

**INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA E MORFOLÓGICA DE UM
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO EM ÁREAS DE PASTAGEM
REVEGETADAS POR LEGUMINOSAS ARBÓREAS**

LUCAS LUÍS FAUSTINO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2018**

**INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA E MORFOLÓGICA DE UM
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO EM ÁREAS DE PASTAGEM
REVEGETADAS POR LEGUMINOSAS ARBÓREAS**

LUCAS LUÍS FAUSTINO

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO – 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCH / UENF

048/2018

F268 Faustino, Lucas Luís.

Indicadores da qualidade física e morfológica de um Argissolo Vermelho-Amarelo em áreas de pastagem revegetadas por leguminosas arbóreas / Lucas Luís Faustino. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

111 f. : il.

Bibliografia: 104 – 111.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2018.

Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

1. Recuperação de Áreas Degradadas. 2. Resistência Mecânica do Solo. 3. Compactação do Solo. 4. Agregados do Solo - Análise Morfométrica. 5. Intervalo Hídrico Ótimo. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 631.4

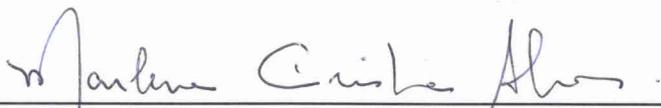
INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA E MORFOLÓGICA DE UM
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO EM ÁREAS DE PASTAGEM
REVEGETADAS POR LEGUMINOSAS ARBÓREAS

LUCAS LUÍS FAUSTINO

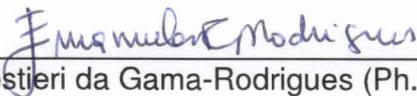
“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal.”

Aprovada em 23 de fevereiro de 2018.

Comissão Examinadora:



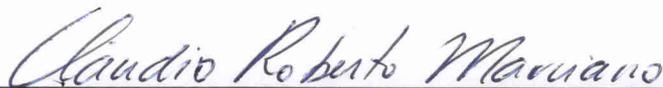
Prof. Maílene Cristina Alves (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) - UNESP Ilha
Solteira



Prof. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) - UENF



Prof. Ricardo Ferreira Garcia (D.Sc., Engenharia Agrícola) - UENF



Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) - UENF
(Orientador)

A Deus, por ter me iluminado e me dado forças para vencer mais essa etapa. Aos meus pais, José Faustino e Glória, que com toda garra e amor tornaram possível a realização deste sonho. À minha irmã, Verônica, e ao meu sobrinho e afilhado, Arthur, que sempre torceram por mim. À minha esposa, Nádia, pela paciência e por estar sempre ao meu lado. Aos meus amigos, que sempre estiveram comigo nos melhores e piores momentos tornando essa caminhada mais leve e alegre.

Dedico e ofereço.

“Mantenha seus pensamentos positivos, porque seus pensamentos tornam-se suas palavras. Mantenha suas palavras positivas, porque suas palavras tornam-se suas atitudes. Mantenha suas atitudes positivas, porque suas atitudes tornam-se seus hábitos. Mantenha seus hábitos positivos, porque seus hábitos tornam-se seus valores. Mantenha seus valores positivos, porque seus valores... Tornam-se seu destino”

(Mahatma Gandhi)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante em minha vida;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos (LSOL), pela oportunidade de realização deste curso;

À FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, pela concessão da bolsa de estudo, que permitiu dedicar-me em tempo integral à realização deste doutorado;

Aos meus familiares, em especial meus pais, irmã e afilhado-sobrinho, pelo amor, pela compreensão e pelo apoio em todos os momentos;

À minha esposa, Nádia, pela paciência, pelo carinho, pela compreensão e pela dedicação para comigo, em todos os momentos dessa caminhada;

Ao meu orientador, o professor Cláudio Roberto Marciano, pela orientação, pela amizade, pela paciência, pela confiança, pelos ensinamentos e pelo incentivo na realização deste trabalho;

Aos demais professores do LSOL, pela oportunidade de aprendizado, pelo incentivo, pela confiança e pela contribuição para os meus conhecimentos durante o curso de doutorado;

Aos amigos de Laboratório de Solos, salas 123 e 126, Seldon, Tarciana, Renato, David e Priscila, pelo companheirismo e pela amizade dedicada por todo este tempo;

Aos amigos de Viçosa, que, mesmo distantes, sempre estiveram ao meu lado, me apoiando em momentos difíceis, mostrando o verdadeiro valor da amizade;

Aos amigos de Campos dos Goytacazes, que sempre torceram para que tudo desse certo, me apoiando e incentivando;

Aos técnicos de Laboratório de Solos, Kátia, Vanilda e Ederaldo, pela amizade, pelos ensinamentos e pelos momentos de descontração entre uma análise e uma escrita;

Ao secretário do Laboratório de Solos, André, pela amizade e pelas conversas agradáveis durante o cafezinho;

Ao técnico Milton Pereira Soares Júnior, do LECIV/CCT, pela amizade e pelo empréstimo de equipamento;

Ao professor Almy Júnior Cordeiro de Carvalho, pela disponibilidade de uso do scanner do Laboratório de Fitotecnia;

E a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Qualidade física do solo.....	5
2.2. Degradação dos solos.....	6
2.3. Leguminosas arbóreas.....	9
2.4. Atributos físicos do solo.....	10
2.5. Formação de agregados.....	12
2.6. Estabilidade e morfometria de agregados.....	14
2.7. Resistência tênsil dos agregados.....	16
2.8. Resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo (IHO).....	18
3. TRABALHOS	21
3.1. RESISTÊNCIA TÊNSIL DE AGREGADOS E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM SOLO SOB MATA ATLÂNTICA, LEGUMINOSAS ARBÓREAS E PASTAGEM.....	22
RESUMO.....	22
ABSTRACT.....	23
INTRODUÇÃO.....	24
MATERIAL E MÉTODOS	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO	33

CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
3.2 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E DENSIDADES CRÍTICAS DE UM SOLO SOB MATA ATLÂNTICA, LEGUMINOSAS ARBÓREAS E PASTAGEM.....	57
RESUMO	57
ABSTRACT.....	58
INTRODUÇÃO.....	58
MATERIAL E MÉTODOS	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
3.3 DISTRIBUIÇÃO POR TAMANHO E MORFOMETRIA DE AGREGADOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB SISTEMAS FLORESTAIS E PASTO	78
RESUMO.....	78
ABSTRACT.....	78
INTRODUÇÃO.....	79
MATERIAL E MÉTODOS.....	87
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
4. RESUMO E CONCLUSÕES	102
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

RESUMO

FAUSTINO, Lucas Luís; D.Sc.; Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Fevereiro de 2018; Indicadores da qualidade física e morfológica de um Argissolo Vermelho-Amarelo em áreas de pastagem revegetadas por leguminosas arbóreas. Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

A degradação ambiental tem consequências sobre a estrutura física do solo, trazendo perdas em sua capacidade produtiva. A resistência do solo à penetração (RP) e a resistência tênsil dos agregados (RT) permitem inferir sob a condição estrutural do solo, servindo como base comparativa entre diferentes manejos. O crescimento das plantas não é determinado somente pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas, também, pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes. O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra em um só índice esses fatores. As inter-relações entre eles dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de compactação a que esse foi submetido. O IHO pode ser quantificado em função da densidade e pode, portanto, ser utilizado como um bom indicador da qualidade física do solo. Outros parâmetros usados para avaliar as diferenças entre os manejos dos solos são a distribuição por tamanho dos agregados do solo, que dão base para os cálculos do diâmetro médio ponderado e geométrico (DMP e DMG) e, também, seus atributos morfométricos, que permitem a caracterização dos agregados de acordo com a geometria de suas formas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da revegetação com espécies leguminosas florestais para a recuperação da qualidade física de um Argissolo

Vermelho-Amarelo Distrófico típico, em Conceição de Macabú-RJ, a partir de alguns atributos, quais sejam: (i) resistência tênsil dos agregados; (ii) resistência do solo à penetração; (iii) intervalo hídrico ótimo (IHO) e as densidades críticas dele decorrentes; (iv) atributos morfométricos dos agregados; e (v) distribuição de agregados por tamanho. Em julho de 2015 foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada (anéis volumétricos e agregados do solo) e não preservada, das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade. As amostras coletadas em anéis volumétricos foram utilizadas para a obtenção da curva de retenção de água e da curva de resistência à penetração, a partir das quais obteve-se o IHO em função da densidade. As amostras contendo agregados foram passadas em um jogo de peneiras de malha de 12,5, 8, 4, 2, 1, 0,50 e 0,25 mm, sendo estes quantificados de acordo com sua classe de tamanho (possibilitando o cálculo dos índices DMP e DMG) e analisados quanto à sua resistência tênsil e à geometria de suas formas (com o auxílio do *software ImageJ*). Os maiores valores de RT foram obtidos para a área da capoeira na camada 0-0,10 m, nos agregados retidos na peneira de malha 8 mm (RT 8), enquanto os menores foram encontrados na área do pasto na camada 0,10-0,20 m, nos retidos na peneira de malha 12,5 mm (RT 12,5), ambos da camada 0-0,10 m. Quanto à RP, os menores valores ocorreram na área sob capoeira (0,41 MPa) e os maiores na área sob acácia (14,79 MPa). Em relação ao IHO, em nenhuma área ou camada foram verificadas restrições à aeração do solo. Por outro lado, valores de RP superiores ao limite crítico de 3,0 MPa foram verificados em grande parte dos casos, fazendo com que a faixa do IHO fosse menor que a de água disponível. As leguminosas tiveram valores de área de agregado maiores que as outras coberturas, nas classes de agregados de maior diâmetro. O uso das técnicas multivariadas permitiu verificar semelhanças e/ou diferenças entre os ambientes, revelando que há uma dissimilaridade da capoeira para as demais áreas. As leguminosas não promoveram melhorias nos atributos de resistência, porém foram efetivas na formação de agregados maiores. Os solos da área da acácia mostraram um pior IHO, e a alta DS teve influência nessa queda de qualidade estrutural do solo.

ABSTRACT

FAUSTINO, Lucas Luís; D.Sc.; Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, February de 2018; Indicators of the physical and morphological quality of a Typic hapludult soil in pasture areas revegetated by tree legumes. Advisor: Prof. Cláudio Roberto Marciano.

The environmental degradation has consequences on the physical structure of the soil, bringing losses of its productive capacity. The soil penetration resistance (PR) and the tensile strength of the aggregates (TS) allow to infer under the soil structural condition, based on comparative between different managements. Plant growth is determined not only by the availability of water, aeration and temperature, but also by the resistance of the soil matrix to root penetration. The optimal water range (IHO) integrates these factors into a single index. The interrelations between them depend on the structural condition of the soil and, therefore, on the degree of compaction to which the soil is subjected. The IHO can be quantified as a function of the density and can therefore be used as a good indicator of soil physical quality. Another parameter used to evaluate the differences between soils management is through their morphometric attributes that allow the characterization of the aggregate according to the geometry of its forms and also its distribution by size with the calculations of the weighted average and geometric diameter (DMP and DMG). The objective of this work was to evaluate the efficiency of revegetation with forest leguminous species for the recovery of a Typic Hapludult soil in in Conceição de Macabú-RJ, based on the tensile strength of the aggregates and resistance to

soil penetration, (IHO) and the critical densities derived therefrom, their morphometric attributes and the distribution of aggregates by size. In July of 2015 soil samples of preserved structure (volumetric rings and soil aggregates) were collected and not preserved from the 0-0.10 m and 0.10-0.20 m depth layers. In addition to evaluations of soil physical and chemical attributes, tests were performed to measure TS and PR. Soil samples, collected in volumetric rings, were used to obtain the water retention curve, penetration resistance curve and IHO as a function of density. The collected aggregates were passed in a set of mesh sieves of 12.5, 8, 4, 2, 1, 0.50 and 0.25 mm and analyzed according to the geometry of their shapes with the aid of ImageJ software and quantified according to their distribution by size calculated the DMP and DMG indexes. Soil profiles were classified Typic Hapludult. The highest values of TS were obtained by the capoeira area in the 0-0.10 m layer in the aggregates retained in the 8 mm mesh sieve (TS 8). The lowest values were found in the pasture area in the 0.10-0.20 m layer, retained in the 12.5 mm mesh screen (TS 12.5). Regarding RP, the lowest results occurred in the area under capoeira (0.41 MPa) and the highest in the under acacia (14.79 MPa). Regarding the IHO no area or layer was verified restrictions to the aeration of the soil. On the other hand, PR values above the critical limit of 3.0 MPa were verified in most cases, making the IHO smaller than the field capacity. The legumes had higher aggregate area values in the classes of larger diameter aggregates. DMP and DMG correlated with morphometric attributes, especially in the aggregates retained in the 12.5 mm mesh screen. The use of multivariate techniques was useful in the study in order to verify if there were similarities and/or differences between the environments, revealing that there is a dissimilarity of the capoeira of the other areas. Legumes did not promote improvements in resistance attributes, but were more promising in the formation of larger aggregates. The soils of the acacia area showed a worse IHO, and the high DS had influence in this fall of structural quality of the soil.

1 INTRODUÇÃO

O solo é o principal meio para crescimento de plantas, ciclagem de nutrientes e decomposição de biomassa, sendo considerado um material biologicamente ativo. Para se garantir a capacidade produtiva do solo, o fluxo e qualidade da água, a biodiversidade e o equilíbrio dos gases atmosféricos, é importante que se tenha boas condições físicas, químicas e biológicas do solo.

