferir diretamente na manutenção do arranjo estrutural do solo dentro da amostra.

Outro fato importante é a constituição granulométrica dos solos. Solos arenosos e argilosos se comportam de forma diferente em relação à retenção de água. Solos mais argilosos conseguem reter maior conteúdo de “água capilar”, devido à quantidade superior de microporos, o que permite maior interação entre as moléculas de água e as cargas dos colóides. Além disso, solos argilosos apresentam maiores teores de matéria orgânica em comparação àqueles mais arenosos, que é um fator relevante para a retenção de água, em razão de sua elevada quantidade de cargas e superfície específica. Solos de textura arenosa propiciam uma rápida infiltração, devido seu maior espaço poroso, restando menos de água.

É fato que pouco se têm dado atenção para a amostragem de unidades com estrutura indeformada a fim de serem submetidas aos instrumentos citados para determinação da curva de retenção. Verifica-se que não há padronização do tamanho dos anéis volumétricos, pelo contrário o que se percebe é uma ampla variação, sendo muitas vezes escolhidos aleatoriamente. A partir destas constatações, propõe-se que a variação do tamanho dos anéis volumétricos exerce influência sobre a curva de retenção e que há um tamanho mais adequado para realização dessa análise que comprometa o mínimo possível a qualidade estrutural das amostras e a veracidade dos resultados.

Assim, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de avaliar diferentes tamanhos de amostra indeformada destinada à determinação da curva de retenção da água no solo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 O solo como um sistema natural, sólido e poroso.

O solo pode ser definido de diferentes formas, de acordo com sua utilização. É o meio para crescimento de plantas e habitat para várias formas de organismos vivos, local onde ocorre a reciclagem dos resíduos vegetais e animais, supre e purifica a água na natureza e atua como modificador da atmosfera (BRADY; WEIL, 2012). Para o estudo da Física do Solo e Água no Solo, é considerado como uma mistura de partículas sólidas de natureza mineral e orgânica entremeadas por poros que podem conter ar ou água (LIBARDI, 2012).

A parte sólida do solo consiste principalmente de partículas minerais e substâncias orgânicas de várias formas e tamanhos chamada de sólidos ou matriz do solo. A porção mineral do solo pode ser resultante da ação vulcânica ou da desintegração de rochas sólidas por ação física, química e biológica (intemperismo). A fração orgânica é constituída por organismos ativos bem como resíduos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição.

A distribuição das partículas minerais do solo quanto ao tamanho denomina-se textura, sendo classificadas em três frações, areia, silte e argila. A textura constitui-se numa das características físicas do solo mais estáveis, apresentando grande importância tanto na identificação e classificação, quanto na predição do seu comportamento (VAN LIER, 2010). Interfere em diversas características do solo como retenção de água, velocidade de decomposição da matéria orgânica, capacidade de lixiviação, suscetibilidade a erosão hídrica e eólica, compactação, capacidade de troca catiônica (CTC), grau de agregação das partículas, além de influenciar atributos físicos como densidade do solo e porosidade (BRADY; WEIL, 2008).

Entende-se por estrutura o arranjo das partículas do solo e do espaço poroso entre elas (MARSHALL 1962). As frações minerais e orgânicas se unem através de processos físicos, químicos e biológicos formando os agregados, considerados unidades básicas na organização estrutural do solo. A estrutura do solo embora não seja considerado um fator de crescimento para as plantas, exerce influência direta sobre movimentação de água, transferência de calor, aeração, densidade do solo e

porosidade (LETEY, 1985), e pode ser alterada pelas práticas de manejo do solo e dos cultivos agrícolas (TORMENA et al., 1998; PIRES et al, 2008).

A densidade do solo é um dos atributos mais influenciados pelo arranjo estrutural e manejo do solo, pois relaciona uma massa de solo e o volume ocupado pelos sólidos e poros. É afetada por atividades que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros (KLEIN; LIBARDI, 2002). Assim como pelos processos naturais de adensamento.

O estudo da porosidade do solo é uma das formas de caracterizar e quantificar as propriedades do solo (GUERIF, 1987). É a fração volumétrica do solo ocupada com ar e/ou água, sendo o espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução no solo (HILLEL, 1970). Além disso, a distribuição do espaço poroso do solo condiciona o seu comportamento físico-hídrico (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Algumas classificações de diâmetro de poros foram propostas por diversos pesquisadores. Kiehl (1979) classificou como macroporos aqueles que possuem diâmetro maior que 60 μm , e microporos, menor que este valor. Enquanto para Richards (1965), USDA (1972) e Embrapa (1997) o diâmetro que classifica em macro ou microporos é aquele superior ou inferior a 50 μm respectivamente. Koorevaar et al., (1983), incluiu em sua classificação um valor intermediário, os mesoporos, de raio entre 15 e 50 μm . De acordo com estes autores, os macroporos têm como principal função a aeração do solo e condução da água durante o processo de infiltração, os mesoporos devem conduzir a água durante o processo de redistribuição, isto é, esvaziamento dos macroporos e os microporos atuam principalmente na armazenagem da água. Para Pagliai et al. (2003), poros com diâmetro entre 0,5 μm e 50 μm são classificados como “poros de armazenamento”, os quais funcionam como um reservatório de água para as plantas e microrganismos. Poros com diâmetros entre 50 μm e 500 μm são denominados como “poros de transmissão ou condução”.

2.1.2 Retenção da água no solo

Quando os espaços porosos do solo estão completamente cheios de água, o solo está em condição de saturação. Após algum tempo, parte da água dos macroporos é drenada (água livre), e esses espaços passam a ser ocupado por ar, o

solo passa a estar não saturado. De modo geral, a retenção da água pelos solos ocorre numa situação de não saturação e é explicada basicamente pelos fenômenos da capilaridade e da adsorção (LIBARDI, 2012).

Nos espaços intra-agregados, ou seja, nos microporos, formam-se interfaces água-ar resultantes dos processos de retenção da água pela matriz do solo. A água influencia diversos processos no solo, determinada principalmente pela sua estrutura molecular, que exibe polaridade, ou seja, as cargas não são uniformemente distribuídas. Pelo contrário, o lado em que os átomos de hidrogênio estão localizados tende a ser mais eletropositivo e o lado oposto mais eletronegativo.

Duas forças são responsáveis pela retenção e movimento da água nos solos: a coesão, que é a atração das moléculas de água umas pelas outras e a adesão (ou adsorção), que é a atração das moléculas da água pelas superfícies sólidas (BREDY; WELL, 2008). A capilaridade está ligada à afinidade entre as partículas sólidas do solo e a água, havendo a necessidade da interface água-ar. Estas interfaces, chamadas de meniscos, apresentam uma curvatura cujo raio para um dado sólido e um dado líquido é diretamente proporcional ao raio do poro e determina o estado de energia da água o qual é tanto maior quanto menor a curvatura. A capilaridade atua na retenção da água dos solos na faixa úmida, quando os poros se apresentam razoavelmente cheios de água. À medida que o solo seca, os poros vão se esvaziando e filmes de água recobrem as partículas sólidas. Nesta condição, o fenômeno de adsorção passa a dominar a retenção de água (LIBARDI, 2012).

A capacidade de retenção de água pelo solo é característica específica de cada tipo de solo e é resultado da ação conjunta e complexa de vários fatores, como o teor e mineralogia da fração argila, do teor de matéria orgânica e das diferenças da microestrutura com elas relacionadas (GROHMANN; MEDINA, 1962).

A textura é o principal determinante da retenção de água por atuar diretamente na área de contato entre as partículas sólidas e a água (REICHARDT; TIMM, 2004). Em um estudo com vários solos do estado de São Paulo verificou-se que a retenção de água foi positivamente influenciada pelo teor de argila em solos cultivados e que, em solo sob mata, a retenção de água, em diferentes profundidades mostrou-se dependente do teor de matéria orgânica (GROHMANN; MEDINA, 1962). Na condição de solo úmido, onde os fenômenos capilares dominam a retenção de água, esta é influenciada mais pela densidade do solo e porosidade

(estrutura), mas quando o solo passa a ficar mais seco e os fenômenos de adsorção passam a atuar, a retenção de água no solo é mais dependente da textura e da superfície específica do solo (HILLEL, 1970).

2.1.3 Capilaridade

O movimento ascendente da água num tubo capilar caracteriza o fenômeno da capilaridade (BREDY; WELL, 2008), e duas forças são responsáveis: (1) a adesão ou adsorção que é a atração da água por sólidos, e (2) a tensão superficial da água, em grande parte devida as forças de coesão, que é a atração das moléculas de água umas pelas outras.

A tensão superficial é resultado da maior atração das moléculas de água entre si (forças de coesão) do que pelo ar. Desta atração surge uma pressão interna, responsável pela formação de uma interface líquido-gás contrátil que se comporta como se a superfície fosse coberta com uma membrana elástica (LIBARDI, 2012).

A capilaridade pode ser demonstrada colocando-se a extremidade de um tubo de vidro fino e limpo na água. As moléculas de água são atraídas pelas paredes do tubo (adesão) e começam a se espalhar ao longo do vidro em resposta a esta atração. Ao mesmo tempo, as forças coesivas mantêm as moléculas de água juntas e criam uma tensão superficial, formando uma superfície curva (chamada de menisco) na interface entre água e ar no tubo. A menor pressão sob o menisco no tubo de vidro permite que a maior pressão sobre a água livre empurre a água através do tubo. A água eleva-se no tubo até que a tenha subido o suficiente para que seu peso equilibre a pressão diferencial no menisco (BREDY; WELL, 2008; LIBARDI, 2012).

As forças capilares e de adsorção atuam juntas e são chamadas de forças mátricas dando origem ao potencial mátrico. Este pode ser entendido como a medida do trabalho realizado por um agente externo para tornar livre um volume de água retido em um solo não saturado (LIBARDI, 2012).

Não é possível separar a contribuição de cada um dos componentes do potencial mátrico, a não ser por uma avaliação qualitativa. Logo após a drenagem livre da água de um solo as forças capilares são dominantes, e à medida que o solo seca as forças de adsorção tornam-se atuantes (LIBARDI, 2012). A capilaridade é importante para a retenção de água nos microporos e é dependente de vários

fatores como os processos de evapotranspiração, em função do clima (BERKOWITZ et al., 2004), do tipo de vegetação e profundidade das raízes, das características das partículas de solo ao molhamento (GOEBEL et al., 2002), e do envolvimento com produtos hidrofóbicos que geram maiores ângulo de contato na interface do colóide com a água (BACHMANN et al., 2000).

