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

**Microestrutura do solo relacionada a propriedades físico-hídricas de
Latossolos brasileiros**

Thaís Nascimento Pessoa

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

**Piracicaba
2020**

Thaís Nascimento Pessoa
Engenheira Agrônoma

Microestrutura do solo relacionada a propriedades físico-hídricas de
Latossolos brasileiros

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2020

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

Pessoa, Thaís Nascimento

Microestrutura do solo relacionada a propriedades físico-hídricas de Latossolos
Brasileiros/Thaís Nascimento Pessoa. - - versão revisada de acordo com a resolução
CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

133 p.

Tese (Doutorado) - - USP/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Microagregação 2. Estabilidade estrutural 3. Retenção e condução da água
no solo 4. Microtomografia de raios-X 5. Mineralogia do solo. I. Título

Dedico esta tese

Ao meu pai Raimundo Carlos Pessoa da Silva,

À minha mãe Marleide Nascimento Pessoa,

Às minhas irmãs Thainara e Thaiane.

Com todo o meu amor!

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me mostrar o melhor caminho a seguir e ser meu motivo para acreditar em todos os meus sonhos.

À minha família pelo carinho, aos meus pais por sempre me incentivarem mostrando a importância dos estudos e da educação. Às minhas irmãs Thainara e Thaiane, minhas crianças para sempre. Obrigada por tanto amor, a saudade sempre foi enorme.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, ao PPG em Solos e Nutrição de Plantas e a sua coordenação pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional com o processo de Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudos entre março de 2016 e fevereiro de 2017.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de estudos entre março de 2017 e até o término do Doutorado.

Ao professor Álvaro Pires da Silva (*in memoriam*) pela orientação no meu primeiro ano de doutorado, seus ensinamentos e incentivo.

Ao professor Paulo Leonel Libardi por ter me acolhido como orientador e me auxiliado no desenvolvimento desta tese, seus ensinamentos, incentivo, pela amizade e carinho. Obrigada por tudo!

Ao professor Miguel Cooper pelo apoio nas análises micromorfológicas, supervisão no estágio da disciplina de Física do Solo e pela sua amizade.

Ao professor Sérgio Oliveira Moraes, pela presença agradável em momentos importantes e pelas boas conversas.

À Luciana Gomes Castro pela amizade e inspiração em seguir o caminho da Ciência do Solo, me apoiando desde a graduação na UESB.

Ao laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da USP/ESALQ, e ao técnico e querido amigo Rossi, pelo suporte e apoio em grande parte das análises físicas.

Ao laboratório de Mineralogia do Solo do Departamento de Ciência do Solo da USP/ESALQ, ao professor Tiago Osório e ao técnico Leandro pelo apoio e suporte em análises.

Ao laboratório de Micromorfologia do Solo do Departamento de Ciência do Solo da USP/ESALQ e aos técnicos Chiquinho e Sônia por todo suporte no processo e preparo dos blocos e lâminas delgadas.

Ao laboratório de Química do Solo do Departamento de Ciência do Solo da USP/ESALQ, ao técnico Luiz Silva pelo suporte nas análises.

Ao laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da USP/ESALQ, local em que realizei análises e ao técnico Francisco Bernardo Dias (querido Chiquinho).

Ao Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera da USP, o NUPEGEL, a Débora Ishida, a professora Célia Regina Montes e aos estagiários Diego, Carol e Roberta pelo suporte nas análises mineralógicas, pela atenção e amizade.

Ao pesquisador Carlos Manoel Pedro Vaz, ao técnico Paulo Renato Orlandi Lasso e a EMBRAPA Instrumentação Agropecuária pelo suporte e realização das análises microtomográficas.

Ao Departamento de Ciência do Solo da USP/ESALQ e ao professor Pablo Vidal-Torrado pelo suporte na realização das coletas de amostras de solos.

Ao professor José Fernandes de Melo Filho e alunos da UFRB pelo apoio e suporte nas coletas de amostras de solo realizadas em um perfil de solo localizado na Universidade. Agradeço também a Carolina Malala, ao Luiz Francisco e alunos da UFRB pela participação e ajuda nas coletas.

À professora Neide Fabiola Balarezo Giarola pelo apoio e auxílio nas coletas de amostras de solo realizadas em um perfil de solo localizado na área do IAPAR em Ponta Grossa - PR.

À Usina Colorado, responsável pela fazenda Lageado 4 pelo apoio e autorização das coletas realizadas em uma área de floresta nativa da fazenda, localizada em Miguelópolis - SP.

Ao grupo Capin Comércio Agrícola Pecuária Industrial pelo apoio, suporte e autorização das coletas realizadas em uma área de floresta nativa da fazenda Capão da Cruz, localizada em Luis Antônio - SP.

À Fundação AGRISUS e a FEALQ pelo suporte financeiro na mobilidade acadêmica realizada na Alemanha, no Departamento de Ciência do Solo da UniKassel.

À UniKassel, ao professor Stephan Peth pela supervisão, e a toda equipe do laboratório de mecânica, hidrologia e análises de imagem, em especial à Margit Rode, Daniel Uteau-Puschmann, Jocelyn Ormeno e Leila Shafea, pelo apoio, parceria científica, carinho, amizade e por terem deixado o meu período em Witzenhausen mais leve e feliz.