O modelo de produção agrícola predominantemente adotado atualmente é ambientalmente impactante e coloca em risco a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Como consequência do manejo intensivo e inadequado dos solos, estes vêm sofrendo erosão e redução considerável nos teores de matéria orgânica, o que leva à perda de sua qualidade química, física e biológica e da capacidade de manter sua cobertura vegetal. Outra consequência do manejo intensivo do solo é a compactação, que decorre da aplicação de cargas externas (pisoteio, tráfego de máquinas, ação mecânica de implementos, etc.) e leva ao aumento da densidade e redução da porosidade do solo (Reichert et al., 2007).

Muitas vezes a regeneração natural da cobertura vegetal em uma área degradada é lenta e incerta, devido à competição com as gramíneas e às queimadas rotineiras que dificultam o estabelecimento das plantas e reduzem o vigor do banco de sementes (Costa et al., 2004). Franco et al. (1992) relatam que, além de restabelecer a fertilidade de áreas de produção, as leguminosas, devido ao seu crescimento inicial rápido e à sua capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico em associação com as bactérias diazotróficas, têm permitido acelerar a sucessão secundária progressiva e pular as etapas iniciais da sucessão natural.

As leguminosas arbóreas, além de serem fixadoras do N_2 no solo, levam à formação de uma camada de serapilheira sobre o solo (Manhães et al., 2013) e ao aumento no teor e estoque de matéria orgânica e na disponibilidade de nutrientes, com consequente melhoria dos atributos físicos dos solos (Gama-Rodrigues et al., 2008; Resende et al., 2013), sendo uma alternativa para a recuperação do potencial produtivo destes solos.

Imhoff (2002) relata que, de todos os indicadores, aqueles ligados à qualidade física dos solos possuem especial importância, visto que esta, quando perdida, é difícil de recuperar. Essa autora descreve que deveriam ser incluídos como indicadores atributos que influenciam tanto diretamente quanto indiretamente a produção das culturas. A resistência do solo à penetração (RP) é uma medida que permite uma boa estimativa de impedimentos à penetração de raízes, já que resulta da interação de vários atributos do solo, como a densidade e a umidade (Beutler e Centurion, 2003), sendo um indicador sensível da compactação do solo (Ribon et al., 2003, Imhoff et al., 2002).

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada, não somente pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas, também, pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (Letey, 1985).

Em um solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Neste contexto, o intervalo hídrico ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998), a partir do trabalho de Silva et al. (1994), incorpora num único dado a amplitude de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas em função de uma única variável, a densidade do solo. Desta maneira, como proposto por Silva et al. (1994), o IHO vem sendo utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo.

Ferreira et al. (2011) alegam que o comportamento em macroescala do solo depende das propriedades mecânicas de agregados individuais. A resistência tênsil (RT) de agregados pode, então, ser utilizada como indicadora do impacto do manejo na qualidade do solo, em resposta aos processos físicos e mecânicos que

ocorrem com o uso da terra. A resistência tênsil dos agregados é definida por Dexter e Watts (2000) como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados. O fato de ser determinada por um teste simples em uma ampla variação de tamanhos de agregados e de ser, como a RP, extremamente sensível ao uso e manejo do solo tornam a RT um bom parâmetro de medida em estudos do comportamento dos agregados e um valioso indicador da qualidade do solo. Problemas no estabelecimento das culturas foram associados a valores elevados de RT (Ley et al., 1993). A elevada RT dificulta a penetração das semeadoras no solo, restringe a emergência das plântulas e reduz o crescimento das raízes em camadas secas do solo (Imhoff et al., 2002).

Outra forma de se avaliar a qualidade estrutural dos agregados e construir conhecimento qualitativo acerca da sua estrutura através da análise morfológica dos agregados a partir de imagens bidimensionais escaneadas. A importância da geometria dos agregados é inquestionável, pois interfere na distribuição do diâmetro dos poros e modifica a dinâmica de ar, água e nutrientes no solo e, conseqüentemente, afeta o crescimento radicular das plantas (Portugal, 2005; Cremon et al., 2009; Souza et al., 2012; Silva et al., 2013; Silva et al., 2014, Carducci et al., 2016). De maneira geral têm-se observado que sistemas de manejo que preconizam o uso de práticas que elevam o aporte de material orgânico, promovem incremento na área dos agregados (Olszewski et al., 2004) na superfície e subsuperfície do solo, o que é indicativo de melhor agregação (Carvalho et al., 2011; Cremon et al., 2011). Por outro lado, sistemas de manejos mais agressivos tendem a pulverizar os agregados tornando-os mais arredondados (Cremon et al., 2009), ou seja, sistemas convencionais de manejo, com intenso revolvimento do solo, promovem o decréscimo da rugosidade da superfície externa, assim como do perímetro dos agregados.

Mais tradicional para avaliar a qualidade do solo com base em agregados é a sua distribuição em classes de tamanho, havendo dois métodos principais para sua separação, sendo esses o tamisamento via seca e o via úmida. Ambos os métodos se baseiam em um processo de peneiramento, onde amostras de solo são dispostas em um jogo de peneiras de aberturas de malhas decrescentes. A partir do peso de solo retido em cada peneira obtém-se a proporção de agregados em cada classe de tamanho e, então, pode-se calcular índices de agregação, como o diâmetro médio ponderado (DMP) ou o diâmetro médio geométrico (DMG). No

método via úmida são mais determinantes a estabilização física biológica (por raízes finas, hifas de fungo, etc) ou as forças de natureza química eletrostáticas (pontes de hidrogênio, ligações iônicas, etc), enquanto no via seca, além dos fatores citados, incluem-se forças de atração de curto alcance de natureza física (forças moleculares de London-Van der Waals). Nesse último caso, via seca, com o processo de secamento dos agregados, as interfaces água-ar nos poros têm sua curvatura convexa aumentada, o que promove a aproximação física entre as partículas e aumenta as forças internas de coesão nos agregados. No primeiro caso, via úmida, a saturação com água elimina os meniscos água-ar do interior dos agregados, e permite, assim, que ocorra o afastamento físico das partículas, o que dependerá dos fatores químicos e biológicos citados.

Tendo em vista o consenso sobre a capacidade da revegetação com leguminosas arbóreas em recuperar a qualidade do solo e, ao mesmo tempo, as incertezas acerca de quais seriam os indicadores físicos mais adequados para realizar esta avaliação, é importante a realização de estudos acerca dessas questões. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da revegetação com espécies leguminosas florestais para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, em Conceição de Macabú-RJ, a partir de alguns atributos, quais sejam: (i) resistência tênsil dos agregados; (ii) resistência do solo à penetração; (iii) intervalo hídrico ótimo e densidades críticas dele decorrentes; (iv) atributos morfométricos dos agregados; e (v) distribuição dos agregados por tamanho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Qualidade física do solo

O conceito de qualidade do solo atualmente baseia-se na capacidade deste funcionar adequadamente dentro dos limites do ecossistema e, ao mesmo tempo, interagir positivamente com o meio ambiente externo àquele ecossistema, de forma a manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e suportar a saúde humana e habitacional (Larson e Pierce, 1994). Assim, a qualidade pode ser avaliada a partir de “indicadores”, que são atributos do solo relacionados ao aspecto de funcionalidade em apreciação. Os critérios para seleção de indicadores estão estreitamente relacionados com os principais objetivos da pesquisa junto ao ecossistema (Jong Van Lier et al., 2010).

Para ser um bom indicador de qualidade do solo, o atributo deve ser sensível às variações de uso e manejo e do clima, senão os mesmos serão de pouca utilidade para o monitoramento das mudanças na qualidade do solo e para a sugestão de práticas de manejo (Doran e Parkin, 1994; Araújo et al., 2012). Desse modo, a disponibilidade de uma ampla base de dados para diversos tipos de solo, clima, uso e manejo é inestimável para a formulação de padrões de resposta e valores ou limites críticos para os indicadores de qualidade do solo (Alvarenga, 2010; Barbosa, 2012).

Para Araújo et al. (2012), os principais indicadores físicos que têm sido utilizados e recomendados são textura, espessura do horizonte A, espessura do

solum, densidade do solo, resistência à penetração, porosidade, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica e estabilidade de agregados. O uso destes indicadores é comum, pois podem explicitar limitações ao crescimento radicular, à emergência das plântulas, à infiltração e/ou movimento da água no interior do perfil do solo e à disponibilidade de água às plantas. Letey (1985) classifica os atributos físicos do solo em dois grupos, sendo o primeiro o daqueles que afetam diretamente o crescimento de plantas (em que estariam inclusos apenas a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica), e o segundo o daqueles que afetam indiretamente o crescimento (textura, agregação, densidade, porosidade do solo, entre outros).

Santos (2010) opina que ainda existe um campo a ser pesquisado no que diz respeito à identificação de novos indicadores para a avaliação da qualidade física do solo, principalmente no caso dos solos que compõem os diferentes biomas brasileiros, demandando estudos sobre o uso de atributos físico-hídricos como forma de aferição de sua sustentabilidade produtiva. Este mesmo autor cita que, além dos indicadores considerados quantitativos, existem os indicadores qualitativos que podem ser observados diretamente no campo, que são de alta importância e devem servir de guia para o manejo dos solos agrícolas. A análise de indicadores qualitativos e quantitativos deve ser feita em momentos estratégicos durante o ciclo das culturas, mas alguns indicadores devem ser observados ao longo do tempo.

Nenhum indicador sozinho conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos da qualidade do solo, pois esta sofre influência de fatores químicos, físicos e biológicos, de forma que deve haver relação entre o conceito de qualidade e os atributos do solo que justifiquem sua escolha como indicadores da qualidade (Barbosa, 2012).

2.2. Degradação dos solos

Usos e manejos intensivos e inadequados dos solos resultam em perdas consideráveis de matéria orgânica, reduzindo a fertilidade e deixando esses solos expostos às ações do ambiente e à erosão hídrica. A diminuição no teor de matéria orgânica pode também levar a aumento da densidade do solo, que dificultará a infiltração de água. Neves et al. (2006) relatam que a agregação é um dos atributos

que podem ser utilizados para medir a qualidade do solo, pois uma boa estruturação do solo facilita a aeração e a infiltração de água e reduz a erodibilidade. Prejuízos à estabilidade dos agregados poderão levar ao aumento do escoamento superficial, resultando em maiores taxas de erosão (Guerra, 1990).

Outra importante causa da degradação do solo é a compactação, resultado do processo de aumento da densidade e que tem como uma das consequências o aumento da resistência à penetração. A compactação do solo ocorre de maneira muito frequente em ambientes que utilizam máquinas e implementos ou em áreas, onde o pisoteio de animais é intenso, constituindo um dos mais sérios fatores de restrição ao desenvolvimento das plantas (Camargo e Alleoni, 2006).

A compactação reduz a permeabilidade do solo ao ar e a água, além de dificultar a penetração das raízes (Pedrotti et al., 1994). Com isso, o solo apresenta menor disponibilidade hídrica e nutricional, resultando em uma pequena camada superficial a ser explorada pelo sistema radicular, o que pode levar a uma menor produtividade agrícola

De acordo com Freddi et al. (2006), a resistência mecânica do solo à penetração exerce grande influência sobre o desenvolvimento vegetal, uma vez que o crescimento das raízes e a produtividade das culturas variam de forma inversamente proporcional ao seu valor. Ou seja, quanto maior for a resistência do solo à penetração menor será a sua capacidade de produção.

Stone e Silveira (1999), avaliando três sistemas de preparo do solo - com arado de aiveca mais uma gradagem niveladora; com grade aradora mais uma gradagem niveladora; e o plantio direto, constaram que o sistema de plantio direto, no sexto cultivo do feijoeiro, foi o que propiciou maior resistência à penetração na profundidade de 0 a 24 cm. Isso ocorre porque o tráfego de máquinas pesadas provoca a compactação superficial do solo (Silva et al., 2000), reduzindo, assim, a produtividade das culturas (Beutler e Centurion, 2003).

Entretanto, se o solo for manejado corretamente, com boa cobertura morta (restos das culturas) e adequada rotação de culturas, sua densidade pode vir a diminuir com o passar dos anos, devido ao aumento do conteúdo de matéria orgânica na camada superficial, melhorando a estrutura do solo e sua capacidade de reter mais água (Stone e Silveira, 1999) que irá promover a formação de canais que permitem adequado fluxo de ar e maiores taxas de infiltração de água (Seixas et al., 2005).

2.3. Leguminosas arbóreas

Uma das ações para se atingir a sustentabilidade dos sistemas de produção é a restauração e manutenção da fertilidade do solo, obtida pela fertilização e/ou pelo repovoamento com leguminosas arbustivo-arbóreas, espécies vegetais de crescimento rápido, com capacidade de fixação simbióticas de nitrogênio e que podem, inclusive, ser utilizadas para a aceleração da sucessão secundária progressiva, trazendo grandes benefícios para os agroecossistemas (Franco et al., 1992; Espíndola et al., 2004).

A revegetação com leguminosas arbóreas é uma tecnologia de baixo custo e viável para recuperação de solos degradados, pois promove a sua melhoria por meio do aporte de matéria orgânica e pela adição e reciclagem de nutrientes (Araújo Filho et al., 2007).