2.1.4 Curva de retenção da água no solo

Não é possível obter uma equação teórica para o potencial mátrico, devido à grande variação estrutural dos solos, com formas e tamanhos de poros muito diferentes. Entretanto, como este potencial varia com o conteúdo de água no solo, foram desenvolvidos instrumentos por meio dos quais se pudessem obter uma correlação entre o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo. A curva resultante dessa correlação recebeu o nome de curva de retenção da água no solo ou simplesmente curva de retenção (CHILDS, 1940; LIBARDI, 2012).

O conteúdo de água retido em determinado potencial mátrico (ϕ_m) decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (BEUTLER et al., 2002). Em baixos ϕ_m o arranjo de poros e a matéria orgânica, influenciam a retenção da água (RAWL et al., 1991). Em elevados ϕ_m a composição granulométrica e a mineralogia do solo tornam-se mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979). Neste sentido, a curva de retenção apresenta relação de dependência com diferentes propriedades do solo, como o teor de argila, o teor de C orgânico, a área superficial específica e a densidade do solo (VAN DEN BERG et al., 1997), sendo dessa forma um importante indicador da qualidade física deste, uma vez que está intimamente relacionada à organização estrutural do solo (OR; WRAITH, 1997).

A curva de retenção da água no solo pode ser determinada por métodos de campo ou de laboratório. Os métodos de campo são os que empregam sonda de nêutrons, tensiômetros e gravimetria (KLUTE, 1986; LIBARDI, 2012; REICHARDT; TIMM, 2004). Os métodos de laboratório têm a vantagem de serem conduzidos em ambiente controlado, permitindo maior flexibilidade no controle de condições limitantes e aquisição de dados com maior precisão. Entretanto esses métodos estão sujeitos a perturbações introduzidas pela manipulação das amostras em

campo e laboratório, pois estas precisam ter sua estrutura preservada, a fim de representar verdadeiramente a geometria do solo (MUNOZ-CARPENA, et al., 2002).

A curva em laboratório pode ser obtida de duas maneiras, por secagem ou molhagem, no entanto estes métodos fornecem curvas distintas devido o fenômeno chamado de histerese (REICHARDT; TIMM, 2004), que se refere à não coincidência das curvas de um mesmo solo, quando obtidas pelos dois métodos. Os métodos via secagem da amostra são os mais usados e os aparelhos tradicionalmente utilizados, dependendo do potencial mátrico necessário, são o funil de placa porosa (HAINES, 1930) e a câmara de pressão com placa porosa (RICHARDS, 1949), os quais tem a teoria da capilaridade como base do seu funcionamento. Nestes casos o equilíbrio da água na amostra de solo, depois da tensão aplicada, é atingido quando o fluxo de saída de água da amostra cessa ou torna-se mínimo, dependendo da natureza do solo ou do tamanho da amostra e da tensão aplicada (KLUTE, 1986).

Tanto o funil de placa porosa como a câmara de pressão podem relacionar o potencial mátrico ou tensão da solução no solo com a curvatura das interfaces solução-ar na amostra de solo, num capilar de seção transversal circular de raio r com uma tensão h (altura de solução) no caso dos funis:

$$\phi_m = h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\rho_{sol}gr} \quad (1)$$

ou uma tensão P (energia/volume) no caso das câmaras de pressão:

$$\phi_m = P = \frac{2\sigma \cos\alpha}{r}, \quad (2)$$

sendo h a altura fixada no funil, P a pressão de ar fixada na câmara de pressão, σ a tensão superficial da solução, α o ângulo de contato entre a solução e o poro, g a aceleração da gravidade e ρ_{sol} a densidade da solução.

A diferença entre o funil e a câmara de pressão está na forma como se faz a retirada da água da amostra de solo. Enquanto no funil aplica-se uma sucção (h) na amostra, na câmara é aplicada uma pressão (P) sobre a amostra.

É importante ressaltar que pela teoria da capilaridade, tanto a sucção (funil) como a pressão (câmara), são aplicadas na placa, e entende-se que há

conectividade entre os poros da amostra e placa, permitindo assim a continuidade desses. O ideal é que a placa possua todos os poros capilares iguais e com o mesmo diâmetro, porém, na prática isso não acontece. A sucção h que se aplica deve ser sempre menor que o máximo valor calculado pela equação a seguir, no caso dos funis:

$$h_{max} = \frac{2\sigma}{\rho gr}, \quad (3)$$

em que $h_{m\acute{a}x}$ é a ascensão capilar máxima permitida pela placa, σ é a tensão superficial, ρ a densidade do líquido (água), g a aceleração da gravidade e r o raio dos poros da placa. Um $h_{m\acute{a}x}$ maior do que o valor calculado resultará em rompimento dos meniscos e passagem de ar através da placa.

Percebe-se pela eq. (3), que quanto menor o raio r , maior será o valor de $h_{m\acute{a}x}$. Entretanto, para o funil, o valor máximo que se consegue é de aproximadamente 8,5 m, devido ao fenômeno chamado de cavitação, quando ocorre a quebra da continuidade da coluna de líquido, que se rompe e desprende da placa, devido à diminuição da pressão interna no menisco quando h é aumentado acima de 8,5 m.

Para as câmaras de pressão, o valor máximo que cada placa suporta, sem que o ar passe através de seus poros, é denominada pressão de borbulhamento e é determinado pelo diâmetro do seu maior poro e será tanto maior quanto menor for este poro. Há dois tipos de equipamentos, um denominado “panela de pressão”, pela semelhança com a panela de uso doméstico, para valores de pressão de 10 a 400 kPa, e uma câmara de constituição mais robusta para valores de pressão de 500 a 2000 kPa. Para valores de pressão superiores há outra câmara mais robusta ainda, mas não é utilizada para fins agrícolas. Encontram-se no comércio placas porosas com pressão de borbulhamento de 100, 300, 500 e 1500 kPa.

Em um solo não saturado, a quantidade de ar e água no solo está intimamente relacionada com o tamanho dos poros (GROHMANN, 1960). Uma vez obtida a curva de retenção é possível determinar a distribuição do tamanho dos poros do solo pela fórmula da ascensão capilar da teoria da capilaridade (LEAMER; SHAW, 1941), a partir do cálculo do raio equivalente a cada tensão aplicada. A distribuição do tamanho dos poros é muito importante para a caracterização da

estrutura do solo, uma vez que a porosidade total informa unicamente o volume de poros (GROHMANN, 1960).

2.1.5 Fatores que afetam a curva de retenção

A retenção de água no solo pode ser afetada por uma série de fatores que vão desde a distribuição relativa do tamanho e forma e do arranjo das partículas até a composição e concentração de solutos no solo e variações espaciais na unidade pedológica (SALTER; WILLIAMS, 1965; EL-SWQAIFY e HENDERSON, 1967; MORAES; LIBARDI, 1993). Avaliações de erros na curva de retenção obtida por diferentes metodologias e solos de texturas diferentes mostram que para solos mais argilosos há modificações nas curvas de acordo com os instrumentos empregados, podendo gerar erros no entendimento quando esta é usada para estudos, por exemplo, de transporte de solutos no solo, remediação de solos poluídos, manejo da irrigação, entre outros (SOLONE, et al., 2012).

Fatores como histerese e temperatura devem ser levados em consideração ao se construir uma curva de retenção. A histerese comumente afeta o movimento de água em solos não-saturados, o que muitas vezes é ignorado para manter a descrição matemática do fluxo de água e transporte de solutos simples (ABBASI, et al., 2012). Os efeitos da temperatura sobre a retenção de água no solo vêm sendo estudado desde a década de 1960 (PECK, 1960; WILKINSON; KLUTE, 1962, CHAHAL, 1966; KLUTE, 1986) e têm-se confirmado que o aumento na temperatura leva a uma redução no teor de água a um dado potencial.

Outro fator relevante que tem tido pouca atenção durante a elaboração da curva de retenção da água no solo é a amostragem, uma vez que, a qualidade dos dados obtidos em laboratório está diretamente relacionada com os cuidados durante a coleta das amostras. As amostras indeformadas são utilizadas para densidade do solo, pontos da curva de retenção, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica e outros estudos específicos, utilizando-se cilindros ou anéis e extratores especiais como o de Uhland.

O extrator desenvolvido por Uhland (1951) constitui-se em um conjunto de peças, composto por anéis de aço inoxidável com diâmetro e altura de 0,07 m, totalizando um volume de $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$, é totalmente introduzido ao solo no interior de uma estrutura externa chamada de "camisa". O equipamento é sulcado em uma

base de ferro com uma haste de guia, em que um cilindro de 4,5 kg de massa cai a uma altura de cerca de 50 cm, resultando num impacto suficiente para promover a penetração do anel sem compactar o solo em seu interior, teoricamente (UHLAND, 1951). Este instrumento tem sido largamente utilizado para obtenção de amostras para a curva de retenção, porém, suas dimensões foram estudadas para a determinação da densidade do solo, e não para curva.

Além dos fatores citados acima, um aspecto muito importante que tem chamando a atenção de pesquisadores é a simplicidade da Teoria da Capilaridade, para explicar algo tão complexo como o solo. Conceitos importantes da Física do Solo como a curva de retenção, distribuição de poros, dentre outros, são explicados pelo modelo de feixes capilares (HUNT, et al., 2011). Apesar disso, nota-se que as análises de determinação da curva de retenção são muitas vezes realizadas sem preocupação se os pressupostos básicos para o funcionamento do modelo estão sendo atendidos. Larson e Morrow (1981) e Zhou e Stenby (1992) já se preocupavam em avaliar a influência do tamanho da amostra na curva de retenção (pela Teoria da Percolação), e constataram que amostras menores possibilitam maior acessibilidade entre os poros do interior e superfície da amostra. Dessa forma, ao avaliar a retenção de água e a distribuição dos poros pela Teoria da Capilaridade, é de extrema importância que, além dos fatores citados acima, a estrutura do solo na amostra sofra o mínimo de modificações, de modo a manter o arranjo de poros que formaram os feixes capilares, pelos quais a teoria é baseada.