Aos amigos do PPG - Solos e Nutrição de Plantas por dividirem bons momentos, sejam científicos ou de descontração: Glêvia (GK), Josimar Veira, Matheus Barreto (baiano), Nayana Alves, Gabi Souza, Gustavo de Godoy.

Aos amigos e colegas de orientação do PPG Solos: Aline Martineli, Camila Cassante, Fernando Gimenes, Gabriela Hellmeister, Ismael Meurer, Laiane Silva, Márcio Renato Nunes,

Tamires Souza e Verena Benício. Agradeço a todos vocês pela convivência diária, amizade e muita Física do Solo.

Ao Cezar Rebouças (Cezinha) pela amizade, ajuda e troca de conhecimentos em diversos momentos deste ciclo.

À Débora (Debrinha) pela amizade. Obrigada pela sua torcida em todos os momentos.

Aos meus amigos queridos de uma vida inteira, que torcem por mim e que acompanharam a trajetória até aqui: Carol, Eloito, Mayara, Eloísa, Kamila e André.

Aos meus amigos de Viçosa que mesmo longe sempre me apoiaram: Josiane Batista, Luiz Aníbal da Silva, Maiara Cazotti, Nathalie Cruz Sena e Francis Tenório.

À Cátia Simon, Carla Simon, Cristiane Formigosa e Vitória Derisso pela convivência diária, amizade, apoio e torcida. Obrigada por terem sido minha família em Piracicaba!

Por fim, a todos que de alguma forma me auxiliaram e me apoiaram para que este trabalho fosse realizado, sozinha jamais conseguiria.

MUITO OBRIGADA!!!

“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.”

- *João Guimarães Rosa*

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	13
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	15

RESUMO

Microestrutura do solo relacionada a propriedades físico-hídricas de Latossolos brasileiros

Latossolos são predominantes no território brasileiro e mais frequentes em regiões de clima tropical. Estes solos se caracterizam por serem altamente intemperizados, de mineralogia composta por óxidos de Fe e Al e caulinita, fatores que, em conjunto, influenciam diretamente no grau de microagregação, alterando toda a dinâmica do seu espaço poroso e seu comportamento físico-hídrico. Devido à importância destes solos e à presença de algumas lacunas a serem preenchidas em relação a essa temática, os principais objetivos desta tese foram avaliar: (a) a estabilidade estrutural de quatro Latossolos e entender a relação com a mineralogia do solo; (b) propriedades físico-hídricas de Latossolos com ênfase na retenção e condução da água no solo e (c) a microestrutura e a porosidade de Latossolos com uso de técnicas 2D e 3D. Pelas análises realizadas e os dados obtidos dispostos na forma de capítulos, as principais conclusões foram: I. A goethita parece ser mais importante na estabilidade estrutural do solo do que a hematita e, conjuntamente com a gibbsita, mostrou potencial na formação de microagregados pequenos e estáveis, como visto no Latossolo Vermelho Distroférico. II. Como a estrutura é fundamental para se definir o comportamento físico-hídrico do solo, os Latossolos com maior quantidade de microagregados apresentaram maior porosidade inter e intra-agregados, resultado da distribuição de poros bimodal. III. O Latossolo Vermelho Distroférico e o Acriférico apresentaram alto grau de microagregação e um sistema poroso mais bem conectado, fatos que foram confirmados por análises de imagem 3D, o que pode justificar a alta condutividade hidráulica do solo saturado - K_{sat} , nestes Latossolos. Com relação ao tipo de poros encontrados pela análise de imagem 2D não foi constatada maior K_{sat} quando o solo sempre exibiu poros do tipo complexos, como no caso do Latossolo Amarelo Distrocoeso.

Palavras-chave: Microagregação; Estabilidade estrutural; Água no solo; Microtomografia de raios-X; Mineralogia do solo

ABSTRACT

Soil microstructure related to physical-hydric properties of Brazilian Oxisols

Oxisols, which are the soils most commonly found in tropical climate regions, are the predominant in the Brazilian territory. These soils are characterized as highly weathered, with mineralogy composed of oxides of Fe and Al and kaolinite, factors that directly influence the degree of micro-aggregation, changing the entire dynamics of their porous space and their physical-hydric behavior. Due to the importance of these soils and the presence of some gaps to be filled in relation to this theme, the main objectives of this thesis were to evaluate: (a): the structural stability of four Oxisols and understand its relationship to soil mineralogy; (b) the physical-hydric properties of them with emphasis on soil water retention and conduction; and (c) their microstructure and porosity, using 2D and 3D techniques. According to the results, the main conclusions were: I. Goethite seems to be more important in soil structural stability than hematite and which, together with gibbsite, indicated having the potential to form small and stable micro-aggregates, as seen in the Rhodic Haplustox. II. As the structure is fundamental to define the soil physical-hydric behavior, the Oxisols with higher amount of micro aggregates showed higher inter- and intra-aggregate porosity, a result of bimodal pore size distribution. III. The Rhodic Haplustox and Anionic Acrustox showed a high degree of micro-aggregation and a better connected porous system, facts that were confirmed by 3D image analysis, which may justify the high saturated hydraulic conductivity - K_{sat} , in these Oxisols; regarding the type of pores found by 2D image analysis, K_{sat} was not found to be higher when the soil always had complex pores, as in the case of the Xanthic Kandustox.