Resende et al. (2013) mencionam que as leguminosas arbóreas utilizadas na recuperação de áreas degradadas aumentam o teor de N e, conseqüentemente, o de C do solo, não existindo possibilidade de aumento nos estoques de C sem o incremento de N. Os mesmos autores relatam que se houver uma disputa de N entre plantas, diminui a velocidade com que o C é sequestrado.

A manutenção ou recuperação da quantidade de matéria orgânica no solo depende da quantidade e qualidade do material adicionado na superfície e, também, do manejo a ser adotado no sistema (Assis et al., 2006). De acordo com Campos et al. (1999), entre as variáveis químicas, físicas e biológicas que afetam a estrutura do solo, a matéria orgânica parece ser o fator mais importante na formação e estabilização dos agregados, sendo sua influência na agregação do solo um processo dinâmico, fazendo-se necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura do solo e o desenvolvimento das plantas. Neves et al. (2006) relatam que a agregação é um dos atributos que podem ser utilizados para medir a qualidade do solo, pois a manutenção da estrutura do solo facilita a aeração e a infiltração de água e reduz a erodibilidade.

Em estudos realizados na mesma área do presente trabalho, Zaia et al. (2008) e Costa et al. (2014), avaliando resultados de análise de solo coletado em 2003, cerca de cinco anos após a revegetação, nas áreas sob as leguminosas acácia e sabiá, pasto e capoeira, encontraram teores de carbono orgânico

equivalentes entre as quatro áreas. Diferentemente, Ndaw (2007), em amostras de setembro de 2005, e Nunes et al. (2016), em amostras de julho de 2007, obtiveram teores de carbono orgânico ainda superiores na capoeira e equivalentes entre o pasto e as duas leguminosas.

Em amostras coletadas em dezembro de 2010, doze anos após a revegetação, Rita et al. (2013) verificaram teores de carbono orgânico equivalentes entre as leguminosas e a capoeira, e inferiores no pasto. A partir das amostras coletadas naquela mesma ocasião e com o objetivo de calcular os estoques de C e N, Gomes (2014) obteve valores de densidade do solo menor na capoeira que nas demais coberturas, sendo os valores médios na capoeira de 1,17 e 1,14 Mg m⁻³, respectivamente para as camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, e nas demais coberturas de 1,38 e 1,47 Mg m⁻³, respectivamente para as referidas camadas. Já em amostras coletadas em julho de 2015 dezessete anos após a revegetação, Gomes et al. (2018) encontraram valores de densidade do solo de 1,11 e 1,09 Mg m⁻³ para a área da capoeira, nas mesmas camadas citadas anteriormente, enquanto para as demais áreas a média foi de 1,30 e 1,34 Mg m⁻³ também para as duas camadas citadas, podendo inferir que com cinco anos de diferença entre uma coleta e outra as leguminosas promoveram melhorias na condição física daqueles solos. Quanto à distribuição dos poros em classes de tamanho, além de observar redução da proporção de poros grandes quanto mais compactado fosse o solo, Gomes et al. (2018) verificaram que a área sob pastagem de gramínea, mesmo compactada, preservou poros em uma faixa intermediária de tamanho (mesoporos), o que pode ter efeitos importantes para uma melhor dinâmica de água no solo não saturado (ou seja, melhor redistribuição de água no perfil do solo).

Lopes (2017), avaliando os atributos hidrodinâmicos e hidrofobicidade dos solos coletados na mesma ocasião de Gomes et al. (2018), concluiu que o solo sob as leguminosas arbóreas estudadas apresentou valores dos atributos hidrodinâmicos e da afinidade água-solo intermediários, mais próximos daqueles do solo da área preservada do que daqueles do solo sob pastagem, e concluiu também que a revegetação com essas espécies leva a uma expressiva recuperação de sua condição natural e, possivelmente, ao reestabelecimento de sua capacidade de exercer a função ecológica que tinha antes da degradação.

Em todos os trabalhos citados, uma baixa fertilidade do solo foi observada em todas as áreas, porém com superioridade das leguminosas e inferioridade da

capoeira quanto aos valores de pH e teores de nutrientes. Em uma mais abrangente análise da qualidade do solo da área em questão, as diferenças acima relatadas podem ser relacionadas as alterações na respiração e biomassa microbiana e na biomassa e diversidade da fauna do solo, já tratadas por outros autores (Gama-Rodrigues et al., 2008; Manhães et al., 2013; Ribeiro et al., 2014), assim como podem ser associadas a aspectos físicos do solo, alguns alvos do presente estudo, que podem ser ora causa, ora efeito, das alterações químicas e/ou biológicas detectadas.

2.4. Atributos físicos do solo

Souza (2004) menciona que alguns atributos físicos do solo são definidos exclusivamente em função do tamanho, da forma e/ou da natureza das partículas que compõem sua matriz (granulometria; superfície específica; densidade das partículas; etc.), enquanto a maioria depende também de como estas partículas estão arranjadas espacialmente (densidade; porosidade total; distribuição de poros por tamanho; atributos relativos à retenção e à dinâmica da água e ar; resistência mecânica; atributos térmicos, etc.).

Ribeiro et al. (2012) relatam que a granulometria influencia diretamente em atributos do solo como a capacidade de troca de cátions, a retenção, disponibilidade e movimento de água no solo, o comportamento expansivo e contrátil do solo, sua susceptibilidade à erosão e à compactação, etc. Os solos arenosos possuem maior volume de macroporos e apresentam elevada velocidade de infiltração de água, e por geralmente possuírem baixa quantidade de argila e matéria orgânica, que agem como ligantes das partículas maiores, são mais susceptíveis à erosão (Gonçalves, 2002).

Em solos argilosos predominam microporos, responsáveis pela retenção de água, enquanto os macroporos são observados em menor quantidade e, devido a isso, a velocidade de infiltração de água tende também a ser menor nesses solos. Em virtude das maiores forças de coesão e adesão das partículas, eles oferecem maior resistência ao fluxo de enxurrada do que solos arenosos (Gonçalves, 2002). Os solos siltosos são mais susceptíveis à erosão hídrica, pois as partículas de silte são grandes o bastante para dificultar que permaneçam unidas entre si e

suficientemente pequenas para serem facilmente transportadas pelas enxurradas (Ribeiro et al., 2012).

A densidade corresponde ao quociente entre a massa das partículas e o volume de solo, dependendo tanto dos atributos da matriz (tamanho, forma e natureza das partículas) como daqueles relacionados ao arranjo espacial das partículas, sendo especialmente afetados pelos sistemas de uso e manejo do solo e do tipo de cobertura vegetal. A densidade é um importante atributo físico, pois fornece indicações a respeito do estado de sua conservação, sobretudo por influenciar em propriedades como infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento de raízes, trocas gasosas e suscetibilidade desse solo aos processos erosivos e, também, sendo largamente utilizada na avaliação da compactação (Guariz et al., 2009; Bicalho, 2011).

O aumento da densidade do solo pode ocorrer por meio dos processos de compactação ou de adensamento (Lopes da Silva et al., 2007), sendo a compactação decorrente de ação antrópica, que aplica pressão ao solo através de meios mecânicos, e o adensamento decorrente de fenômenos químicos e físicos que têm lugar durante a formação do solo.

A porosidade corresponde à fração do volume do solo não ocupado por partículas, sendo este espaço poroso ocupado por água e ar, dos quais as raízes das plantas e demais organismos do solo necessitam para sua hidratação e respiração. A porosidade total inclui poros de diversos tamanhos, sendo comumente classificados como macroporos (com diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos (com diâmetro $< 50 \mu\text{m}$). A porosidade do solo interfere na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e à ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis. O solo ideal deve apresentar volume e distribuição por tamanho dos poros adequados para a entrada, movimento e retenção de água e ar para atender às necessidades das culturas (Tognon, 1991).

A agregação dos solos se dá através das cargas positivas e negativas da superfície das partículas que promovem forças de atração e repulsão e determinam a intensidade com que se unem. A qualidade e a quantidade dessas cargas variam de acordo com os minerais presentes no solo (tipo de argilossilicato - 2:1 ou 1:1; atividade da argila - baixa ou alta; óxidos de ferro e alumínio - teor baixo ou alto), o

pH, o teor de sais solúveis, entre outras características pedológicas (Ferreira, 2010).

A estrutura de determinado solo é consequência dos fatores e processos de formação do solo (Reinert e Reichert, 2006). Em estrutura laminar, as partículas do solo estão arranjadas em agregados cujas dimensões horizontais são maiores que as verticais. Embora as lâminas possam ter espessura variável, esta não ultrapassa a dimensão de seu comprimento (Reinert e Reichert, 2006).

Em estrutura prismática e colunar, as partículas do solo estão organizadas em agregados cuja dimensão vertical é maior que a lateral, e as faces verticais são relativamente planas (Reinert e Reichert, 2006).

Na estrutura em blocos, a característica predominante é a semelhança de altura, largura e espessura das arestas, conferindo-lhe três dimensões quase iguais, com as faces planas ou subarredondadas. Ela pode ser dividida, ainda, em blocos angulares - em que as faces da estrutura possuem ângulos vivos entre si - e blocos subangulares - em que os ângulos são menos definidos e as faces são um pouco mais arredondadas (Reinert e Reichert, 2006).

Em estrutura granular e grumosa, as três dimensões são aproximadamente iguais e a superfície é arredondada. É mais comum nos horizontes próximos à superfície do solo, formando grumos. A formação destas estruturas está intimamente ligada à presença de matéria orgânica e à atividade biológica no solo. É típica também dos horizontes B de solos ricos em óxidos de ferro e alumínio (Reinert e Reichert, 2006).

2.5. Formação de agregados

A formação dos agregados do solo ocorre sob influência direta tanto de processos físico-químicos (ou abióticos) e quanto de processos biológicos. Os processos físico-químicos estão associados principalmente às argilas e, portanto, tendem a ser mais importantes em solos de textura fina. Em solos arenosos, que têm pouca argila, a agregação é quase inteiramente dependente de processos biológicos.

Brady e Weil (2013) enumeram os mais importantes processos físico-químicos de formação dos agregados. São eles: (i) a floculação ou atração mútua,

entre argilas e moléculas orgânicas, e (ii) a expansão e a contração das massas de argila.

Brady e Weil (2013) descrevem que a flocculação das argilas é o processo inicial de agregação, formando agregados microscópicos, ou flocos. Esse processo não ocorre em solos arenosos, pois estes são quase isentos de argila. A flocculação pode ser explicada pelo fato da maior parte das partículas de argila possuírem superfícies carregadas com cargas negativas que normalmente atraem um grande grupo de cátions da solução do solo. Se duas partículas de argila se aproximarem o suficiente, cátions comprimidos na camada entre elas atrairão as cargas negativas das duas partículas, servindo assim como uma ponte, que mantém as partículas unidas. Este processo é repetido até que um pequeno conjunto de partículas paralelas de argila seja formado. Outros agrupamentos de argila são formados por partículas orientadas ao acaso, sendo estes formados quando as cargas positivas nas bordas das partículas de argila atraem as cargas negativas nas superfícies planas destas partículas.

Brady e Weil (2013) descrevem ainda que outra maneira física para a formação dos agregados é através do processo de umedecimento e secagem dos solos. À medida que o solo seca as partículas de argila se aproximam, fazendo com que a massa de solo contraia seu volume. Esta aproximação faz com que haja maior interação entre as partículas, sendo que parte delas, havendo condições favoráveis, poderão estabelecer ligações com estabilidade tal que não mais se afastarão quando o solo for molhado e se expandir novamente. Com a sucessão de ciclos, mais partículas poderão estabilizar suas ligações durante a secagem e contração, enquanto em momentos de umedecimento e expansão da massa de solo são abertas fissuras ao longo de planos de fraqueza, sendo que após vários ciclos a rede de fissuras se torna melhor definida, formando, assim, os agregados de solos.

Em relação ao processo biológico de formação dos agregados, Brady e Weil (2013) mencionam que os que mais se destacam pela sua importância são: (i) atividade de minhocas; (ii) arranjo de partículas por redes de raízes e hifas de fungos; e (iii) produção de gomas orgânicas por microrganismos, especialmente bactérias e fungos.

Independente da formação inicial dos agregados, estes precisam de agente cimentantes para a sua estabilização e posterior conversão em agregados maiores.

Em sua teoria reconhecida mundialmente, Tisdall e Oades (1982) consideraram que cada estágio de agregação é independente e que há uma hierarquia em sua formação, pela qual os agregados maiores do que 2,0 mm seriam formados por agregados maiores do que 0,250 mm de diâmetro; os agregados de 0,02 a 0,25 mm seriam formados por partículas de diâmetro entre 0,002 a 0,02 mm; os agregados de 0,002 a 0,02 mm seriam formados por partículas menores do que 0,002 mm de diâmetro. Agregados menores do que 0,250 mm são classificados como microagregados e os maiores do que 0,250 mm como macroagregados. Os microagregados são mais resistentes à desagregação, pois são estabilizados por óxidos de Fe e de Al, enquanto os macroagregados são mais sensíveis às práticas de manejo e se desagregam com maior facilidade, pois são estabilizados pela matéria orgânica lábil.