Frequentemente, trabalhos envolvendo Física, Manejo e Conservação do solo têm obtido resultados pouco conclusivos e contraditórios sobre qualidade física do solo devido a metodologias inadequadas (FIGUEIREDO, 2010), ou pela pouca aplicabilidade dos processos e teorias que estão por traz da maioria dos instrumentos utilizados. Na elaboração das curvas de retenção, constata-se que há grande variação do tamanho dos anéis, com dimensões que variam desde 0,03 a 0,075 metros de altura (MORAES et al., 1993; EMBRAPA, 1997; BEUTLER et al., 2002; MACHADO 2008; BRITO, 2011). Reichardt e Timm (2004) afirmam que as alturas dos anéis para esse tipo de análise podem variar de 0,03 a 0,10 m. Porém, quando uma tensão é aplicada a uma amostra, é aplicada sobre a placa porosa, ou seja, hipoteticamente, para que realmente a teoria da capilaridade seja válida, uma altura de anel o menor possível seria o mais adequado. No entanto, estudos que comprovem isso a partir da Teoria da Capilaridade são escassos, mesmo assim os

pesquisadores têm aceitado essas variações de altura dos anéis sem incomodar-se se há ou não interferência na qualidade estrutural das amostras e consequentemente na curva de retenção.

2.2 Material E Métodos

2.2.1 Locais de amostragem

As amostras foram coletadas em duas áreas experimentais na Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz (Esalq/USP), município de Piracicaba, São Paulo. A região apresenta segundo a classificação internacional de Köppen, o clima Cwa (tropical de altitude) e vegetação regional tipo floresta tropical sub-perenifólia.

O primeiro solo está localizado próximo ao aeroporto da cidade, classificado como Latossolo Vermelho amarelo distrófico típico, e o segundo próximo ao posto agrometeorológico da Esalq, classificado como Nitossolo Vermelho eutrófico latossólico (EMBRAPA, 2006). O Latossolo teve sua origem a partir do produto da alteração de depósitos arenosos (Cenozoico) que cobriram os sedimentos da formação Irati (Permiano), enquanto o Nitossolo originou-se de alterações de depósitos argilosos (Cenozoico) que cobriram o diabásio da formação Serra-Geral (Triássico-Cretáceo) (COOPER et al., 2002).

Estão situados em um local de relevo plano, com boa drenagem e com presença de gramíneas. As coordenadas geográficas das áreas são 22°43'7.19"S e 47°36'55.97"W (Latossolo) e 22°42'15.23"S e 47°37'20.90"W (Nitossolo). Abaixo são apresentados os perfis dos solos estudados, Figura 1.

Figura 1 – Solos estudados a) Latossolo e b) Nitossolo.

Estes solos foram especificamente escolhidos por serem representativos dos solos da região de Piracicaba e pela sua constituição textural. Enquanto o Latossolo apresenta textura mais arenosa e é pouco estruturado, o Nitossolo é mais argiloso e bem estruturado. Isso foi importante porque os solos, de modo geral, apresentam variações em vários aspectos e, dentre eles, a constituição granulométrica e a estrutura são muito importantes para a retenção da água no solo.

2.2.2 Amostragem

Foram coletadas amostras indeformadas do horizonte diagnóstico de cada solo. No Latossolo (Bw) a profundidade de coleta foi a 0,50 m de profundidade e no Nitossolo (Bt) a 0,30 m.

Para extração das amostras utilizou-se o extrator de Uhland que é constituído de um “copo” ou “camisa”, com diâmetro interno de 0,07 m, e altura de 0,075 m, onde os anéis são encaixados para serem inseridos ao solo. Sobre o copo apoia-se uma base de ferro com uma haste de guia, de onde um cilindro de 4,5 kg cai de uma altura de aproximadamente de 0,5 m, resultando em impactos suficientes para promover a penetração do anel ao solo (UHLAND, 1951), como pode ser visto na Figura 2 abaixo.

Figura 2 - a) Extrator de Uhland e b) Extrator de Uhland sendo utilizado

Foram avaliados três tamanhos de anéis, de igual diâmetro interno (0,07 m) e espessura de parede (m), variando apenas a altura, 0,075 m (T1), 0,05 m (T2) e 0,025 m (T3), Figura 3 (a, b e c). Devido às dimensões da “camisa” ou “copo” do extrator, para os dois anéis menores (0,05 e 0,025 m), foi completada a altura interna do extrator (copo) com anéis extras (Figura 3 d): para os anéis de T2 utilizaram-se dois anéis de 0,0125 m e para os T3, dois anéis de mesma altura que estes (0,025 m), sendo que os anéis principais, ou seja, aqueles que foram usados nas análises ficavam localizados na parte central do extrator. Este detalhe foi importante, pois além de apenas completar as dimensões internas da “camisa” ou “copo”, constituiu uma estratégia para proteção do solo dentro dos anéis contra possível compactação promovida pelo impacto do cilindro ao solo, além de facilitar a coleta, já que, os anéis das extremidades seriam descartados durante a toalete. No total foram coletados em cada solo 135 amostras, sendo 45 de anéis T1, 45 T2 e 45 T3.

Figura 3 - Tamanhos de anéis estudados: a) 0,075 m (T1); b) 0,05 m (T2); c) 0,025 m (T3); d) Anéis extras complementando T2 (0,05 m) e T3 (0,025 m)

Ao final das coletas as amostras foram armazenadas em geladeira. Em seguida realizou-se a toaleta, em que se retirou o excesso de solo, incluindo os anéis extras, de modo que o solo preenchesse o volume interno do anel. Depois, em uma extremidade do anel prendeu-se um tecido (facilim) com um elástico para evitar a perda de solo durante a manipulação das amostras.

2.2.2 Caracterização e atributos dos solos

Foi realizada análise granulométrica dos solos pelo método do densímetro (GROSSMAN; REINSCH, 2002). Para isto, coletaram-se amostras deformadas dos horizontes diagnósticos de cada solo (de onde as indeformadas também foram retiradas), as quais foram destorroadas, secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A Tabela 1 apresenta a distribuição granulométrica, com fracionamento da areia de acordo com a classificação americana (1951), e classificação textural (EMBRAPA, 2006).

Tabela 1 – Distribuição granulométrica e classificação textural dos solos estudados

Frações	Latossolo	Nitossolo
	(g kg ⁻¹)	
AMG	1,59	2,68
AG	17,01	9,65
AM	92,07	30,87
AF	411,67	117,93
AMF	219,83	90,51
AT	742,17	251,64
Silte	42,18	144,11
Argila	215,66	604,26
Classificação textural	Franco argilo-arenosa	Muito argilosa

AMG - areia muito grande; AG – areia grande; AM – areia média; AF – areia fina; AMF – areia muito fina; AT – areia total.

A densidade do solo (ρ) foi determinada a partir de amostras indeformadas extraídas do perfil por meio do extrator de Uhland e calculada pelo quociente da massa de solo seco (MS) da amostra e o volume (V) do respectivo anel volumétrico (eq. 4). A partir dos valores médios de densidade do solo para os tamanhos e tensão aplicada, pode-se inferir sobre a qualidade das amostras, ou seja, se houve ou não compactação devido à amostragem. Para isso, os dados foram submetidos ao teste paramétrico de normalidade de Shapiro-Wilk, a fim de verificar se os resultados foram provenientes de uma população com distribuição normal. Em seguida, fez-se uma comparação de médias por meio do quadro de análise de variância com auxílio do programa computacional R Project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015).

A densidade dos sólidos (ρ_s) foi determinada pelo método do picnômetro de gás hélio. Amostras de TFSA foram secas em estufa a 105 °C, até obtenção de massa constante (terra fina seca em estufa – TFSE). Em seguida foram pesadas alíquotas de aproximadamente 6 g em cápsulas de metal, para posterior leitura no picnômetro. A porosidade total do solo (α) foi calculada a partir dos valores determinados de ρ_s e ρ (eq.5).

$$\rho = \frac{MS}{V} \text{ (Kg m}^{-3}\text{)} \quad (4)$$

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (5)$$

O teor de carbono orgânico (CO) foi obtido pelo método Walkey-Black (ANDERSON; INGRAM, 1992). O método baseia-se na oxidação do carbono orgânico do solo com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico, usando o calor gerado pela diluição do ácido sulfúrico como catalizador da reação de oxirredução. Após esfriamento da amostra, realizou-se a titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso.

2.2.3 Curvas de retenção

Após o preparo, as amostras foram divididas em oito grupos com cinco repetições para obtenção de valores médios das curvas de retenção da água dos solos estudados. Os equipamentos utilizados para medir o potencial mátrico foram os funis de placa porosa e câmaras de pressão de Richards (KLUTE, 1986). É importante deixar claro que durante todo o texto o termo potencial mátrico será substituído por tensão, para que os valores sejam usados com sinal positivo, já que, ao usar o termo “potencial mátrico” os valores estão com sinal negativo.

As tensões utilizadas nos funis de placa porosa foram 0,5, 1, 4, 6 e 10 kPa e nas câmaras as tensões de 33, 100 e 500 kPa. Optou-se por detalhar mais a parte úmida da curva (pontos de 0,5 a 10 kPa), porque notadamente para amostras de diferentes tamanhos, o arranjo estrutural do solo influencia a retenção de água no solo na parte mais úmida da curva (pontos de tensão mais baixos), quando a capilaridade é atuante.

As amostras foram saturadas por 24 horas com água deaerada e em seguida levadas até os funis, que também tiveram suas placas saturadas pela elevação do nível da água na mangueira pelo mesmo período de tempo. Para as câmaras houve saturação das amostras também por 24 horas enquanto as placas porosas ficavam mergulhadas em recipiente com água e só retiradas quando eram utilizadas. Após o período de saturação as amostras foram levadas até as placas, tomando-se sempre cuidado para haver perfeito contato entre a placa e amostra, em seguida aplicou-se uma sucção (no caso dos funis) e pressão de ar (no caso das

câmaras) correspondente à tensão desejada. Isto fazia com que a solução do solo fosse retirada da amostra, até atingir o equilíbrio, ou seja, até quando o fluxo de água cessava momento no qual o potencial mátrico compensava a sucção (h) ou a pressão de ar (P), com o que,

$$\phi_m = -h \text{ (energia/peso)} \quad (6)$$

no caso do funil e

$$\phi_m = -P \text{ (energia/ volume de solução)} \quad (7)$$

no caso da câmara.

Atingido o equilíbrio, nas câmaras e nos funis, as amostras foram pesadas em balança analítica de duas casas decimais, e registradas sua massa; em seguida foram colocadas em estufa de circulação com ar forçada, a 105°C, durante dois dias; após esse período foram novamente pesadas e obtidas a massa seca. A partir desses dados obteve-se densidade do solo (eq. 4) e conteúdo de água a base de massa e volume, pelas eq.8 e 9, respectivamente:

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \text{ (Kg Kg}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

$$\theta = \frac{U\rho}{1000} \text{ (m}^3\text{m}^{-3}\text{)} \quad (9)$$

em que U e θ são os conteúdos de água a base de massa e volume, MU é a massa de solo úmida, MS é massa de solo seco e 1000 é a densidade da água em kg m⁻³.