Keywords: Microaggregation; Structural stability; Soil water; X-ray microtomography; Soil mineralogy

1. INTRODUÇÃO GERAL

A classe dos Latossolos recobre a maior parte do território brasileiro, compreendendo solos altamente intemperizados e de mineralogia predominantemente composta por óxidos de ferro e alumínio e o argilomineral caulinita. A agregação e as propriedades físicas nestes solos estão associadas à presença destes óxidos, que são os principais agentes de estabilização em solos tropicais. A presença dos óxidos de ferro e alumínio reordenam as placas de caulinita, desajustando-as e promovendo a formação de uma estrutura microgranular altamente estável. O contraste entre os constituintes mineralógicos contribui para que estes solos apresentem diferentes desempenhos em relação à formação da sua estrutura, o que diretamente modifica toda a conformação do espaço poroso e a funcionalidade do solo.

Os óxidos de ferro e alumínio são assim minerais de elevada importância nos processos de agregação dos Latossolos e a sua formação está diretamente ligada a fatores ambientais e edáficos. Dentre os óxidos de ferro mais comuns nos Latossolos brasileiros, destacam-se a goethita e a hematita, devido à alta estabilidade termodinâmica que apresentam quando comparadas a outras formas de óxidos de Fe nos Latossolos. No que se refere à presença dos óxidos de alumínio, a gibbsita, quando presente nos Latossolos, indica um estágio avançado dos processos de intemperização, estando relacionada a intensa lixiviação de bases trocáveis. Estes minerais possuem diferenças morfológicas que estão relacionadas a diferentes propriedades associadas à área de superfície específica, modificando todos os processos físico-químicos que ocorrem no solo.

Os fenômenos de superfície são responsáveis por distintas reações que ocorrem nos Latossolos, interferindo no grau de agregação e, conseqüentemente, na dinâmica da estrutura do solo. Devido à presença de microagregados, os Latossolos apresentam desempenho diferenciado quanto à retenção de água pois, mesmo com elevados teores de argila, podem se assemelhar a solos de textura arenosa, apresentando alta permeabilidade. Outro fator é sobre a elevada microporosidade intra-agregados, que influencia na retenção de água em baixos potenciais mátricos. Dessa forma, as propriedades físicas do solo como a lei da infiltração, a condutividade hidráulica do solo, a curva de retenção da água e a permeabilidade do solo ao ar, ligadas ao espaço poroso, são diretamente alteradas.

A hipótese deste trabalho é que a proporção dos óxidos de Fe e Al aumentam a estabilidade dos agregados, o grau de microagregação, a porosidade inter e intra-agregados, bem como a conectividade dos poros, fatores estes que refletem na distribuição e morfologia dos poros. Nesta perspectiva, o objetivo geral deste estudo é caracterizar de forma detalhada os aspectos ligados ao sistema poroso, agregação, retenção e condução de água em Latossolos provenientes de diferentes

materiais de origem, para avaliação da ligação entre propriedades físicas e principalmente características mineralógicas do solo.

O trabalho está dividido em seis capítulos: 1. Introdução geral; 2. Revisão de literatura; 3. Descrição e caracterização dos solos; 4. Avaliação da estabilidade estrutural de quatro Latossolos e sua relação com a mineralogia do solo; 5. Propriedades físico-hídricas de Latossolos: retenção e condução da água no solo e 6. Caracterização da estrutura e da porosidade de Latossolos com uso de técnicas 2D e 3D.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi estudada a influência da química e da mineralogia da fração argila nos processos de agregação de quatro Latossolos, em associação com a avaliação da geometria do espaço poroso e de propriedades de retenção e condução da água nestes solos. Pelos resultados obtidos e discutidos na forma de capítulos, pode-se concluir que:

- I. I. A goethita parece ser mais importante na estabilidade estrutural do solo do que a hematita e, conjuntamente com a gibbsita, mostrou potencial na formação de microagregados pequenos e estáveis, como visto no Latossolo Vermelho Distroférrico.
- II. Como a estrutura é fundamental para se definir o comportamento físico-hídrico do solo, os Latossolos com maior quantidade de microagregados apresentaram maior porosidade inter e intra-agregados, resultado da distribuição de poros bimodal.
- III. O Latossolo Vermelho Distroférrico e o Acriférrico apresentaram alto grau de microagregação e um sistema poroso mais bem conectado, fatos que foram confirmados por análises de imagem 3D, o que pode justificar a alta condutividade hidráulica do solo saturado - K_{sat} , nestes Latossolos. Com relação ao tipo de poros encontrados pela análise de imagem 2D não foi constatada maior K_{sat} quando o solo sempre exibiu poros do tipo complexos, como no caso do Latossolo Amarelo Distrocoeso.