2.6. Estabilidade e morfometria de agregados

Agregados são elementos da estrutura do solo e, portanto, de suma importância na manutenção da porosidade e aeração do solo, no crescimento das plantas e da população microbiana, na infiltração de água e no controle dos processos erosivos (Dexter, 1988). Melo et al. (2008) definem os agregados como um conjunto de partículas primárias (argila, silte e areia) do solo que se aderem umas às outras mais fortemente do que às demais partículas adjacentes, comportando-se mecanicamente como uma unidade estrutural. Se formado naturalmente é denominado *ped*, e apresentam diferenças morfológicas (prisma, bloco, grânulo) e de tamanhos. Caso formado artificialmente pela atividade do homem, ao arar ou escavar, é denominado torrão (Madari, 2004).

O solo é composto de um conjunto de agregados de diferentes tamanhos e estabilidade. Ferreira (2010) afirma que a avaliação da distribuição de agregados por tamanho é importante, pois o tamanho do agregado determina sua susceptibilidade ao deslocamento pela água e vento e é importante na determinação das dimensões do espaço poroso em solos cultivados. O mesmo autor cita que dentre os fatores que afetam a agregação, a água é, provavelmente, o que mais atenção tem recebido dos pesquisadores, que partem da premissa de que as características da agregação que resistem à ação da água têm importância e significação para o comportamento do solo. Assim, o método mais utilizado tem

sido o método de peneiramento úmido, em aparelho de Yoder. Outros autores utilizam a separação a seco, a partir da colocação das amostras em agitadores com padrão de velocidade e deslocamento pré-estabelecidos (Embrapa, 1997).

A grande dificuldade da análise de agregados está justamente na definição da melhor maneira de expressar os seus resultados. Jong van Lier e Albuquerque (1997) citam o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) são as formas mais usadas, mas estas variáveis só levariam a resultados representativos se a distribuição de tamanho de agregado dentro de cada classe de tamanho fosse simétrica (linear), para o DMP, ou logarítmica, para o DMG. Os autores sugerem a adoção de uma nova variável, o diâmetro médio ajustado (DMA), justificando sua utilização no lugar do DMP ou DMG, por ser considerado, no seu cálculo, um diâmetro médio de cada fração que leva em consideração a provável distribuição dos tamanhos dos agregados dentro da fração.

Como forma de estudo dos agregados, alguns autores (Olszewski et al., 2004; Portugal, 2005; Cremon et al., 2009; Cremon et al., 2011; Carvalho et al., 2011; Souza et al., 2012; Silva et al., 2013; Silva et al., 2014) têm proposto sua análise morfológica, pois a geometria dos agregados interfere na distribuição do diâmetro dos poros, o que modifica a dinâmica de ar, água e nutrientes no solo e, conseqüentemente, afeta o crescimento radicular das plantas.

A análise morfométrica dos agregados consiste basicamente em três etapas que são as seguintes: (i) aquisição das imagens seja por scanner ou por câmeras fotográficas; (ii) análise das imagens por meio de *softwares* livres como exemplo o *ImageJ*; e (iii) interpretação dos resultados gerados.

Cremon et al. (2009) propuseram a separação dos agregados para o estudo da morfometria utilizando os agregados retidos nas porções tamizadas entre 9,52 e 4,76 mm de diâmetro, por meio de um jogo de peneiras-padrão.

O estudo da morfologia dos agregados consiste em avaliar as seguintes características: (i) área: é medida com o número de pixel do polígono e indica o estado de agregação do solo (capacidade de formação de agregados); (ii) perímetro: é o comprimento da projeção do limite exterior do agregado e está diretamente relacionado com a área dos agregados; (iii) aspecto: expressa a forma do agregado, sendo calculado a partir de uma fórmula ($4 \pi \text{ área} / \text{perímetro}^2$), que fornece resultado entre 0 e 1, sendo que, quanto maior o valor, maior o grau de arredondamento, refletindo o efeito dos sistemas de cultivo sobre os mesmos; e (iv)

rugosidade: expressa as estrias do agregado, com valores variando entre 0 e 1, sendo que, quanto mais liso, mais próximo de 1.

De acordo com Carvalho et al. (2011), a rugosidade é a variável morfométrica mais sensível ao manejo, pois está relacionada com o efeito de pulverização dos agregados provocado pelo uso do solo, que causa o arredondamento (quebra das arestas). Souza et al. (2012), estudando a morfometria e a estabilidade de agregados de um Latossolo em função do manejo e da gessagem, verificaram que a combinação entre plantio direto e efeito residual de gesso proporcionou agregados mais rugosos, sendo esse aspecto o mais sensível.

2.7. Resistência tênsil dos agregados

A resistência tênsil (RT) dos agregados é definida por Dexter e Watts, (2000) como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados. É uma avaliação extremamente sensível da condição estrutural dos solos, sendo um valioso parâmetro de medida em estudos do comportamento dos agregados do solo, podendo ser determinada por um teste simples em uma ampla variação de tamanhos de agregados. Este método possui as vantagens de ser aplicável a agregados de tamanho único, e os resultados serem facilmente calculados (Macks et al., 1996; Watts e Dexter, 1998).

Problemas no estabelecimento das culturas foram associados a valores elevados de RT (Ley et al., 1993). A elevada RT dificulta a penetração das semeadoras no solo, restringe a emergência das plântulas e reduz o crescimento das raízes em camadas secas do solo (Imhoff et al., 2002).

A determinação da RT pode ser realizada através de testes diretos e indiretos (Dexter e Watts, 2000). O teste direto consiste da aplicação de duas forças de mesma magnitude e direção, mas sentido contrário, diretamente, em duas extremidades de um agregado, separando-o por tração em duas partes (Figura 1) (Imhoff et al., 2002).

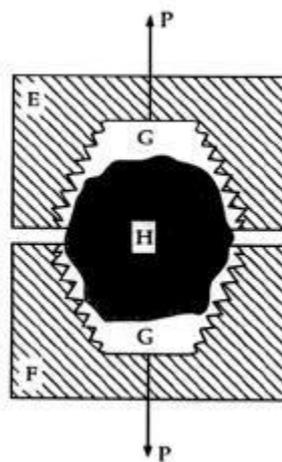


Figura 1 - Um agregado natural (H) é fixado às metades (E e F) de um recipiente por meio de “plaster de Paris” (mistura de calcário, areia e água) (G). O agregado é submetido à tração (P), sendo separado em duas partes (Adaptada de Dexter e Watts, 2000).

Nos testes indiretos, uma força compressiva é aplicada às placas metálicas que transmitem a força através do diâmetro do agregado, produzindo um aumento do estresse dentro do mesmo. O valor máximo de estresse tensão ocorre no plano vertical por meio do centro da amostra, e quando a força tensão supera RT (força de mesma magnitude, mas sentido oposto), forma-se uma fissura no centro do agregado dividindo-o em unidades menores, porém, de maior resistência (Figura 2) (Dexter e Watts, 2000). Esses autores complementaram, ainda, que a RT é, portanto, igual ao valor do estresse tensão no momento da quebra da amostra.

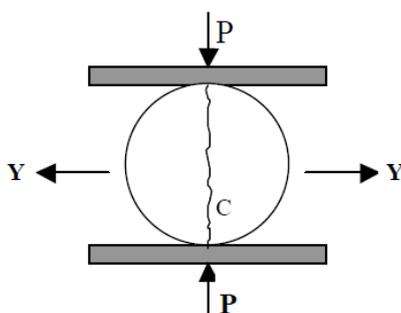


Figura 2- A fissura C será formada entre os dois pontos de aplicação da força (P) devido ao estresse tensão (Y), que atua no centro da amostra (Adaptada de Dexter e Watts, 2000).

Tormena et al. (2008b) encontraram para uma área de mata valores de RT 150% menores do que aqueles sob áreas de cultivos, e atribuíram esse resultado ao maior tráfego sobre as áreas de cultivo.

A diferença da resistência tensão dos agregados ao fraturamento, resultante da determinação da RT foi identificada como friabilidade do solo, que é a tendência de uma massa de solo se desfazer em agregados menores (Dexter e Watts, 2000).

Este atributo foi tratado por Watts e Dexter (1998) como sinônimo de qualidade física do solo e também como indicativo de sua condição estrutural.

A determinação da friabilidade do solo pode ser realizada por três métodos distintos: (i) método do coeficiente de variação, em que o desvio padrão dos valores de resistência tênsil dos agregados é dividido pelo valor médio de resistência tênsil (método mais utilizado); (ii) método que relaciona a força aplicada nos agregados com o logaritmo dos valores de resistência tênsil; e (iii) método do volume dos agregados, que relaciona o logaritmo da resistência tênsil com o logaritmo do tamanho do agregado (Dexter e Kroesbergen, 1985; Watts e Dexter, 1998; Dexter e Watts, 2000). A friabilidade é considerada uma propriedade física importante dos solos agrícolas, uma vez que a condição de solo friável é desejável para a germinação e crescimento das plântulas (Watts e Dexter, 1998).

Em regiões tropicais variações na topografia podem ser indicativas de mudanças na profundidade do *sólum* e grau de intemperismo químico e, em alguns casos, da presença de diferentes tipos de solos (Anjos et al., 1998). Solos de regiões tropicais podem apresentar a fração argila constituída por diferentes minerais, principalmente caulinita e/ou gibbsita, e óxidos de ferro e/ou alumínio, os quais apresentam diferentes capacidades de agregação das partículas (Muggler et al., 1999). Apesar da relevância do tema, há carência de informação sobre a influência da textura, mineralogia e teor de matéria orgânica na resistência dos agregados e friabilidade de solos no Brasil.

2.8. Resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo (IHO)

A resistência à penetração (RP) é um atributo físico sensível para a avaliação da condição estrutural do solo. É um atributo relacionado diretamente à densidade do solo (DS), pois valores elevados de DS reduzem os espaços vazios, aumenta a resistência mecânica dos solos e prejudica o crescimento radicular das plantas. A RP também se relaciona com a umidade do solo (θ), porém de forma inversa, pois valores baixos de umidade levam ao aumento da tensão da água intersticial e da coesão entre as partículas do solo, aumentando a RP e, conseqüentemente, reduzem a facilidade com que as raízes penetram no solo (Busscher, 1990; Reichert et al., 2003; Couto et al., 2016).

A designação “*Least Limiting Water Range*” foi estabelecida por Silva et al. (1994), tratando-se de uma adaptação do termo “*Non-limiting Water Range*” proposto por Letey (1985), que representa a faixa de conteúdo de água volumétrica onde o crescimento da raiz não é afetado pela porosidade, potencial de água ou pela resistência do solo à penetração das raízes. Esta designação foi traduzida para o português e empregada como intervalo hídrico ótimo (IHO) por Tormena et al. (1998).

O IHO quantificado por Silva et al. (1994) segue a conceituação de Letey (1985), uma vez que o limite superior pode ser definido pela umidade em que a porosidade de aeração é igual a 10% (θ_{PA}) ou pela umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), e o limite inferior pode ser definido pela umidade na qual a resistência à penetração atinge 3,0 MPa ($\theta_{RP=3MPa}$) - valor admitido como crítico para solos florestais (Zou et al., 2000) ou pela umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Em um solo bem estruturado, com valores moderados de densidade, a faixa de umidade na qual as plantas encontram condições ótimas para o crescimento é definida pelas umidades na capacidade de campo (θ_{CC}), e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), o intervalo entre esses dois pontos é chamado de água disponível (AD) (Figura 3). Com a degradação estrutural do solo e o aumento da densidade, ocorre uma redução da porosidade total. Isto pode fazer com que ocorram limitações causadas por uma PA inferior a 10% em umidades iguais ou menores que aquela correspondente a θ_{CC} . Por outro lado, sabendo-se que a RP é função não apenas da umidade do solo, mas também da densidade, com a compactação podem ocorrer valores de RP limitantes ao crescimento de plantas em umidades do solo maiores que a θ_{PMP} . Neste caso o IHO seria definido pela PA no limite superior e pela RP no limite inferior. Esses parâmetros conferiram ao IHO uma maior sensibilidade às alterações de uso e manejo no solo que a AD, sendo usado em diversos trabalhos para avaliar as mudanças estruturais do solo (Silva et al., 1994; Silva et al., 1997; Tormena et al., 1998; Zou et al., 2000; Schoenholtz et al., 2000; Serafim et al., 2013; Moreira et al., 2014; Dias et al., 2016). O uso do IHO complementa o conceito da AD, incluindo limitações ao crescimento de plantas, até então, ignoradas ou avaliadas de forma independente do conceito da AD.

O conceito de água disponível considera apenas a umidade e a tensão da água como fator físico do solo limitante para o crescimento de plantas. Entretanto,

com valores de θ_{CC} próximos à saturação do solo a taxa de difusão de oxigênio no solo pode ser baixa o suficiente para reduzir o crescimento radicular.

Na Figura 3 está apresentado o IHO (área hachurada) com seus limites superiores e inferiores de umidade estabelecidos, até certa densidade, por θ_{CC} e por θ_{PMP} . Com aumento da densidade o limite superior passa a ser $\theta_{PA=10\%}$, indicando problemas de aeração, e o limite inferior passa a ser $\theta_{RP=3MPa}$, indicando problemas de resistência ao solo. Quando a $\theta_{RP=3MPa}$ supera a θ_{CC} ou θ_{PA} , o IHO torna-se nulo.