Os dados foram ajustados ao modelo proposto por van Genuchten (1980), eq. (10).

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

sendo θ_r e θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) os conteúdos de água residual e de saturação, respectivamente, ϕ_m o potencial mátrico (tensão) da água no solo; α , n e m são parâmetros da equação, em que $m = 1 - 1/n$.

2.2.4 Distribuição do tamanho dos poros do solo

A distribuição do tamanho de poros do solo foi feita com base na teoria da capilaridade, por meio das curvas de retenção (LIBARDI, 2012). Os poros foram classificados de acordo com o proposto por Koorevaar et al. (1983), em que raios inferiores a 15 μm (equivalente a 3 kPa) são microporos, aqueles com raio entre 15 e 50 μm (entre 3 e 10 kPa) são mesoporos e acima de 50 μm são macroporos.

Obteve-se a frequência acumulada de raios por meio das curvas de retenção, substituindo o conteúdo de água (θ) no eixo das ordenadas pela saturação relativa (θ/α), que mede a fração cheia de água do volume de poros de uma amostra de solo, e no eixo das abscissas o raio equivalente (r_s) em μm , em escala logarítmica. Para isto, rearranjou-se a equação de Laplace da capilaridade para obter uma relação entre tensão e raio equivalente para ser substituída nos valores das tensões em cada ponto da curva.

$$P = \frac{2\sigma}{r_s}, \quad (11)$$

em que, P é a tensão (potencial mátrico) aplicada, σ a tensão superficial da solução ($0,07275 \text{ N m}^{-1}$), água a 25°C , e r_s o raio equivalente.

Substituindo-se a equação (eq. 11) na equação (eq. 10) e expressando $|\phi_m| = P$ em kPa e r_s em μm , resulta que

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{A}{r}\right)^n\right]^m}, \quad (12)$$

em que,

$$A = 2 \sigma \alpha 10^3, \quad (13)$$

sendo kPa^{-1} a unidade de α .

Fica claro desta forma que por esta função (eq. 12) pode-se calcular θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), a partir dos valores de raio (μm), e então, obter a saturação relativa. A partir disso traçaram-se as curvas da função frequência acumulada de raios. As curvas de retenção obtidas por esta função são exatamente iguais às obtidas com θ (conteúdo de água), em função de P (tensão/potencial mátrico), como também as curvas de frequência acumulada de poros, mas, decidimos dar ênfase apenas nesta última, de maneira a facilitar a visualização da distribuição de poros.

A partir da diferenciação da eq. 12 para as equações das curvas de retenção de cada tamanho das amostras e solo estudado, elaborou-se a curva da função frequência de raios por intervalo de logaritmo do raio (eq. 14). E pela segunda derivada da equação obteve-se o valor de raio máximo (eq. 15).

$$\frac{d\theta}{d\log r} = (\theta_s - \theta_r) m n A^n r^{-n} [1 + A^n r^{-n}]^{-m-1} \quad (14)$$

$$r_{max} = A \left(\frac{1}{m} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (15)$$

Tanto as curvas de retenção como as curvas de distribuição do tamanho dos poros do solo foram elaborados com auxílio do programa computacional R Project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Atributos físicos do solo que influenciam a retenção de água

Na Tabela 2 estão apresentados os atributos físicos e carbono orgânico dos solos estudados que influenciam direta e indiretamente a retenção de água. O Nitossolo se destaca com maior teor de argila que o Latossolo, sendo classificados como Muito Argiloso e Franco-argilo-arenoso, respectivamente (Tabela 1). A fração argila determina decisivamente o comportamento físico do solo principalmente devido sua elevada área superficial específica (REICHARDT; TIMM, 2004), interferindo diretamente na retenção de água, já que as superfícies das argilas são negativamente carregadas, adsorvendo as moléculas de água à sua superfície. E afeta indiretamente por interferir em propriedades importantes como o teor de carbono orgânico, na densidade e na porosidade do solo (DIAS JUNIOR; MIRANDA 2000).

Tabela 2 – Atributos físicos e carbono orgânico dos solos estudados.

Solos	Argila	CO	ρ	ρ_s	α
	g kg ⁻¹		kg m ⁻³		m ³ m ⁻³
Latossolo	215,66	2,35	1514,13	2674,27	0,43
Nitossolo	604,26	7,46	1333,93	2899,03	0,54

CO – Carbono orgânico; ρ – Densidade do solo; ρ_s – Densidade dos sólidos; α – Porosidade total.

O Latossolo apresentou menor teor de carbono orgânico (CO) que o Nitossolo, isso está relacionado à sua textura. Solos argilosos, constituídos principalmente de argilominerais e óxidos, apresentam maior grau de agregação que solos arenosos devido ao tamanho reduzido de suas partículas e elevada área específica e, portanto, grande interação com a matéria orgânica do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1999). Um solo bem agregado promove maior proteção física contra a mineralização e a oxidação do CO. Machado et al., (2008), verificaram correlação positiva entre os teores de CO do solo e a retenção de água no intervalo das tensões de 1 e 10 kPa da curva de retenção em um Latossolo sob mata nativa, enquanto nas áreas sob cultivo e pousio houve menor retenção de água nestes intervalos, demonstrando dessa forma, a importância da matéria orgânica do solo para a retenção de água.

A densidade do solo (ρ) do Latossolo é superior à do Nitossolo e está relacionado às características pedogenéticas de cada solo, mas também pode ser afetada pelo manejo adotado nas áreas. A textura e teor de CO são atributos que interferem a densidade dos solos de modo geral, uma vez que solos mais argilosos, como o Nitossolo, possuem quantidade superior de poros intra-agregados, superfície específica elevada e maior porosidade total (α), justificando assim o menor valor de densidade deste solo. Enquanto que, solos arenosos, como o Latossolo, apresentam maior macroporosidade, mas menor espaço poroso total. A modificação da densidade do solo e dos teores de CO explica a redução na retenção de água em solos sob interferência humana, caracterizando desta forma o comprometimento da qualidade física e hídrica do solo (MACHADO et al., 2008). Além disso, em solos cultivados, a densidade do solo passa a exercer maior influência sobre a retenção de água que o CO (BEUTLER, et al., 2002).

A densidade de partículas (ρ_s) é um atributo intrínseco de cada solo, que não é afetado pelo manejo e é um reflexo da constituição mineralógica de cada solo. Este atributo é usado para obter a porosidade total do solo calculada (α), que no Nitossolo apresentou-se superior ao Latossolo devido a sua constituição granulométrica mais fina (argilosa), proporcionando maior microporosidade.

Apresenta-se em seguida a análise de variância (ANOVA) para a densidade das amostras de solo do Latossolo (Tabela 3) e do Nitossolo (Tabela 4). De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, portanto, a ANOVA explica as variações dos dados. Verifica-se que não houve diferença estatística entre as médias de densidade do solo devido à variação do tamanho das amostras nos dois solos, porém, no Latossolo houve diferença significativa em função das tensões aplicadas. Isso está relacionado à acomodação das partículas enquanto foram manipuladas em campo e laboratório. Mas, é importante atentar ao fato que a amostragem foi executada adequadamente, de maneira a não haver diferenças significativas de densidade do solo entre os tamanhos dos anéis. Além disso, o uso dos anéis extras, nas amostras T2 e T3, provavelmente contribuíram para a mínima perturbação das amostras no momento da amostragem e toaleta.

Percebe-se também que não houve interação significativa entre tamanho e tensão. Estes resultados evidenciam a boa qualidade das amostras indeformadas usadas nas análises de laboratório e que não houve modificações significativas nas

densidades entre os tamanhos das amostras nos dois solos estudados que pudessem influenciar retenção de água pelos solos.

Tabela 3 – Tabela de análise de variância para a densidade do solo, Latossolo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tamanho	2	17.615	8.807,4	25,204	0,085734
Tensão	7	72.161	10.308,7	29,501	0,007643
Tamanho*Tensão	14	75.329	5.380,6	1,5398	0,111601
Resíduo	96	33.546	3.494,4		
Total	119	50.057			
CV =3,9 %					

FV – Fonte de variação; GL – Graus de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr>Fc– p valor.

Tabela 4 - Tabela de análise de variância para a densidade do solo, Nitossolo.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tamanho	2	12.940	6.470,1	243,080	0,09336
Tensão	7	13.240	1.891,4	0,71059	0,66309
Tamanho*Tensão	14	53.463	3.818,8	1,4347	0,15218
Resíduo	96	255.525	2.661,7		
Total	119	335.168			
CV = 3,87 %					

FV – Fonte de variação; GL – Graus de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr>Fc– p valor.

As Figuras 4 e 5 ilustram os intervalos de confiança para os níveis médios de densidade do solo entre os tamanhos de anéis do Latossolo e do Nitossolo, respectivamente, a um nível de confiança de 95%. Fez-se uma comparação (subtraindo-se) entre as médias da densidade para cada tamanho das amostras. Ao analisar as densidades das amostra, entende-se que se as médias de densidade não são diferentes entre si, se a subtração dessas médias (Tamanhos: 2 – 1; 3 – 1; 3 – 2) for 0 (zero), ou seja, pode-se dizer que não há diferença entre as médias de densidade nos solos devido os diferentes tamanho de amostra, pois todos os intervalos médios de densidade contém este valor, não importando a qual tamanho de amostra esteja se referindo.

Figura 4 – Diferenças dos níveis médios de densidade do solo em entre os tamanhos de anéis para o Latossolo.

Figura 5 – Diferenças dos níveis médios de densidade em entre os tamanhos de anéis para o Nitossolo

2.3.2 Curvas de retenção

2.3.2.1 Latossolo

A seguir estão apresentadas as curvas de retenção da água no Latossolo, para os três tamanhos de amostra estudados, T1, T2 e T3 (Figura 6, a, b e c). Os parâmetros de ajuste dos dados experimentais à eq. (10) (van Genuchten, 1980) podem ser vistos na Tabela 5. Verifica-se que elas apresentaram um bom ajuste ao modelo, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 90%.

Os valores de θ_s e θ_r representam os limites máximos e mínimos das curvas, por este motivo, θ_s é considerado o conteúdo de água na saturação e, portanto, a porosidade total determinada (a porosidade total calculada está apresentada na Tabela 2), e o conteúdo de água residual, θ_r , representa o conteúdo de água obtido na maior tensão. Os parâmetros α e n definem o formato da curva, sendo que o α é o inverso do potencial de entrada de ar e o n representa a influência dos tamanhos dos poros e a influência na declividade da curva de retenção de água no solo.