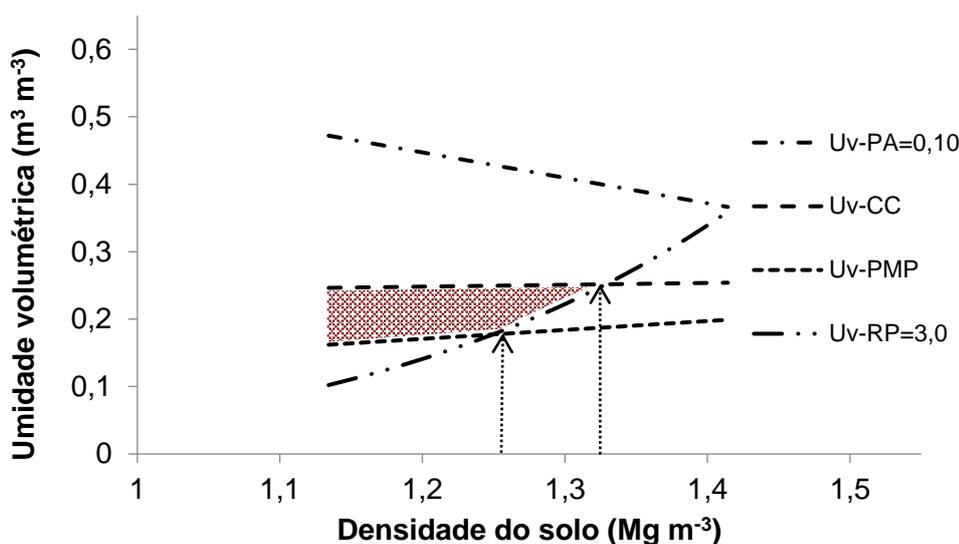


Figura 3. Representação do IHO considerando o limite superior, definido pela umidade do solo na capacidade de campo ($Uv-CC$), ou umidade em que a porosidade de aeração é menor que 10% ($Uv-PA=10\%$); e o limite inferior, definido pela umidade do solo no ponto de murcha permanente ($Uv-PMP$) ou pela umidade em que a RP é igual a 3,0 MPa ($Uv-RP=3,0$) a área hachurada representa o IHO.

O IHO é um índice que integra os efeitos de três variáveis que de alguma forma dificulta ou restringe completamente o crescimento das plantas, que são a aeração, a disponibilidade de água, e o da resistência mecânica à penetração de raízes, os quais podem ser considerados em função de uma única variável, a densidade. Aeração, disponibilidade de água e resistência à penetração são afetados por outras propriedades intrínsecas do solo, como textura, mineralogia, características do perfil, etc., e por propriedades passíveis de serem alteradas pelo manejo, como densidade do solo e matéria orgânica (Tormena et al., 1999; Leão et al., 2004; Dias et al., 2016).

Silva et al. (2004) relatam que se houver diferenças de propriedades físicas, químicas e/ou morfológicas do solo entre os tratamentos estabelecidos é

conveniente que se faça ajustes dos modelos de retenção de água e resistência do solo à penetração, utilizando de métodos estatísticos adequados para uma real avaliação do grau de influência dessas propriedades sobre a dinâmica do IHO.

3 TRABALHOS

3.1. Resistência tênsil de agregados e resistência à penetração de um solo sob Mata atlântica, leguminosas arbóreas e pastagem

RESUMO

A degradação ambiental tem consequências sobre a estrutura física do solo, trazendo perdas da capacidade produtiva. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da revegetação com espécies leguminosas florestais para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, em Conceição de Macabú-RJ, a partir da resistência tênsil de agregados (RT) e da resistência do solo à penetração (RP) e das inter-relações entre as variáveis químicas e físicas do solo. Em julho de 2015, foram coletadas amostras de solo de estrutura preservada e não preservada das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade. Além das avaliações dos atributos físicos e químicos dos solos, foram realizados testes para medir a RP e a RT. O maior valor de RT foi obtido para a área da capoeira (62,2 kPa), nos agregados retidos na peneira de 8 mm (RT 8), enquanto o menor foi para a área do pasto (22,7 kPa), nos retidos na peneira de 12,5 mm (RT 12,5), ambos da camada 0-0,10 m. Quanto à RP os menores valores ocorreram na área sob capoeira (0,41 MPa) e os maiores na sob acácia (14,79 MPa), sendo que este apresenta restrições ao crescimento do sistema radicular. O uso das técnicas multivariadas mostrou-se útil, pois permitiu

verificar semelhanças e/ou diferenças entre os ambientes, revelando dissimilaridade da capoeira para as demais áreas.

PALAVRAS-CHAVE: compactação do solo; recuperação do solo; qualidade física do solo.

ABSTRACT

Tensile strength of aggregates and resistance to penetration of a soil under forest

The environmental degradation has consequences on the physical structure of the soil, bringing losses of its productive capacity. The soil penetration resistance (PR) and the tensile strength of the aggregates (TS) allow to identify the soil condition. The objective of this work was to evaluate the efficiency of revegetation with forest leguminous species for the recovery of the physical quality of a Typic Hapludult soil in Conceição de Macabú-RJ, based on the tensile strength of aggregates and soil penetration resistance. In July/2015, samples of soil with a preserved and non-preserved structure were collected from the layers 0-0.10 m and 0.10-0.20 m depth. In addition to evaluating the physical and chemical attributes of soils, tests were performed to measure PR and TS. Soil profiles were classified as Typic Hapludult soil. The highest value of TS was obtained by the area of capoeira (62.2 kPa) in the aggregates retained in the 8 mm sieve (TS 8), the lowest was for the pasture area (22.7 kPa), for the retained aggregates in the 12.5 mm sieve (TS 12.5) both for 0-0.10 m layer. Regarding PR, the lowest results occurred in the area under *capoeira* (0.41 MPa) and the highest in the under *acácia* (14.79 MPa), that presented restrictions to the root system. The use of multivariate techniques was useful, since it allowed to verify similarities and/or differences between the environments. The results revealed that there is a dissimilarity of the *capoeira* in comparison to the other areas.

KEYWORDS: Soil compaction; soil recovery; Soil physical quality

INTRODUÇÃO

Para se garantir a capacidade produtiva do ecossistema, o fluxo e qualidade da água, a biodiversidade e o equilíbrio dos gases atmosféricos, é importante que se tenha uma boa condição de funcionamento do solo (Doran e Parkin, 1994; Tótolá e Chaer, 2002). Sob o atual modelo de produção dominante, as atividades humanas vêm gerando grande aumento na degradação ambiental, incluindo erosão e contaminação de solos e corpos d'água, colocando em risco sua própria sustentabilidade (Mielniczuk, 2008).

Uma região altamente afetada por esse modelo produtivo é o Norte Fluminense, onde a cobertura da Mata Atlântica foi reduzida a 5% da mata original e substituída pela atividade agropecuária, caracterizadas principalmente por pastagens mal manejadas e pelo cultivo intensivo da cana-de-açúcar (com o uso das queimadas) e do café (Gama-Rodrigues et al., 2008).

Uma alternativa para a recuperação do potencial produtivo destes solos é o uso de leguminosas arbóreas, que além de serem fixadoras do N₂, possuem a capacidade de aumentar o teor de matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes e de melhorar os atributos físicos dos solos. Por outro lado, as gramíneas exercem papel muito importante na adição contínua de matéria orgânica do solo (MOS) quando manejada de forma correta (elevada biomassa) seu sistema radicular ajuda na formação de agregados (Bronick e Lal, 2005; Salton et al., 2008), com conseqüente melhoria dos demais atributos físicos do solo.

Imhoff et al. (2002) relatam que, de todos os indicadores, aqueles ligados à qualidade física dos solos possuem especial importância, visto que esta, quando perdida, é de difícil recuperação. A resistência tênsil (RT) de agregados do solo é utilizada como indicadora do impacto do manejo na qualidade estrutural do solo, em resposta aos processos físicos e mecânicos que ocorrem com o uso da terra. Outra avaliação que exprime a condição estrutural do solo é a resistência do solo à penetração (RP), sendo reflexo do grau de compactação e, portanto, tendo conseqüência sobre a penetração e distribuição das raízes no solo.

A resistência tênsil dos agregados é definida por Dexter e Watts (2000) como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados. É uma variável extremamente sensível para a avaliação da condição estrutural dos solos, e isto a torna um valioso parâmetro de medida em estudos do

comportamento dos agregados, sendo, além disso, determinada por um teste simples em uma ampla variação de tamanhos de agregados. A RT de agregados deve ser suficientemente pequena para que o preparo do solo possa produzir uma camada de semeadura friável, mas grande o suficiente para suportar o peso dos equipamentos pesados com um mínimo de compactação (Lehrsch et al., 2012).

A resistência do solo à penetração (RP) é outro atributo físico do solo sensível para a avaliação de sua condição estrutural. É um atributo relacionado diretamente à densidade (DS), pois valores elevados de DS reduzem os espaços vazios, aumenta a resistência mecânica dos solos e prejudica o crescimento radicular das plantas. A RP também se relaciona com a umidade do solo (θ), porém de forma inversa, pois valores baixos de umidade levam ao aumento da tensão da água intersticial e da coesão entre as partículas do solo, aumentando a RP e, conseqüentemente, reduzem a facilidade com que as raízes penetram no solo (Busscher, 1990; Reichert et al., 2003; Couto et al., 2016).

O presente estudo partiu da hipótese de que as áreas revegetadas com leguminosas arbóreas após 17 anos de implantação determinam melhores condições físicas ao solo quando comparadas à pastagem (área degradada) e que, com o passar dos anos, elas tendem a se aproximar da área sob floresta. Diante do exposto, o objetivo da pesquisa foi avaliar a eficiência da revegetação com as leguminosas *Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Inga spp.* para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, em Conceição de Macabú-RJ, a partir da resistência tênsil de agregados e da resistência do solo à penetração e das inter-relações entre as variáveis químicas e físicas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O sítio experimental localiza-se no município de Conceição de Macabú, Norte Fluminense, na Fazenda Carrapeta (21°37' S e 42°05' W). Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, quente e úmido, com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 1400 mm (Gama-Rodrigues et al., 2008). O relevo é forte ondulado, com declividade em torno de 0,35 m m⁻¹. O solo, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, tendo como

material de origem rochas graníticas-gnáissicas que compõem o embasamento cristalino regional.

No referido sítio, cinco áreas sob diferentes coberturas vegetais foram estudadas (Figura 1). Três dessas áreas são constituídas de plantios puros das espécies arbóreas de leguminosas *Acacia auriculiformis* (acácia), *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá) e *Inga spp.* (ingá), implantadas em dezembro de 1998 para fins de recuperação ambiental. As outras duas áreas, adjacentes aos plantios de leguminosas, têm como coberturas vegetais uma pastagem e uma capoeira. A pastagem, que representa a vegetação anterior ao plantio das espécies arbóreas, remonta a década de 1930, quando houve a supressão da cultura do café, tem o predomínio de capim-gordura (*Melinis minutiflora*), grama-pernambuco (*Paspalum maritimum*) e sapê (*Imperata brasiliensis*), sendo admitida como referência de área degradada por possuir pouca ou nenhuma cobertura sobre o solo. A capoeira é um fragmento florestal de Mata Atlântica em sucessão secundária, com espécies em diferentes estádios sucessionais, já está há cerca de 50 anos sem remoção de árvores por ação antrópica e foi admitida como referência de área preservada (Gama-Rodrigues et al., 2008).

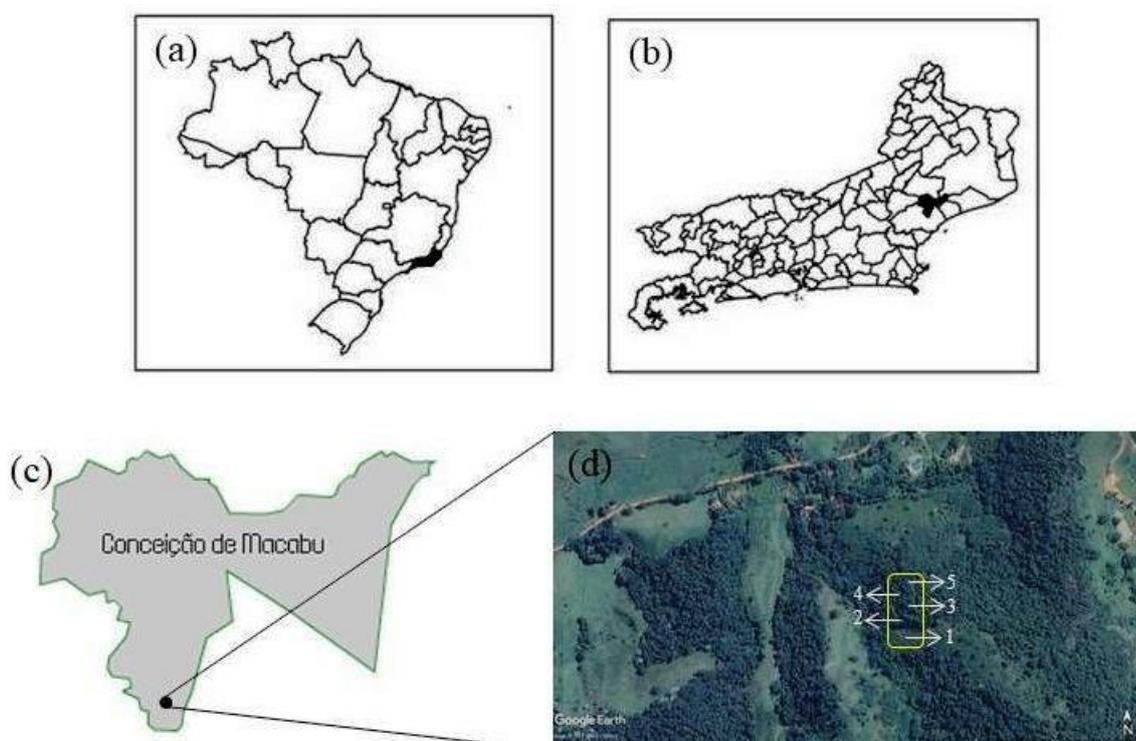


Figura 1. Localização da área experimental: (a) Brasil; (b) Estado do Rio de Janeiro; (c) Município de Conceição de Macabu, RJ; (d) Fazenda Carrapeta, com as coberturas vegetais: (1) Pasto; (2) Capoeira; (3) Ingá; (4) Sabiá; (5) Acácia.

Em julho de 2015 foram coletadas amostras de solo do horizonte superficial A, das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, em seis pontos de cada talhão, afastados 5 m entre si, na direção da maior declividade. As amostras com estrutura indeformada foram coletadas em anéis metálicos de 53 mm de altura e 100 mL de volume, com um amostrador SondaTerra®, sendo embaladas em papel alumínio. Em cada ponto foram coletados oito anéis, sendo quatro anéis por camada, totalizando 48 anéis por área e 240 para a área experimental. Em cada camada também foram coletadas, mediante escavação com auxílio de martelo pedológico, faca e colher de pedreiro, amostras de solo em que se buscou preservar os agregados naturais (amostras de agregados), sendo acondicionadas em embalagens plásticas rígidas com tampa, totalizando-se duas amostras por ponto (uma por camada), 12 por área e 60 para a área experimental. Também durante a escavação, esse mesmo número de amostras (60) foi coletado sem a preocupação de preservação de agregados (amostras deformadas), sendo estas acondicionadas em sacos plásticos.

Na mesma ocasião, uma trincheira previamente aberta em cada área foi utilizada para a descrição morfológica dos perfis, conforme instruções constantes no “Manual de descrição e coleta de solos no campo” (Santos et al., 2013). Nessas trincheiras foram, também, coletadas amostras do horizonte subsuperficial B textural (Bt), nas camadas 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. As amostras foram dos mesmos tipos já mencionadas acima para o horizonte A, sendo coletadas dois anéis metálicos, uma amostra de agregados e uma amostra deformada por camada, totalizando 40 amostras em anéis, 20 amostras de agregados e 20 amostras deformadas.

As amostras deformadas, após serem secas ao ar e peneiradas, foram utilizadas para a caracterização química e granulométrica do solo, com base em marchas analíticas descritas em Embrapa (2017). As amostras indeformadas, coletadas em anéis, foram utilizadas para a determinação da densidade (DS), da porosidade total (PT) e da curva de retenção de água no solo, com base em Libardi (2010), estando as médias de DS, PT, macroporosidade e microporosidade também presentes na Tabela 2. Para a obtenção das curvas de retenção, as amostras do horizonte superficial foram agrupadas em seis conjuntos para cada área, cada conjunto com oito anéis, sendo três conjuntos por camada, cada um obtido juntando-se os anéis provenientes de pontos vizinhos, dois a dois.

Tabela 1. Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	pH (H ₂ O)	P (mg kg ⁻¹)	C ---(mg kg ⁻¹)---	N	Al	H + Al	SB	CTC _{efet}	CTC _{pH=7}
0-0,10 m									
Capoeira	4,22	0,12	18,8	1,56	1,13	7,82	0,79	1,9	8,6
Pasto	4,26	0,22	13,1	0,93	0,85	6,40	0,41	1,3	6,8
Acácia	4,48	0,17	14,6	1,37	0,37	6,77	2,14	2,5	8,9
Ingá	4,22	0,15	13,9	1,07	0,98	6,55	0,90	1,9	7,5
Sabiá	4,26	0,18	16,0	1,36	1,17	7,77	1,05	2,2	8,8
0,10-0,20 m									
Capoeira	4,12	0,08	12,2	1,10	1,12	7,48	0,30	1,4	7,8
Pasto	4,18	0,04	11,3	0,86	0,92	7,07	0,16	1,1	7,2
Acácia	4,34	0,11	11,1	1,00	0,88	6,62	0,79	1,7	7,4
Ingá	4,28	0,08	10,8	1,01	1,08	6,57	0,40	1,5	7,0
Sabiá	4,22	0,10	11,9	1,00	1,23	6,65	0,46	1,7	7,1

pH em água (1:2,5); P: fósforo - Extrator Mehlich⁻¹; C: carbono - C orgânico determinado com dicromato de potássio por colorimetria; N total foi determinado pelo método Kjeldahl; Al: alumínio - extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo-solução de 1:10; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹; SB: Soma de bases trocáveis; CTC - Capacidade de troca catiônica efetiva e a pH 7,0. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Para cada conjunto obteve-se uma curva de retenção com oito pontos, sendo cada amostra utilizada em apenas uma tensão. Isso resultou em seis curvas por área e, portanto, três para cada camada, sendo uma curva para os pontos 1 e 2, outra para os pontos 3 e 4, e uma terceira para os pontos 5 e 6). Para o horizonte subsuperficial, as duas amostras de cada camada foram utilizadas em quatro tensões crescentes, sendo uma a 1, 6, 33 e 500 kPa e outra a 3, 10, 100 e 1500 kPa. Para as amostras do horizonte superficial as análises acima descritas foram realizadas por Gomes et al. (2018), estando os resultados dos atributos químicos e físicos apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, os quais, no presente trabalho, foram utilizados para análise e interpretação dos resultados de resistência tênsil de agregados e de resistência do solo à penetração. Para tais amostras do horizonte subsuperficial as análises foram realizadas no âmbito do presente trabalho, com os atributos químicos e físicos sendo apresentados em conjunto com os resultados de resistência mecânica do solo, dando subsídio para uma melhor análise e interpretação desses.

Tabela 2. Atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	Areia	Silte	Argila	DS	PT	Macro	Micro
	----- (g kg ⁻¹) -----			Mg m ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----		
0-0,10 m							
Capoeira	640,0	85,5	274,5	1,114	0,580	0,398	0,181
Pasto	637,0	90,7	271,7	1,361	0,486	0,223	0,263
Acácia	627,1	70,1	302,8	1,386	0,477	0,249	0,228
Ingá	610,8	93,1	296,1	1,215	0,542	0,321	0,221
Sabiá	603,8	96,8	299,4	1,258	0,525	0,294	0,233
0,10-0,20 m							
Capoeira	598,5	93,8	307,6	1,093	0,587	0,355	0,233
Pasto	533,3	110,2	394,1	1,271	0,520	0,265	0,255
Acácia	510,0	96,0	394,1	1,474	0,444	0,175	0,268
Ingá	535,7	108,4	356,0	1,283	0,516	0,241	0,275
Sabiá	515,4	111,7	372,9	1,370	0,483	0,193	0,290

DS: densidade do solo, PT porosidade total, Macro: macroporos diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$ e Micro: microporos diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Durante a confecção das curvas de retenção por Gomes et al. (2018), quando as amostras do horizonte superficial submetidas às tensões 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa em câmaras de pressão de Richards atingiam o equilíbrio, estas eram retiradas e utilizadas para a determinação da resistência à penetração (RP), conforme protocolo estabelecido por Silva et al. (1994), tirando proveito do gradiente de umidade estabelecido entre as amostras. Para tal, foi utilizado o penetrógrafo de bancada, com ponteira de 4 mm de diâmetro basal e semiângulo de 30° , com velocidade de penetração ajustada para 10 mm min^{-1} . Um computador acoplado ao aparelho registra, a cada segundo, durante 240 segundos, em um curso de penetração de 40 mm, os valores de resistência medidos por uma célula de carga. Para representar a resistência à penetração de cada amostra (RP, MPa), foi considerada a média dos referidos valores, com descarte daqueles iniciais, crescentes, anteriores ao atingimento de um patamar gráfico. Para o horizonte superficial, foram avaliadas um total de 150 amostras, obtendo-se, para cada tensão de água considerada, 30 valores médios de RP, sendo seis valores de RP para cada área (três por camada).

Para o horizonte subsuperficial, as amostras foram avaliadas quando em equilíbrio com as tensões de água 33, 100, 500 e 100 e 1500 kPa, resultando em 80 valores médios de RP, sendo 16 valores de RP para o horizonte Bt de cada área e quatro valores por camada. Como havia disponibilidade de apenas duas amostras por camada do Bt (ou seja, um total de oito por perfil e 40 para as cinco áreas), cada amostra foi perfurada duas vezes, sendo a primeira penetração da superfície

até 20 mm de profundidade (com a amostra em equilíbrio a uma tensão de 33 kPa ou de 100 kPa), e a segunda penetração, em continuidade à primeira, de 20 mm até 40 mm de profundidade (com a amostra em equilíbrio a uma tensão de 500 kPa ou de 1500 kPa).

Para a determinação da resistência tênsil de agregados, as amostras contendo agregados naturais preservados foram secas ao ar e passadas, inicialmente, por uma peneira com malha de 19 mm de abertura. Durante esse procedimento, os agregados de diâmetro maior que 19 mm e inicialmente retidos nessa peneira foram sendo quebrados manualmente e convertidos progressivamente em unidades de menor tamanho, até que todo o material passasse pela referida malha. Embora nesse processo as amostras sofram estresse mecânico, foi demonstrado que este método de preparação das amostras não possui efeitos significativos sobre a estrutura ou resistência tênsil de amostras secas ao ar (Grant et al., 1990). Após isso, as amostras foram passadas por peneiras de malha com 12,5 mm de abertura e, na sequência, com 8 mm, permitindo separar e/ou obter agregados de duas faixas de tamanho, sendo uma de 19 a 12,5 mm e outra de 12,5 a 8 mm de diâmetro. Estas faixas foram escolhidas, a princípio, porque selecionam agregados que podem ser desagregados manualmente com maior facilidade e, também, porque esses são os agregados que, durante as operações de preparo do solo, são fragmentados e levam à formação de uma cama de semeadura ideal para a emergência e o desenvolvimento das plântulas de diferentes tamanhos (Dexter, 1988).

Para o horizonte superficial, em cada um dos seis pontos de coleta, as medições de RT foram feitas em 140 agregados (70 por camada e 35 por classe de tamanho), totalizando 840 por talhão (420 por camada e 110 por classe de tamanho) e 4200 para a área experimental (2100 por camada e 1050 por classe de tamanho). Para o horizonte subsuperficial, a RT foi determinada em 280 agregados cada talhão (70 por camada), totalizando 1400 agregados para a área experimental (350 por camada), sendo metade dessas determinações em cada classe de tamanho. Antes dos testes, os agregados obtidos foram secos em estufa com ventilação de ar forçada a 65°C por 24 h para a padronização da umidade. Cada agregado foi pesado em balança analítica e, em seguida, submetido, individualmente, a um teste de tensão indireta em atuador eletrônico linear, empregando velocidade constante (Imhoff et al., 2002), no presente caso de 4

mm min⁻¹. Para o teste de tensão indireta, cada um dos agregados de solo foi colocado em posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior fixa e outra superior móvel ligada a uma célula de carga com capacidade de 20 kgf. A célula de carga é acoplada à extremidade inferior do êmbolo do atuador eletrônico linear e a um microcomputador, que registra, a cada segundo, o crescimento da força aplicada até a ruptura tênsil de cada agregado. A resistência tênsil foi, então, calculada conforme descrito por Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 \frac{P}{D^2} \quad (1)$$

sendo 0,576 uma constante de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado, P a força aplicada por ocasião da ruptura (N), e D o diâmetro efetivo de cada agregado (m).

O diâmetro efetivo do agregado foi calculado de acordo com a equação proposta por Watts e Dexter (1998):

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_0} \right)^{1/3} \quad (2)$$

sendo M a massa de cada agregado (g), M₀ a média da massa dos agregados que constituíam uma amostra (g), e D_m o diâmetro médio (mm). O diâmetro médio dos agregados foi assumido como sendo o diâmetro médio da malha das peneiras utilizadas para seleccioná-los, ou seja, na classe 19 a 12,5 mm (RT 12,5) a média foi 15,75 mm e na 12,5 a 8 mm (RT 8) a média foi 10,25 mm.

Análises estatísticas

De forma semelhante a outros trabalhos realizados na presente área de estudo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Costa et al., 2014; Gomes et al., 2018), a análise estatística dos resultados das duas camadas que compõem o horizonte superficial A foi feita admitindo-se um delineamento inteiramente casualizado. Para a análise estatística foram considerados, ainda, os tratamentos em um esquema de parcelas subdivididas, com as coberturas vegetais como parcelas e as duas camadas de amostragem de solo como subparcelas, e os pontos de coleta como

repetições. A análise estatística foi realizada usando o programa “Assistat”, incluindo-se a análise de variância experimental, a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e a análise de correlação linear de Pearson entre as variáveis que descrevem a resistência mecânica do solo (RT e RP) e outros atributos do solo (químicos e físicos). Diante da predominância de diferenças estatísticas entre as camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, a análise de correlação foi realizada por camada (com $n = 30$ para a RT e com $n = 15$ para a RP, sendo “n” o número de pares de dados cada camada).