As curvas apresentaram conteúdo máximo de água (θ_s) entre 0,39 e 0,44 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sendo que o conteúdo de água retido aumentou com a diminuição do tamanho da amostra. O conteúdo de água residual (θ_r) variou entre 0,16 e 0,12 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, com valores menores para os menores tamanhos de amostra, como pode ser visto na Figura 7.

A curva 1 (T1), diferenciou-se da curva 3 (T3) no início, quando as amostras ainda estavam quase saturadas, entre 0,5 e 1 kPa e, dos outros dois tamanhos na parte final, com conteúdo de água superior nesta parte, mais precisamente entre as tensões de 100 e 500 kPa. Esta diferenciação entre as curvas 1 e 3, quando o solo ainda estava com elevado conteúdo de água evidencia a importância da estrutura do solo para a retenção de água nesta parte da curva (baixas tensões), mesmo para um solo arenoso. E nas maiores tensões, T1 diferenciou-se por causa da acomodação das partículas de areia fina e muito fina principalmente (que representam 85% da areia total do Latossolo) dentro das amostras, aumentando o contato entre elas e intensificando a adsorção das moléculas de água às partículas do solo. Ribeiro et al., (2007), também percebeu ao estudar solos arenosos o rearranjo dessas partículas, gerando uma estrutura mais adensada, “entupindo” os poros formados pela areia grossa.

Figura 6 – Curvas de retenção para o Latossolo para os três tamanhos de amostra, T1 (a), T2 (b) T3 (c)

Tabela 5 – Parâmetros das curvas de retenção do Latossolo para os três tamanhos de amostra (T1, T2, T3)

Tamanho	θ_s	θ_r	α (kPa ⁻¹)	n	R ²
T1	0,39	0,16	0,39	2,53	0,95
T2	0,43	0,12	0,58	1,87	0,96
T3	0,44	0,12	0,41	2,33	0,92

θ_s – Conteúdo de água com o solo saturado; θ_r – Conteúdo de água residual; α e n – são parâmetros da equação; R² – Coeficiente de determinação.

Figura 7 – Curvas de retenção para os tamanhos de amostra estudados do Latossolo.

Embora tenha havido aparente tendência de aumento do conteúdo de água retida no início das curvas obtidas com as amostras menores no Latossolo, $T3 \geq T2 \geq T1$ (Figura 7), constata-se pela análise dos intervalos de confiança dessas curvas (Figura 8) que não houve diferença significativa entre elas em quase toda sua extensão. Nas tensões menores (0,5 a 1 kPa) verificou-se diferença estatística da curva 1 (vermelha) em relação à curva 3 (azul), e entre 100 e 500 kPa, a curva 1 foi diferente estatisticamente das outras duas. Provavelmente o maior volume de solo das amostras T1 tenha dificultado a total saturação destas e, pode ter contribuído

para o menor conteúdo de água na parte inicial da curva 1, diferindo-a da curva 3. Além disso, pode ter influenciado na acomodação das partículas mais finas do solo, aumentando o contato entre elas, dificultando a retirada da água do solo nas tensões maiores.

Geralmente, solos arenosos apresentam maior resistência à alteração de sua estrutura em função da granulometria de suas partículas, no entanto, possuem menor capacidade de retenção de água, já que os macroporos estão em maioria em relação aos microporos, beneficiando assim, a drenagem da água que entra no solo em relação a solos mais argilosos. Cubilla et al. (2002), constatou que não houve mudança na densidade de um solo franco-arenoso sob diferentes manejos do solo e da planta, confirmando a maior resistência de solos arenosos quanto a modificação de sua estrutura. Já Grohmann e Medina (1962), ao estudar vários solos no estado de São Paulo, verificaram que a retenção de água foi positivamente influenciada pelo teor de argila em solos cultivados e que, em solo sob mata, a retenção de água, em diferentes profundidades, mostrou-se dependente do teor de matéria orgânica.

Figura 8 – Intervalos de confiança das curvas de retenção para os tamanhos de amostra estudados do Latossolo.

2.3.2.2 Nitossolo

As curvas de retenção do Nitossolo para os três tamanhos de amostra estudados estão apresentadas na figura 9 (a, b e c). Em seguida, na Tabela 6, estão dispostos os valores dos parâmetros de ajustes (θ_s , θ_r , α e n) e os coeficientes de determinação (R^2), para cada curva. Verifica-se que houve bom ajuste das curvas ao modelo (eq. 10).

As curvas dos tamanhos T1 e T2, tiveram menor conteúdo de água retido nos pontos de baixa tensão (início da curva), em relação ao tamanho T3, principalmente até a tensão de 10 kPa (Figura 10). Na Figura 10 é possível também identificar o menor conteúdo de água retido em função do aumento do tamanho da amostra, ou seja, $T3 > T2 \geq T1$. A menor retenção da água nas amostras de tamanho maior deve estar relacionada à estruturação do solo e à gravidade: pelo fato de a amostra possuir altura maior, a ação da gravidade é cada vez maior à medida que se aproxima da superfície da amostra, concorrendo para uma maior drenagem da água notadamente dos poros maiores ou interagregados.

Ao utilizar equipamentos como a câmara de Richards e o funil de Haines, para obtenção das tensões (potencial mátrico), tem-se como base teórica a Teoria da Capilaridade, em que é imprescindível que a arquitetura original do solo seja preservada ao máximo, mantendo a conectividade entre os poros da placa e da amostra. Mas, na verdade o solo tem uma organização estrutural muito complexa, principalmente quando apresenta textura muito argilosa, como este Nitossolo. Assim, o ideal para promover a acessibilidade entre os poros da amostra e placa é que sejam utilizadas amostras com tamanho menor possível. Estudos a partir da teoria da percolação mostram que resultados mais representativos para as tensões aplicadas e distribuição de poros mais real, podem ser obtidos reduzindo o tamanho da amostra (LARSON; MORROW, 1981).

Klein e Libardi (2002) constataram modificação da estrutura do solo devido ao uso e manejo que alterou consideravelmente o traçado das curvas de retenção da água no solo com redução da porosidade e alteração da distribuição do diâmetro dos poros. As diferenças observadas na estrutura do solo podem ser atribuídas às partículas minerais do solo, que influenciam os processos de agregação, o arranjo estrutural, volume total de poros, distribuição, conectividade e tortuosidade entre eles (LU et al., 2014).

Figura 9 - Curvas de retenção para o Nitossolo para os três tamanhos de amostra, T1 (a), T2 (b) T3 (c).

Tabela 6 - Parâmetros das curvas de retenção do Nitossolo para os três tamanhos de amostra (T1, T2, T3).

Tamanho	θ_s	θ_r	α (kPa ⁻¹)	n	R ²
T1	0,47	0,35	1,03	2,71	0,92
T2	0,46	0,35	0,68	2,15	0,80
T3	0,58	0,37	0,58	2,34	0,96

θ_s – Conteúdo de água com o solo saturado; θ_r – Conteúdo de água residual; α e n – são parâmetros da equação; R² – Coeficiente de determinação.

Figura 10 – Intervalos de confiança das curvas de retenção dos tamanhos de amostra estudados para o Latossolo.

A Figura 11 ilustra os intervalos de confiança para as curvas de retenção do Nitossolo. Constatou-se alteração na amplitude das curvas, o que significa que o tamanho da amostra alterou a retenção de água no solo. A curva obtida para o tamanho T3 apresentou diferença significativa em relação às curvas obtidas para os outros tamanhos. Visualiza-se isso devido não haver interseção entre o intervalo de confiança obtido para a curva 3 (cor azul) e as outras curvas, 1 e 2 (cores verde e vermelha), até próximo à tensão de 10 kPa. Dessa forma, quando se utilizou as

amostras T1 e T2 (0,075 e 0,05 m), a teoria da capilaridade, que trata o solo como um feixe de capilares perdeu em parte sua funcionalidade em explicar a retenção da água no solo. O modelo de tubos capilares é largamente utilizado por causa da sua simplicidade, porém, não leva em consideração a conectividade dos poros e sua variação de tamanho (LAKE, 1989). Além disso, Hunt et al., (2013) criticam a forma pela qual tem-se entendido a retenção de água no solo e outros processos físicos, argumentaram que o modelo de feixes capilares é muito simples para explicar algo tão complexo como o solo.

Zhou e Stenby (1993) também verificaram diferenças nas curvas de pressão capilar devido ao efeito do tamanho da amostra. Qualquer fator que influencie a organização estrutural da amostra irá afetar o conteúdo de água medido em cada tensão (BEUTLER et al., 2002), principalmente no início da curva (menores tensões). Assim, a estrutura do solo constitui fator fundamental para a retenção de água pelos solos em altos conteúdos de água, principalmente atributos como densidade e a porosidade, enquanto para menores conteúdos de água a retenção é mais dependente da textura (GHOHMANN; MEDINA, 1962).

Larson e Morrow (1981), que estudaram a influência do tamanho da amostra em curvas de pressão capilar pela teoria da percolação, afirmaram que estas são influenciadas não apenas pela geometria e propriedades de molhamento em um único poro, mas pela acessibilidade entre estes, e que são sensíveis ao tamanho da amostra usada nas análises. Da mesma forma pode-se pensar para a capilaridade, pois para que ocorra a ascensão da água dentro dos capilares do solo, é necessário que exista conexão entre os poros da superfície da amostra àqueles que estão no interior. Isso é mais provável que ocorra em amostras com menor tamanho possível.

Figura 11 – Intervalos de confiança das curvas de retenção para os tamanhos de amostras estudados do Nitossolo.

É interessante perceber como a textura do solo influencia o comportamento deste em relação à retenção de água. O Latossolo por apresentar textura mais arenosa apresenta estrutura mais uniforme apresentando assim pouca diferença entre as curvas obtidas com os diferentes tamanhos das amostras em estudo. O Nitossolo, por ser bem mais argiloso reteve maior conteúdo de água, mas, sua estrutura é muito mais complexa, podendo ocorrer descontinuidade de feixes capilares, principalmente para as amostras de tamanho maior (T1 e T2), que se mostraram diferentes significativamente em relação à curva obtida pelo T3.

É importante ressaltar que cada ponto experimental das curvas de retenção foi oriundo de amostras distintas, explicando com isto a certa dispersão dos pontos experimentais em relação à linha de ajuste (Figuras 6 e 9).

2.3.3 Distribuição do tamanho dos poros do solo

2.3.3.1 Latossolo

A partir das curvas de retenção foi realizada a distribuição do tamanho dos poros do solo pelo cálculo do “raio equivalente” (eq. 11) da teoria da capilaridade, de acordo com Libardi (2012). Observa-se que para cada tensão, há um “raio equivalente”, e todos os poros com raio superior àquele são esvaziados a uma tensão específica. Na Figura 12, estão apresentadas as curvas da função frequência acumulada de raios dos três tamanhos de amostra estudados para o Latossolo: T1, T2 e T3 (Figura 12 a, b, c). Estas curvas relacionam a saturação relativa, que mede a fração cheia de água do volume de poros da amostra, em função do raio equivalente r_s (μm). Dessa forma, a partir da frequência acumulada de poros pode-se determinar a percentagem de macro, meso e microporos, de acordo com a classificação de Koorevaar et al., (1983).

Os Gráficos da Figura 12 estão separados com linhas pontilhadas, as quais dividem as áreas das curvas equivalentes à proporção de macroporos (aqueles com raio superior a 50 μm), mesoporos (raios entre 50 e 15 μm) e microporos (raios inferiores a 15 μm). Por meio dessa figura é possível analisar a influência do tamanho da amostra para o Latossolo na distribuição dos raios de poros do solo.

O espaço poroso do solo é o local onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução no solo (HILLEL, 1970). Portanto, a distribuição do tamanho dos poros do solo constitui um importante atributo para verificar as alterações na estrutura entre os diferentes tamanhos de amostras indeformadas utilizadas para determinar a curva de retenção de água no solo. Verifica-se que as curvas de frequência acumulada de raios das amostras T2 e T3 (Figuras 13 b e c), apresentaram menor saturação relativa (27%) na parte inicial (onde estão os menores poros), que a curva das amostras T1 (Figura 12 a) com saturação relativa mais elevada na mesma parte da curva (41%). Assim, as amostras T1 apresentaram maior percentagem de poros que não foram esvaziados quando analisados os mesmos intervalos para as curvas das amostras T2 e T3.

Normalmente, solos mais arenosos retêm menos água que solos mais argilosos, por possuírem proporção superior de macroporos, e por isso, perdem água com maior facilidade. Neste caso, na amostra maior (T1), o elevado teor de

areia fina (55,5%) e muito fina (29,6%), pode ter favorecido o rearranjo das partículas, aumentando o contato entre elas e, assim, a retenção de água em maiores tensões. Modificações no arranjo das partículas do solo torna-o mais heterogêneo (FIDALSKI et al., 2013) provocando a diminuição no tamanho dos poros, especialmente dos poros maiores, o que leva à redução na área da seção transversal para o fluxo de água, juntamente com o movimento do fluido, afetando com isso o movimento de água no solo (ALVES et al., 2007).

Figura 12 - Curvas da função frequência acumulada de raios, T1 (a), T2 (b) T3 (c)

Na Figura 13 pode ser mais bem visualizada a percentagem de macro, meso e microporos mostrados nas curvas de frequência acumulada de poros do Latossolo. Confirma-se que as amostras T1 apresentaram maior percentagem de microporos (48%), havendo decréscimo em função da diminuição do tamanho da amostra (T2, 43% e T3, 38%). Isso pode ter acontecido em função da acomodação das partículas de areia fina e muito fina, que estão em quantidade majoritária neste solo. Resultados parecidos foram encontrados por Ribeiro et al., (2007), que constataram diversidade na distribuição do tamanho de poros em um solo arenoso, justificados pela predominância da fração areia fina.

Na Figura 13 também se pode observar percentagens superiores de macro e mesoporos nas curvas obtidas com as amostra T3. Isto pode significar que houve menor modificação estrutural nestas amostras em função do rearranjo das partículas menores.

Figura 13 – Percentagem de macro, meso e microporos em relação à saturação relativa para o Latossolo.

Ao analisar a Figura 14, nota-se que não há diferença entre as curvas de frequência acumulada de raios de poros, confirmada pelos intervalos de confiança das curvas de retenção (Figura 8), a não ser na parte onde a saturação relativa é menor (poros menores), em que as amostra T1 apresentaram maior volume de poros cheios de água.

Não há diferenciação quando os poros estão com maior conteúdo de água, porque este solo apresenta mais resistência à modificação de sua estrutura que um solo mais argiloso, assim, o tamanho das amostras (T1, T2 e T3) não influenciou a frequência acumulada dos raios de poros no Latossolo.

É necessário esclarecer ainda que não é possível a curva alcançar o valor zero (o solo totalmente seco), pois à medida que o solo vai secando, os poros vão sendo esvaziados e a força (adsorção) com que as moléculas de água são retidas às superfícies das partículas do solo vai aumentando cada vez mais, dificultando a sua extração. Além disso, neste estudo, analisou-se a curva de retenção até a tensão de 500 kPa, uma vez que, as modificações esperadas na estrutura das amostras em função dos diferentes tamanhos são evidenciadas na parte inicial da curva, ou seja, na parte da curva com maior conteúdo de água, onde a arquitetura do solo influencia mais a retenção de água que a textura.

Figura 14 - Curvas da função frequência acumulada de raios, T1 (curva vermelho), T2 (curva azul) T3 (curva verde) para o Latossolo.

Em seguida estão apresentadas as curvas diferenciais obtidas a partir da eq (14), que representam a frequência de raios por intervalo de logaritmo de r_s (raio equivalente) para o Latossolo (Figura 14, a, b e c). A região sob a curva em cor preta representa a frequência de microporos, a área em cor cinza a frequência de mesoporos e a área em cor branca a frequência de macroporos. Verifica-se que apesar de ser um solo arenoso, com mais de 74% de areia, há frequência superior de microporos em relação às outras classes para todos os tamanhos das amostras analisadas, justificados pela alta quantidade de fração areia fina e muito fina, predominantes. Fidalski et al., (2013), ao estudar a influência da fração areia na retenção e disponibilidade de água em solos originados de arenito, constataram que a areia fina, foi responsável pela formação de poros menores e maior retenção de água, quando comparado com outro solo de textura mais grosseira.

A distribuição dos poros do solo depende da combinação dos efeitos devido à textura e estrutura do solo (ZAFFAR; SHENG-GAO 2015). Estes autores, estudando a distribuição de poros em solos argilosos e sua correlação com a matéria orgânica, classificaram os poros como primários e secundários. Os primários, que são devido à textura (ultra e criptomicroporos), retém fortemente a água no solo por adsorção, e os secundários, ou seja, os estruturais, que correspondem aos espaços dentro de aglomerados de materiais finos e grossos, como os agregados formados pelas partículas de areia, argila, silte e matéria orgânica, são suscetíveis a modificações devido ao manejo ou qualquer perturbação da estrutura do solo.

As frequências de poros obtidas para cada tamanho de amostra não diferem muito em relação à variação do conteúdo de água em cada curva, ou seja, para cada tamanho de amostra a eficiência com que a água é retirada do solo obedece a taxas de crescimento parecidas. Isso pode ser visualizado a partir dos intervalos que separam as frequências de macro, meso e microporos, que em cada curva apresenta praticamente mesma inclinação, embora não sejam estritamente iguais, isso não é suficiente para diferenciá-las.

Nestas curvas também é possível calcular o ponto de máximo pela eq.(15), isto é, a frequência máxima de raios por intervalo de $\log r_s$. Verifica-se que as amostras T1, T2 e T3 apresentaram pontos máximos de 46,5, 56 e 46,9 μm , respectivamente. Percebe-se que o raio de máxima frequência obtido para as amostras T1 e T3, não está compreendido no intervalo de macroporos, mas sim nos

mesoporos, Isto ocorreu devido ao aumento da frequência de mesoporos nestas amostras, enquanto para o T2 houve uma redução da frequência destes e aumento dos macroporos. Pires et al., (2009), verificaram modificação dos picos das curvas diferenciais de frequência de poros, para amostras do mesmo solo submetidas a ciclos umedecimento e secagem, e verificaram por meio de tomografia computadorizada que isso aconteceu por causa de modificações na estrutura do solo.

Figura 14 – Curvas diferenciais da função frequência de raios por intervalo de logaritmo de raio equivalente, para o Latossolo, T1 (a), T2 (b) e T3 (c).

Visualiza-se melhor as curvas de frequência de raios por intervalo de $\log r_s$ devido às diferenças entre as amostras na Figura 15. É possível ver que a frequência de poros não se diferencia muito para os intervalos de $\log$ de r_s . Apenas a curva azul (2), que apresentou modificação no ponto de máxima, acontecendo em um intervalo de raio um pouco superior às curvas vermelha e verde (1 e 3). Estas duas ultimas curvas tiveram os picos coincidentes, diferenciando-se apenas pela frequência máxima um pouco acima para a curva 3. Levando em consideração as poucas diferenças entre as curvas de frequência de poros e a não diferenciação das curvas de retenção (Figura 8) das quais estas curvas foram originadas, pode-se dizer que a frequência de poros para os tamanhos das amostras de solo estudadas para o Latossolo não diferiram, mesmo ocorrendo uma possível acomodação das partículas mais finas da fração areia.

Figura 15 – Curvas da função frequência de raios por intervalo de logaritmo de raio equivalente, para o Latossolo, T1, T2 e T3.

2.3.3.2 Nitossolo

As curvas de frequência acumulada de raios do Nitossolo estão apresentadas na Figura 16. Observa-se que nas curvas obtidas com as amostras T1 e T2 (Figuras 16 a e b), houve redução do percentual de mesoporos e aumento de microporos, enquanto as curvas obtidas com as amostras T3 (Figura 16 c), tiveram percentagem

maior de mesoporos e menor de microporos. A distribuição do tamanho de poros e o formato destes são muito importantes para a caracterização do espaço poroso do solo e afeta diretamente o crescimento de plantas (PAGLIAI, et al., 2003). Estes autores verificaram interrupção da continuidade dos poros solo devido a redução do espaço poroso, promovida por passadas de trator. Essas mudanças foram responsáveis pela mudança do tipo de estrutura do solo.

Percebe-se ainda que as curvas obtidas a partir das amostras T1 e T2 começaram a ter comportamento constante com a saturação relativa próxima a 0,75, ou seja, com 75% do seu espaço poroso total ainda preenchido por água. Enquanto para a curva das amostras T3, o solo perdeu um pouco mais de água. Além disso, verifica-se que os intervalos de frequência de raios de poros que os classificam diferiram bastante, principalmente na curva obtida para T3.