Posteriormente, por meio do programa XLStat 7.5, também para cada camada do horizonte A, separadamente, foi feita a análise de componentes principais (ACP). Com a ACP buscou-se avaliar a dispersão das cinco coberturas vegetais estudadas a partir de variáveis relacionadas à resistência mecânica (RT 8, RT 12,5 e RP100) e a outros aspectos físicos (DS e macroporosidade) e químicos (C, soma de bases, CTC efetiva e CTC a $\text{pH} = 7,0$) do solo. As variáveis representativas dos referidos aspectos foram selecionadas pela efetiva capacidade em distinguir as coberturas vegetais (identificada a partir da ANOVA e do teste de Tukey) e, ao mesmo tempo, não produzir informação redundante (identificada graficamente nos diagramas da ACP e corroboradas pela ausência de elevada correlação linear entre as variáveis). Também para cada camada foi realizada, ainda, a análise de agrupamento pelo método de Tocher, que permite avaliar a similaridade ou dissimilaridade das coberturas vegetais inter e intragrupos e, também, a avaliação da importância de cada variável na variação total disponível entre as coberturas, através do programa estatístico GENES (Cruz et al., 2004).

Para o horizonte subsuperficial Bt, em que a coleta das amostras nas camadas foi feita sem repetições, não foi realizada a análise de variância, mas foi feita a análise de correlação linear de Pearson entre as variáveis que refletem a resistência mecânica e os mesmos atributos químicos e físicos considerados no horizonte A, também usando o “Assistat”. No caso do horizonte Bt, tanto para RT e quanto para RP, $n = 20$, sendo os pares de dados advindos das quatro camadas e cinco coberturas vegetais. Realizou-se, também para o conjunto das camadas que compõem o horizonte Bt (0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m), a ACP e a análise de Tocher, considerando-se as mesmas variáveis do horizonte A e com o auxílio do mesmo programa GENES (Cruz et al., 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resistência tênsil de agregados e resistência do solo à penetração no horizonte superficial A

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de resistência tênsil dos agregados retidos nas peneiras de 8 e 12,5 mm de malha (RT 8 e RT 12,5, respectivamente) e de resistência do solo à penetração (RP) para as tensões da água 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa.

Tabela 3. Resistência tênsil de agregados (RT) e resistência do solo à penetração sob as tensões da água 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa (RP10, RP33, RP100, RP500 e RP1500, respectivamente), para as diferentes coberturas vegetais e camadas de solo estudadas, em Conceição de Macabú - RJ.

Cobertura Vegetal	RT 8*	RT 12,5	RP10	RP33*	RP100*	RP500*	RP1500*
	------(kPa)-----		----- (MPa) -----				
0-0,10 m							
Capoeira	62,2	37,8 aA	0,41 bA	0,57	0,68	1,05	1,91
Pasto	37,1	22,7 bA	1,42 abA	2,55	1,96	3,56	4,20
Acácia	41,7	24,7 bB	2,26 aA	2,31	3,35	4,75	5,11
Ingá	49,0	37,1 aA	0,57 bA	1,09	1,26	1,57	1,55
Sabiá	47,4	46,0 aB	0,85 bB	1,77	2,80	3,38	2,94
Média	47,3 A	33,7	1,10	1,66 A	2,01 B	2,86 B	3,14 B
0,10-0,20 m							
Capoeira	51,2	30,3 bcB	0,61 cA	0,74	1,08	1,49	1,27
Pasto	39,2	22,8 cA	1,09 bcA	1,71	1,65	3,80	5,17
Acácia	42,0	36,3 bA	2,22 aA	3,82	4,82	8,14	14,79
Ingá	49,3	38,1 bA	1,03 bcA	1,87	1,28	5,00	7,52
Sabiá	53,0	51,4 aA	1,94 abA	2,99	4,56	5,17	7,53
Média	47,0 A	35,8	1,38	2,23 A	2,68 A	4,72 A	7,25 A
0-0,20 m (média das camadas)							
Capoeira	56,7 a	34,1	0,51	0,66 c	0,88 c	1,27 b	1,59 b
Pasto	37,6 c	22,8	1,25	2,13 ab	1,81 bc	3,68 ab	4,68 b
Acácia	41,9 bc	30,5	2,24	3,07 a	4,08 a	6,44 a	9,95 a
Ingá	49,1 ab	37,6	0,80	1,48 bc	1,27 c	3,29 ab	4,54 b
Sabiá	50,2 ab	48,7	1,39	2,38 ab	3,68 ab	4,27 ab	5,23 ab
Média	47,1	34,7	1,24	1,94	2,34	3,79	5,20
CV-a (%)	18,36	19,46	42,5	28,2	45,0	50,8	47,8
CV-b (%)	14,75	20,93	26,4	39,6	29,7	29,6	55,8

RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP10: resistência à penetração de 10 kPa, RP33: resistência à penetração de 33 kPa, RP100: resistência à penetração de 100 kPa, RP500: resistência à penetração de 500 kPa, RP1500: resistência à penetração de 1500 kPa. Obs. 1: Para cada coluna, médias seguidas de mesma letra maiúscula (que compara camadas) ou de mesma letra minúscula (que compara coberturas vegetais), não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Obs. 2: CV-a e CV-b são, respectivamente, os coeficientes de variação obtidos na análise de variância para parcela e subparcela.* médias que não foram significativas pelos teste F.

Em relação à resistência tênsil, as médias de RT 8 foram superiores às de RT 12,5, resultado esperado devido ao fato que agregados menores geralmente

possuem fissuras mais estreitas, o que leva a uma maior resistência. Na camada 0-0,10 m a média geral de RT 12,5 foi 33,7 kPa (com médias das coberturas variando de 22,7 a 46,0 kPa), enquanto a de RT 8 foi 47,3 kPa (médias entre 37,1 e 62,2 kPa), 40% superior à média geral de RT 12,5. Na camada 0,10-0,20 m a média geral de RT 12,5 foi 35,8 kPa (médias de 22,8 a 51,4 kPa), enquanto a de RT 8 foi 47,0 kPa (variaram de 39,2 a 53,0), 31% superior à de RT 12,5.

Grant et al. (1990) relatam que, em materiais homogêneos, onde as microfissuras geralmente são distribuídas de forma aleatória, rachaduras menores do que um tamanho crítico permanecerão estáveis sob um estresse aplicado, enquanto as maiores se propagarão para criar uma zona de falha ou superfície de fraqueza. Tais superfícies intra-agregado são resultantes do modo como se deu a formação dos agregados e a estabilização da estrutura do solo e também do histórico de tensões a que o solo foi submetido. Diante da aplicação de uma tensão crescente, as zonas de falha previamente existentes são determinantes para definir o momento do rompimento do agregado e, portanto, a magnitude de RT.

Quanto à RT 8 (Tabela 3), verificou-se que não houve diferença estatística entre as duas camadas estudadas, e que, comparando-se estatisticamente as coberturas vegetais por meio da média das duas camadas, a maior RT 8 ocorreu na área da capoeira, mas sem diferir das áreas do ingá e sabiá, a menor RT 8 ocorreu no pasto, mas sem diferir da acácia, e que as três leguminosas não diferiram entre si. Já quanto à RT 12,5 (Tabela 3), verificou-se que nas áreas do pasto e ingá não houve diferença estatística entre as camadas e que na área da capoeira o maior valor foi na camada 0-0,10 m e que o inverso ocorreu nas áreas de acácia e sabiá, com superioridade da camada 0,10-0,20 m. Ainda quanto à RT 12,5 verifica-se que, para as duas camadas, houve diferenças estatísticas entre as áreas. Na camada 0-0,10 m, as áreas sob capoeira, ingá e sabiá (que não diferiram entre si) apresentaram valores superiores aos da acácia e pasto (que também não diferiram entre si). Na camada 0,10-0,20 m, a área sob sabiá apresentou a maior média (51,4 kPa), diferindo das demais, as áreas sob ingá, sabiá e capoeira apresentaram valores intermediários, não diferindo entre si, e a área sob pasto apresentou a menor média (22,8 kPa), não diferindo apenas da capoeira.

Tabela 4. Características morfológicas dos perfis de Argissolo Vermelho-Amarelo das áreas sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

Áreas	Horizontes/ prof.(cm)	Cor/Úmido	Cor/Seco	Estrutura	Consistência	Transição
Capoeira	A1/0-15	7,5YR 4/6	7,5YR 4/4	sub/me pe/fo	lgd/mfr/lpl/peg	grd
	A2/15-20	7,5YR 4/6	7,5YR 5/8	sub/me pe/fo	lgd/fr/pl/peg	clr
	BA/20-42	5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt1/42-63	5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/lpl/lpeg	grd
	Bt2/63-85	5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/pe me/fo	lgd/fr/pl/lpeg	grd
	Bt3/85-110+	5YR 4/6	7,5YR 6/6	sub/pe me/mo	lgd/fr/lpl/lpeg	-
Pasto	A1/0-10	7,5YR 5/6	7,5YR 5/6	sub/pe me/fo	lgd/mfr/pl/peg	grd
	A2/10-20	7,5YR 4/6	7,5YR 6/8	sub/me pe/fo	lgd/fr/pl/peg	clr
	BA/10-30	7,5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/pe me/mo	lgd/fr/lpl/peg	grd
	Bt1/30-50	7,5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/pe me/mo	lgd/mfr/lpl/peg	grd
	Bt2/50-75	5YR 5/8	7,5YR 5/8	sub/pe me/fo	lgd/fr/lpl/peg	grd
	Bt3/75-110+	7,5YR 5/8	7,5YR 6/8	sub/pe me/fo	lgd/fr/lpl/lpeg	-
Acácia	A1/0-10	7,5YR 4/4	7,5YR 4/6	sub/me pe/fo	lgd/mfr/lpl/peg	grd
	A2/10-25	7,5YR 4/6	7,5YR 5/8	sub/me pe/fo	lgd/mfr/lpl/peg	clr
	BA/15-35	5YR 4/6	5YR 4/6	sub/me pe/fo	du/mfr/pl/peg	grd
	Bt1/35-55	5YR 4/6	5YR 5/6	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt2/55-80	5YR 4/6	5YR 5/6	sub/pe me/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt3/80-110+	5YR 5/6	5YR 5/8	sub/ pe me/fo	du/fr/pl/peg	-
Ingá	A1/0-10	7,5YR 4/3	7,5YR 5/4	sub/pe me/fo	lgd/mfr/lpl/peg	grd
	A2/10-20	7,5YR 4/6	7,5YR 5/6	sub/pe me/fo	lgd/mfr/lpl/peg	clr
	BA/20-40	5YR 4/6	2,5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt1/40-65	2,5YR 4/8	2,5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt2/65-82	5YR 5/8	5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt3/82-110+	5YR 5/8	5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	-
Sabiá	A1/0-12	7,5YR 4/6	7,5YR 5/6	sub/me pe/fo	lgd/mfr/lpl/peg	grd
	A2/12-24	7,5YR 4/6	7,5YR 5/6	sub/me pe/fo	lgd/mfr/lpl/peg	clr
	BA/24-40	5YR 5/8	5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt1/40-65	5YR 4/6	5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/mfr/pl/peg	grd
	Bt2/65-85	5YR 4/6	5YR 5/8	sub/me pe/fo	du/fr/pl/peg	grd
	Bt3/85-110+	5YR 4/6	5YR 5/8	sub/pe me/fo	lgd/mfr/pl/peg	-

Estrutura: fr= fraca; mo= moderada; fo= forte; mp= muito pequena; pe= pequena; me= média; gr= granular; ang= blocos angulares; sub= blocos subangulares; mac = maciça. Consistência: ma= macia; lgd= ligeiramente dura, du = dura, mdu = muito dura; mfr= muito friável; fr = friável ppl = pouco plástico, lpl= ligeiramente plástico, pl = plástico; ppeg.= pouco pegajoso, lpeg = ligeiramente pegajoso, peg = pegajoso. Transição: pl = plana, ond = ondulada; abr = abrupta, clr = clara, grd = gradual, dif = difusa.

Obs: Quanto às raízes, durante a descrição dos perfis de solo observou-se: (i) capoeira - comuns em A1, A2 e Bt2, abundantes em BA e Bt1 e poucas em Bt3; (ii) pasto - abundantes em A1, A2, BA, Bt1 e Bt2 e comuns em Bt3 (raízes fasciculadas); (iii) acácia - comuns em A1, Bt1 e Bt2 e poucas em A2, BA e Bt3; (iv) ingá - comuns em A1, A2, BA e Bt2, abundantes em Bt1 e poucas em Bt3; e (v) sabiá - poucas em A1, A2 e Bt3 e comuns em BA, Bt1 e Bt2.

As diferenças para RT 8 e RT 12,5, descritas acima ocorreram a despeito da grande uniformidade morfológica (cor, estrutura e consistência) verificada para os perfis, inclusive no horizonte A superficial (Tabela 4), o que revela que a resistência

tênsil é uma variável sensivelmente afetada pelo uso e manejo e, portanto, tem potencial como indicadora da qualidade do solo (Imhoff et al., 2002; Reis et al., 2014).