A textura muito argilosa desse solo contribuiu para a maior retenção de água, em função da quantidade superior de microporos, quando comparado com um solo arenoso. Porém, é perceptível pelas curvas de frequência acumulada de raios, que quando as amostras maiores (T1 e T2) foram usadas para determinar a curva de retenção, ocorreu redução da frequência de mesoporos e aumento de microporos. Estas alterações na estrutura do solo explicam a maior saturação relativa na parte inicial das curvas em função da redução do espaço poroso e aumento da superfície de contato entre as partículas. Ao mesmo tempo, as amostras menores (T3), possibilitaram a manutenção do arranjo estrutural mais próximo da condição real do solo.

Figura 16 - Curvas da função frequência acumulada de raios para o Nitossolo, T1 (a), T2 (b) T3 (c)

Por meio da Figura 17, é possível checar a frequência em porcentagem de macro, meso e microporos obtidos para o Nitossolo para os três tamanho de amostras estudado. Visualiza-se que houve maior frequência de microporos para as amostras maiores em função da redução da frequência de mesoporos. Kutílek et al., (2006), ao avaliar a influência da compressão (300 kPa), sobre a distribuição de poros, verificou que solos com maior teor de argila são mais suscetíveis a modificações, mas que em função da maior estabilidade estrutural, as modificações acontecem no domínio estrutural, com redução de microporos e maior capacidade de retenção de água.

Figura 17 – Percentagem de macro, meso e microporos em relação à saturação relativa para o Nitossolo.

As três curvas de frequência acumulada de raios do Nitossolo podem ser visualizadas na Figura 18. Verifica-se um prolongamento da curva 3 (obtida com amostras T3), em que seu poros são esvaziados até próximo de 60% do espaço poroso total do solo. Devido às alterações estruturais ocorridas nas amostras maiores (T1 e T2), a acessibilidade entre os poros do solo nestas amostras foi mais comprometida do que na amostra de menor (T3), promovendo também maior contato entre as partículas, dificultando assim, a retirada da água do solo.

Figura 18 - Curvas da função frequência acumulada de raios, T1, T2 e T3 para o Nitossolo.

Em seguida, apresentam-se as curvas diferenciais da frequência de raios por intervalo de logaritmo de r_s (Figura 19). Verifica-se que para a curva de T1 e T2 (Figura 19 a e b), o intervalo correspondente à frequência de microporos são esvaziados mais lentamente quando comparado as outras curvas das amostras T3 (Figura 19 c). Isto significa claramente que houve influência da estrutural do solo dessas amostras que está dificultando a saída de água ao se comparar com os mesmo intervalos de raios dos poros das curvas obtidas T3. O aumento do contato entre as partículas provavelmente dificultou o acesso entre os poros do solo da amostra, impedindo a saída de água ao se aplicar a tensão que equivale ao intervalo de r_s que os classificam como microporos. Além disso, ao analisar os intervalos de frequência de mesoporos, percebe-se maior eficiência na extração da água das pelas curvas das amostras T3, comparadas às T1 e T2.

Figura 19 – Curvas diferenciais da função frequência de raios por intervalo de logaritmo de raio equivalente, para o Nitossolo, T1 (a), T2 (b) e T3 (c).

Todas as curvas diferenciais de frequência de raios por intervalo de $\log r_s$, do Nitossolo, estão apresentas na Figura 20. Percebe-se a não coincidência dos seus picos, ou seja, as frequências de raios por intervalo de $\log r_s$ foram diferentes em todas as curvas, pois houve modificação dos intervalos de $\log r_s$. A curva verde (3) apresentou frequência raios superior às outras curvas e, portanto, frequência máxima de raios também mais elevada. Porém, o valor do ponto de máxima maior ocorreu na curva vermelha (1) devido a não coincidência das curvas e alteração dos intervalos de $\log r_s$ com o visível deslocamento desta curva para a direita do gráfico, onde estão os intervalos de r_s maiores.

Estas diferenças entre os intervalos e frequência de raios indicam que pode ter havido modificação na organização estrutural do solo dentro das amostras, principalmente por este ser um solo muito argiloso, com rede poros mais complexa. Assim, diferentes tamanhos de amostra podem levar a resultados diferentes da frequência de raios e nos intervalos de classificação dos poros do solo.

Figura 20 – Curvas da função frequência de raios por intervalo de logaritmo de raio equivalente, para o Nitossolo, T1, T2 e T3.

3 CONCLUSÕES

O tamanho da amostra influenciou a curva de retenção da água no solo devido à complexidade da organização natural dos poros do solo, principalmente no Nitossolo, afetando a continuidade dos feixes capilares. Assim, as curvas de retenção do Nitossolo apresentaram-se diferentes em função do tamanho da amostra utilizada, enquanto as do Latossolo não foram diferentes na maior parte de sua extensão.

A utilização de amostra de tamanho reduzido favoreceu a maior retenção de água, pois nestas houve menor diferenciação do arranjo estrutural do solo, permitindo a continuidade e acessibilidade dos poros do interior com aqueles da superfície da amostra. Portanto, quanto menor a amostra maior a possibilidade de serem atendidas as condições para interpretação correta da retenção de água no solo pela teoria da capilaridade.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 4, p. 617 – 625, 2007.
- ANDERSON, J.M. INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford: CAB International, 1992. 171p.
- BACHMANN, J.; HORTON, R.; VAN DER PLOEG, R.R.; WOCHEA, S. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.564-567, 2000.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da material orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Genesis, Porto Alegre 1999. p. 9 – 26,
- BERKOWITZ, B.; SILLIMAN, S.E.; DUNN, A.M. Impact of the capillary fringe on local flow, chemical migration and microbiology. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, n. 2, p. 534 - 548, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013. 716p.
- BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1939 – 1948, 2011.
- CHAHAL, R.S. Effecto fentrapped air and suction on matric suction. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p.131-134, 1966.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; LEPSH, I. F. Stratigraphical discontinuities, tropical Landscape evolution and soil distribution relationships in a case study in SE-Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 673 – 683, 2002.
- CUBILLA, M.; REINERT, D.T.; AITA, C. REICHERT, J. M. Plantas de cobertura do solo: Uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 71, p. 29 – 32, 2002.
- DIAS JUNIOR, M.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 24. n. 2, p.337-346. 2000.

EL-SWAIFY, S.A.; HENDERSON, D. W. Water retention by osmotic swelling of certain colloidal clays with varying ionic composition. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.18, p.223-232. 1967.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA – SPI, 2006. 360p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Conservation service. Soil Survey Laboratory Methods and procedures for collecting soil samples: soil survey investigations. Washington, 1972. (Report 1).

ESTADOS UNIDOS. **Soil Survey Manual**. Washington: Conservation Service – Department of Agriculture (USDA. Agriculture Hand-book, 18), 1951. 503p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J.; AULER, P.A.M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos nas formações Caiuá e Paravanaí. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 613 – 621, 2013.

FIGUEREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 164p..Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 19, n. 21, p. 319 – 328, 1960.

GROHMANN, F.; MEDINA, H.P. Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, , v.21 p.285-295, 1962.

GROSSMAN, R B.; REINSH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of Soil Analysis, IV**. Physical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 201 – 225.

GUERIF, J. Analyse de la porosite: Application à l'étude du compactage des sols. In: MONIER, G. ; GROSS, M.J.(Ed.). **Soil compaction and regeneration**. Roterdan, CEE, 1987. p.122-131.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil-water retention characteristics from particle-size distribution, organic-matter percent, and bulk-density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1633-1635, 1979.

HAINES, W.B. Studies in the physical properties of soil. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v.20, p.97-116, 1930.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

HUNT, A.G.; EWING, R.P.; HORTON, R. What's Wrong with Soil Physics? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 6, p. 1877-1887, 2013.

KIEHL, E.J. Manual de edafologia. **Relações solo-planta: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857 - 867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Society of America, 1986. p.365-662,

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G. ;KIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. Amsterdam: Elsevier, 1983. 228p. (Developments in Soil Science, 13).

KUTÍLEK, M.; JENDELE, L.; PANAYIOTOPOULOS, K.P. The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-modal soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 27-37, 2006.

LAKE, L.W. Enhanced oil recovery. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1989. 550p.

LARSON, R.G.; MORROW, N.R. Effects of sample-size on capillary pressures in porous-media. **Powder Technology**, v. 30, n. 2, p. 123-138, 1981.

LEAMER, R.W.; SHAW, B.A simple apparatus for measuring noncapillary porosity in extensive scale. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v.33, p.1003-1008, 1941.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2012. 346p..

LU, S.; SUN, F.; ZONG, Y. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). **Catena**, Amsterdam, v. 114, p. 37-44, 2014.

MACHADO J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.495-502, 2008.

MARSHALL, T.L. The nature, development and significance of soil structure. In: NEALE, G.J.. (Ed.). **Transactions of the International Society of Soil Science Communications IV and V**. Palmerston North, New Zealand, 1962. p.243-257.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção de água pelo solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p.383-392, 1993.

MUNOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; ALVAREZ-BENEDI, J.; BARTOLI, F. Field evaluation of the new philip-dunne permeameter for mensuring saturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, Dordrecht, v. 167, n. 1, p.9-24, 2002.

OR, D.; WRAITH, J.M. **Agricultural and Environmental Soil Physical**. Logan: USD, 1997. 218p.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 119-129, 2003.

PIRES, L.F.; REICHARDT, K.; COOPER, M.; CÁSSARO, F.A.M.; DIAS, N.M.P.; BACCHI, O.O.S. 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, v. 81, n. 1, p. 151 – 161, 2009.

R CORE TEAM (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2015.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p 213-234, 1991.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros de seis classes de solos da região de Lavras – MG. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167 – 1175, 2007.

RICHARDS, L.A. Methods of meansuring soil moisture tension. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, p. 95-12, 1949.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. Part I: A critical comparison of techniques for determining the available water capacity and moisture characteristic curve of a soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 16, p.1-15, 1965.

SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9 – 26.

SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F.; MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 470, p. 65-74, 2012.

UHLAND, R.E. Rapid method for determining soil moisture. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 15, p. 391-393, 1951.

VAN DENBERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, P.; SOMBROEK, W.G.L. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 3/4, p. 161-180, 1997.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VAN LIER, Q.J (Ed). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. 298p.

WILKINSON, G.E.; KLUTE, A. The temperature effect on the equilibrium energy status of water held by porous media. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, v.26, p.326-329, 1962.

ZAFFAR, M.; LU, S.-G. Pore Size Distribution of Clayey Soils and Its Correlation with Soil Organic Matter. **Pedosphere**, Nanjing, v. 25, n. 2, p. 240-249, 2015.

ZHOU, D.G.; STENBY, E.H. Interpretation of capillary-pressure curves using invasion percolation theory. **Transport in Porous Media**, New York, v. 11, n. 1, p. 17-31, 1993.

ANEXO

ANEXO A - Densidade do solo (ρ), conteúdo de água a base de massa (U) e conteúdo de água volumétrica das amostras T1 (0,075 m), T2 (0,05 m) e T3 (0,025m) para todas as tensões estudadas do Latossolo e Nitossolo

(Continua)

Tensão (kPa)	Latossolo			Nitossolo		
	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)
Tamanho 1 (0,075 m)						
0,5	1551,8	0,234	0,363	1334,4	0,332	0,444
0,5	1580,9	0,221	0,350	1335,1	0,353	0,471
0,5	1373,9	0,300	0,413	1314,2	0,346	0,455
0,5	1477,3	0,266	0,393	1338,4	0,336	0,449
0,5	1515,6	0,243	0,368	1319,0	0,352	0,465
1	1478,1	0,245	0,363	1308,8	0,328	0,430
1	1464,6	0,246	0,360	1327,5	0,315	0,419
1	1416,0	0,289	0,409	1343,2	0,310	0,416
1	1366,9	0,321	0,439	1360,4	0,315	0,429
1	1448,1	0,259	0,374	1287,3	0,330	0,425
4	1563,9	0,166	0,259	1328,0	0,280	0,372
4	1548,3	0,166	0,257	1305,2	0,280	0,366
4	1478,0	0,172	0,254	1391,0	0,273	0,380
4	1532,0	0,167	0,256	1334,1	0,270	0,360
4	1542,3	0,170	0,262	1272,4	0,257	0,327
6	1542,4	0,138	0,213	1242,9	0,278	0,346
6	1445,4	0,136	0,197	1261,5	0,283	0,357
6	1547,0	0,138	0,214	1343,6	0,245	0,330
6	1573,8	0,139	0,219	1377,7	0,273	0,376
6	1472,3	0,138	0,204	1290,8	0,282	0,364
10	1489,3	0,110	0,164	1272,8	0,269	0,342
10	1548,3	0,118	0,183	1442,1	0,237	0,341
10	1514,5	0,115	0,174	1399,9	0,257	0,360
10	1558,8	0,145	0,225	1325,6	0,272	0,360
10	1548,7	0,154	0,238	1442,1	0,237	0,341

ANEXO A - Densidade do solo (ρ), conteúdo de água a base de massa (U) e conteúdo de água volumétrica das amostras T1 (0,075 m), T2 (0,05 m) e T3 (0,025m) para todas as tensões estudadas do Latossolo e Nitossolo

(Continuação)

Tensão (kPa)	Latossolo			Nitossolo		
	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)
33	1484,4	0,120	0,179	1326,5	0,264	0,350
33	1557,5	0,115	0,180	1300,2	0,268	0,349
33	1558,0	0,115	0,179	1307,4	0,276	0,360
33	1574,3	0,115	0,181	1324,8	0,264	0,350
33	1515,6	0,114	0,174	1335,2	0,261	0,348
100	1544,0	0,086	0,133	1311,8	0,270	0,354
100	1512,7	0,090	0,136	1352,3	0,267	0,361
100	1562,0	0,095	0,148	1391,8	0,263	0,366
100	1514,1	0,095	0,144	1439,2	0,227	0,327
100	1428,9	0,098	0,140	1331,2	0,257	0,342
500	1370,4	0,107	0,147	1350,0	0,255	0,344
500	1612,5	0,106	0,172	1312,3	0,264	0,347
500	1574,3	0,108	0,170	1353,2	0,264	0,357
500	1527,8	0,103	0,157	1444,4	0,223	0,323
500	1511,6	0,105	0,158	1309,5	0,272	0,356
Tamanho 2 (0,05 m)						
0,5	1495,1	0,284	0,424	1244,5	0,369	0,460
0,5	1502,9	0,272	0,409	1296,7	0,366	0,474
0,5	1515,8	0,273	0,414	1425,6	0,306	0,436
0,5	1424,0	0,288	0,410	1402,7	0,309	0,433
0,5	1467,5	0,278	0,408	1331,9	0,367	0,489
1	1522,6	0,237	0,360	1434,8	0,296	0,424
1	1463,3	0,272	0,398	1316,4	0,338	0,445
1	1490,9	0,275	0,410	1322,3	0,338	0,447
1	1473,9	0,266	0,392	1380,4	0,331	0,457
1	1526,7	0,252	0,385	1357,2	0,333	0,452

ANEXO A - Densidade do solo (ρ), conteúdo de água a base de massa (U) e conteúdo de água volumétrica das amostras T1 (0,075 m), T2 (0,05 m) e T3 (0,025m) para todas as tensões estudadas do Latossolo e Nitossolo

(Continuação)

Tensão (kPa)	Latossolo			Nitossolo		
	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)
4	1488,6	0,176	0,261	1357,7	0,286	0,388
4	1483,1	0,172	0,255	1374,1	0,302	0,415
4	1520,7	0,174	0,265	1315,7	0,260	0,342
4	1553,5	0,171	0,265	1286,8	0,295	0,380
4	1502,1	0,165	0,247	1350,6	0,296	0,400
6	1501,5	0,146	0,219	1310,0	0,278	0,364
6	1529,5	0,145	0,223	1401,6	0,289	0,405
6	1508,0	0,140	0,211	1315,8	0,272	0,358
6	1508,0	0,140	0,211	1284,3	0,292	0,376
6	1480,0	0,147	0,217	1301,5	0,291	0,379
10	1488,4	0,121	0,180	1345,3	0,288	0,387
10	1474,4	0,126	0,185	1365,8	0,259	0,353
10	1475,2	0,122	0,180	1280,2	0,283	0,363
10	1467,2	0,121	0,177	1358,3	0,282	0,383
10	1541,8	0,144	0,223	1351,6	0,271	0,366
33	1470,1	0,115	0,169	1265,4	0,252	0,319
33	1499,4	0,114	0,171	1297,6	0,271	0,352
33	1554,3	0,125	0,194	1331,6	0,282	0,375
33	1507,3	0,094	0,141	1451,2	0,238	0,346
33	1523,5	0,112	0,170	1462,9	0,234	0,342
100	1547,5	0,060	0,092	1245,9	0,273	0,340
100	1454,6	0,060	0,088	1374,8	0,276	0,380
100	1498,4	0,048	0,072	1394,4	0,276	0,384
100	1461,0	0,071	0,104	1244,4	0,259	0,322
100	1578,6	0,073	0,115	1325,5	0,286	0,379

ANEXO A - Densidade do solo (ρ), conteúdo de água a base de massa (U) e conteúdo de água volumétrica das amostras T1 (0,075 m), T2 (0,05 m) e T3 (0,025m) para todas as tensões estudadas do Latossolo e Nitossolo

(Continuação)

Tensão (kPa)	Latossolo			Nitossolo		
	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)
500	1450,3	0,100	0,145	1405,0	0,232	0,327
500	1517,8	0,090	0,136	1431,7	0,232	0,332
500	1513,6	0,098	0,149	1281,5	0,250	0,320
500	1495,4	0,091	0,137	1347,6	0,277	0,373
500	1577,0	0,090	0,142	1301,8	0,263	0,342
Tamanho 3 (0,025 m)						
0,5	1576,2	0,270	0,425	1310,8	0,447	0,586
0,5	1554,2	0,278	0,431	1295,6	0,455	0,590
0,5	1532,0	0,295	0,452	1308,1	0,429	0,562
0,5	1601,2	0,233	0,373	1359,2	0,403	0,547
0,5	1576,9	0,257	0,405	1327,6	0,433	0,576
1	1366,2	0,313	0,428	1385,6	0,402	0,557
1	1403,0	0,300	0,421	1390,0	0,406	0,564
1	1446,6	0,300	0,433	1325,4	0,410	0,543
1	1544,9	0,260	0,402	1438,1	0,389	0,559
1	1411,0	0,389	0,549	1313,0	0,424	0,557
4	1432,2	0,185	0,265	1321,2	0,287	0,379
4	1539,6	0,165	0,254	1380,9	0,306	0,422
4	1508,8	0,168	0,254	1287,6	0,334	0,430
4	1405,9	0,176	0,248	1267,7	0,343	0,434
4	1461,6	0,170	0,248	1370,4	0,317	0,434
6	1504,3	0,143	0,214	1358,7	0,309	0,420
6	1474,4	0,140	0,207	1343,2	0,314	0,422
6	1581,9	0,128	0,203	1392,9	0,308	0,429
6	1661,8	0,140	0,232	1360,4	0,302	0,411
6	1422,2	0,144	0,205	1283,1	0,315	0,405

ANEXO A - Densidade do solo (ρ), conteúdo de água a base de massa (U) e conteúdo de água volumétrica das amostras T1 (0,075 m), T2 (0,05 m) e T3 (0,025m) para todas as tensões estudadas do Latossolo e Nitossolo

(Conclusão)

Tensão (kPa)	Latossolo			Nitossolo		
	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	U (kg kg ⁻¹)	θ (m ³ m ⁻³)
10	1476,2	0,108	0,159	1332,9	0,276	0,368
10	1678,3	0,133	0,223	1241,9	0,293	0,364
10	1544,2	0,116	0,180	1347,6	0,292	0,393
10	1476,2	0,108	0,159	1371,5	0,285	0,391
10	1616,7	0,116	0,188	1317,3	0,304	0,401
33	1543,5	0,093	0,144	1273,4	0,283	0,361
33	1488,7	0,105	0,156	1295,5	0,278	0,360
33	1572,5	0,085	0,133	1265,0	0,278	0,352
33	1528,5	0,081	0,123	1346,8	0,285	0,384
33	1470,6	0,103	0,151	1281,5	0,289	0,370
100	1691,4	0,123	0,209	1262,3	0,281	0,355
100	1512,2	0,040	0,061	1367,1	0,284	0,388
100	1660,2	0,047	0,078	1313,0	0,282	0,370
100	1439,9	0,125	0,180	1289,6	0,292	0,377
100	1680,3	0,046	0,077	1172,1	0,297	0,349
500	1580,4	0,070	0,111	1319,8	0,266	0,351
500	1670,4	0,067	0,111	1287,7	0,247	0,318
500	1582,9	0,076	0,120	1239,4	0,245	0,304
500	1578,0	0,074	0,116	1288,6	0,260	0,335
500	1419,9	0,068	0,097	1281,5	0,267	0,342