Poder-se-ia supor que a resistência tênsil aumentaria com uma maior aproximação entre as partículas, seja por adensamento (processo pedogenético), seja por compactação (decorrente do manejo), pois isso reduziria o espaço poroso intra-agregado e levaria à redução da quantidade de fissuras ou, ao menos, de suas espessuras. Reis et al. (2014) apresentam resultados que corroboram tal suposição, pois mostram correlações da RT positiva com densidade do solo e negativa com a porosidade total. No presente caso, no entanto, os menores valores de RT no pasto ocorreram a despeito de sua densidade estar entre as mais elevadas (Tabela 2), e os maiores valores de RT na capoeira, mesmo essa área apresentando as menores densidades. Como consequência, a análise de correlação linear de Pearson revelou, para a camada 0-0,10 m, que em ambas as classes de agregado (RT 8 e RT 12,5) as correlações foram significativas (Tabela 5), porém com sinal inverso ao esperado (negativo com a densidade do solo e microporosidade e positivo com a porosidade total e macroporosidade). Para a camada 0,10-0,20 m, a suposição referida acima foi corroborada apenas nos agregados maiores, com RT 12,5 correlacionando-se positivamente com a densidade do solo e microporosidade e negativamente com a porosidade total e macroporosidade. Para os agregados menores dessa camada 0,10-0,20 m a referida suposição também foi contrariada, pois RT 8 não se correlacionou significativamente com a densidade ou com os demais atributos do solo relacionados à estrutura (porosidade total e suas frações).

O fato do solo do pasto ter apresentado, nas duas camadas de estudo, as menores médias de RT 8 e RT 12,5, pode estar associado ao sistema radicular das gramíneas, que pode ter sido mais eficiente em criar fissuras intra-agregados.

Pode-se observar que na área do pasto a presença de raízes até 0,20 m de profundidade foi descrita como “comum” (Tabela 4), e estas raízes finas podem ter crescido dentro dos agregados e diminuído sua resistência à ruptura. Para a capoeira, também com raízes “comuns” no horizonte superficial (Tabela 4), essas, sendo pivotantes, podem ter crescido predominantemente nas superfícies de fraqueza, externamente aos agregados, envolvendo-os e até mesmo incrementando sua RT.

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre resistência tênsil de agregados (RT) e resistência do solo à penetração sob as tensões da água 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa (RP10, RP33, RP100, RP500 e RP1500, respectivamente) e os atributos químicos e físicos (camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

	RT 12,5	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau Floc.	DS	PT	Macro.	Micro.	Macro2.	Meso.	Micro2.	Cripto.
0-0,10 m														
RT 8	0,55**		-0,50**				-0,66**	0,66**	0,72**	-0,72**	0,72**			-0,72**
RT 12,5							-0,50**	0,50**	0,47**		0,49**			-0,53**
RP10					0,46*	-0,70**	0,83**	-0,83**	-0,70**	0,38*	-0,67**			0,40*
RP33			0,43*				-0,46**	0,83**	-0,83**	-0,85**	0,79**	-0,85**		0,74**
RP100				0,42*	0,54**		0,71**	-0,71**	-0,60**		-0,53**	-0,43*		0,50**
RP500							0,84**	-0,84**	-0,78**	0,56**	-0,74**			0,42*
RP1500			0,38*		0,54**	-0,58**	0,87**	-0,87**	-0,79**	0,53**	-0,76**			0,47*
0,10-0,20 m														
RT 8	0,49**	-0,39*		0,41*	0,51**									
RT 12,5						-0,41*	0,40*	-0,40*	-0,51**	0,69**	-0,55**			0,80**
RP10							0,87**	-0,87**	-0,86**	0,58**	-0,85**	-0,65**	0,54**	0,50**
RP33							0,89**	-0,89**	-0,84**	0,50**	-0,82**	-0,82**		0,55**
RP100							0,83**	-0,83**	-0,80**	0,50**	-0,79**	-0,66**		0,50**
RP500					-0,46*		0,87**	-0,87**	-0,83**	0,50**	-0,80**	-0,87**	0,50**	0,46*
RP1500		0,57**		-0,60**	-0,79**	0,65**	0,81**	-0,81**	-0,75**	0,47*	-0,72**	-0,80**	0,65**	
C N P pH Al H+Al Ca Mg K CTC _{efet} V% m%														
0-0,10 m														
RT 8	0,41*	0,45*					0,46*							
RT 12,5						0,43*	0,59**							
RP10				0,82**	-0,79**			0,78**		0,53**				-0,68**
RP33	0,41**						-0,49**							
RP100			0,61**					0,71**	0,56**	0,73**	0,53**	0,61**	-0,51**	
RP500								0,48*		0,58**	0,40*	0,38*		
RP1500			0,38*	0,55**	-0,60**			0,50**		0,50*		0,39*	-0,41*	
0,10-0,20 m														
RT 8								0,48**			0,37*			
RT 12,5			0,45*						0,51**	0,49**	0,56**	0,44*		
RP10			0,60**					0,74**	0,40*	0,63**	0,50**	0,73**	-0,64**	
RP33			0,54**	0,41*			-0,42*	0,78**	0,50**	0,75**	0,67**	0,78**	-0,71**	
RP100			0,52**	0,45*				0,81**	0,57**	0,73**	0,61**	0,76**	-0,68**	
RP500			0,39*				-0,64**	0,61**		0,60**	0,47*	0,62**	-0,50**	
RP1500				0,80**	-0,55**			0,76**	0,43*			0,74**	-0,81**	

* e ** significativos ($p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente). Coeficientes não significativos não foram apresentados na tabela. RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP10: resistência à penetração de 10 kPa, RP33: resistência à penetração de 33 kPa, RP100: resistência à penetração de 100 kPa, RP500: resistência à penetração de 500 kPa, RP1500: resistência à penetração de 1500 kPa, Arg.Disp: argila dispersa, Grau floc.: grau de flocculação, DS: densidade do solo, distribuição na escala usual: macroporos (macro: diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos (micro: diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$); distribuição na escala detalhada: macroporos (macro2: diâmetro $\geq 100 \mu\text{m}$), mesoporos (meso: $100 \mu\text{m} \geq \text{diâmetro} \geq 30 \mu\text{m}$), microporos (micro2: $30 \mu\text{m} \geq \text{diâmetro} \geq 0,2 \mu\text{m}$) e criptoporos (cripto: diâmetro $\leq 0,2 \mu\text{m}$), C: carbono do solo, P: fósforo, pH: acidez do solo, Al: alumínio, H+Al: hidrogênio mais alumínio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, K: potássio, CTC_{efet}: CTC efetiva, V%: saturação por base, m%: saturação por alumínio.

Reis et al. (2014), avaliando a RT de um solo “construído” com plantas de cobertura em área de mineração de carvão, relatam que a redução dos valores de RT pode ser promovida pelo incremento de porosidade intra-agregado, aumentando o número de zonas internas de fraqueza (poros). Além disso, a presença de raízes das gramíneas no interior dos agregados, absorvendo água, levaria variações mais expressivas de umidade e favoreceria a criação de novas superfícies de fraqueza, diminuindo sua RT (Guimarães et al., 2009). Nesse mesmo sentido, Tormena et al. (2008a) relatam que a transpiração das plantas e a evaporação da água do solo podem contribuir para menores valores de resistência tênsil, pois podem acelerar os ciclos de umedecimento e secagem. Na área do pasto, as falhas na cobertura vegetal do solo podem acelerar os ciclos de umedecimento e secagem, o que pode promover essa menor RT.

No presente caso, a realização de uma análise de correlação linear alternativa, usando apenas os dados das áreas sob coberturas arbóreas (com $n = 24$), levou a um resultado similar ao anteriormente descrito. Para a camada 0-0,10 m, com a exclusão dos dados do pasto, ambas as variáveis, RT 8 e RT 12,5, continuaram a exibir correlações com sinal inverso ao esperado (embora tenham deixado de ser significativas para RT 12,5). Para a camada 0,10-0,20 m o padrão dos resultados também não mudou em relação ao que consta na Tabela 5, com as correlações de RT 8 com as variáveis estruturais do solo sendo, contrariamente ao esperado, não significativas, e as de RT 12,5 com atributos estruturais sendo significativas e, nesse caso, com sinal conforme esperado (positivo com a densidade do solo e microporosidade e negativo com a porosidade total e macroporosidade). A similaridade entre as correlações obtidas com e sem os dados do pasto não permite excluir a possibilidade de interferência do sistema radicular fasciculado das gramíneas na redução da RT, uma vez que nas áreas sob as leguminosas tal efeito pode ter sido herdado do período anterior à revegetação, quando a área era toda ocupada pela pastagem.

Outro fator que tem influência sobre os valores de RT é o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), mas ainda perdurando dúvidas quanto ao seu real efeito, uma vez que poderia promover tanto aumento como redução dos valores de RT (Imhoff et al., 2002). Costa et al. (2014), trabalhando na mesma área do presente estudo, verificaram acúmulo de serapilheira no sabiá de $5,35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor superior ao das demais coberturas. Gomes et al. (2018), analisando

amostras de solo coletadas nos mesmos pontos e, concomitantemente às do presente trabalho, verificou que o sabiá propiciou teores de C no solo que não diferiram estatisticamente da capoeira e foram mais elevados que as demais coberturas (Tabela 1), dando margem à interpretação de que os maiores valores de RT de agregados no sabiá estejam funcionalmente associados aos maiores conteúdos de MOS nessa área.

Como a MOS pode atuar como agente agregante, um maior teor favoreceria o aumento no número e na força das ligações entre partículas minerais do solo, elevando os valores de RT (Imhoff et al., 2002; Tormena et al., 2008a). Guérif (1994) relata que a MOS pode ser incorporada em poros de menor tamanho ou entre as partículas de argila, o que favorecerá a estabilização de microagregados e, como consequência disso, um incremento da resistência de agregados de maior tamanho. Apesar dos resultados relativos ao sabiá, acima destacados, os resultados da análise de correlação linear de Pearson (Tabela 5) revelaram que apenas RT 8 na camada 0-0,10 m apresentou correlação significativa com o teor de C, e que para os demais casos estudados (RT 8 na 0-0,10 m e RT 12,5 nas duas camadas) não houve correlações significativas da resistência tênsil com o teor de C, resultados que corroboram os encontrados por Imhoff et al. (2002) e Tormena et al. (2008b).

Vale ressaltar que na literatura são encontrados valores de RT variando em função do manejo dado ao solo. Como exemplo, Tormena et al. (2008a), trabalhando em solos de mata, pousio e área de cultivo, encontraram valores de 30 kPa para a área da mata e de 75 kPa para a área de cultivo, sendo que esses resultados tiveram relação direta com o aumento da densidade. Já Guimarães et al. (2009), avaliando um solo sob o sistema integração lavoura-pecuária, com diferentes alturas de pastejo, encontraram valores de RT que variaram de 64 a 92 kPa. Bavoso et al. (2010), com o objetivo de avaliar a qualidade estrutural de um Latossolo Bruno argiloso sob diferentes sistemas de produção e preparo do solo, encontraram valores de RT variando de 30 a 51,72 kPa, sendo o menor encontrado na área de pastejo e o maior na do sistema de plantio direto (SPD), tendo os autores justificado o maior valor no SPD pelo efeito de tráfego de máquinas e o menor valor no pasto pelo já amplamente discutido efeito do sistema radicular das gramíneas na promoção de fissuras intra-agregados, seja pela ação física direta das raízes, seja pela intensificação dos ciclos de umedecimento e secagem dos agregados.

Lehrsch et al. (2012) relatam que deve haver um equilíbrio nos valores de RT, de modo que não sejam altos ao ponto de restringir a emergência de plântulas, nem baixos tal que o solo não seja capaz de suportar o peso dos equipamentos com o mínimo de compactação.

Os resultados de resistência à penetração (RP) mostram a relação direta desse atributo com a tensão da água e, portanto, relação inversa com a umidade do solo, em que quanto mais seco o solo, maior sua resistência mecânica. Na camada 0-0,10 m a RP variou de 0,41 MPa na tensão 10 kPa até 5,11 MPa na tensão 1500 kPa, enquanto na camada 0,10-0,20 m variou de 0,61 MPa na tensão 10 kPa até 14,79 MPa na tensão 1500 kPa, sendo que em ambas as camadas os menores valores ocorreram na área sob capoeira e os maiores na sob acácia (Tabela 3). De acordo com a literatura, valores de RP de 2 a 3 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de várias culturas (Saglam e Dengiz, 2017). Lipiec e Hatano (2003) acrescentam que valores de RP variando de 1 a 1,7 MPa já começam a restringir o crescimento radicular, e que em valores superiores a 3 MPa tal restrição ao crescimento é quase total.

A área da acácia, nas duas camadas de estudo, apresentou valores de RP acima de 2 MPa em todas as tensões (10, 33, 100, 500 e 1500 MPa), contrastando com a capoeira, com RP sempre abaixo de 2 MPa, e com o ingá, que apresentou valores de RP maiores que 2 MPa apenas nas tensões 500 e 1500 kPa na camada 0,10-0,20 m. Diversos valores acima de 2 MPa ocorreram, ainda, no pasto (sob as tensões 33, 500 e 1500 kPa, na camada 0-0,10 m, e 500 e 1500 kPa, na camada 0,10-0,20 m) e no sabiá (sob as tensões 100, 500 e 1500 kPa, na camada 0-0,10 m, e 33, 100, 500 e 1500 kPa, na camada 0,10-0,20 m), indicando nível de compactação do solo também elevado nessas áreas. Embora, na presente área, a substituição do pasto por leguminosas arbóreas tenham levado à recuperação de diversos atributos químicos e físicos do solo (Gomes et al., 2018) e mesmo hídricos (Lopes, 2017), quanto à RP os resultados ora observados revelam que não houve recuperação, como no caso do solo sob ingá, ou a condição de RP foi agravada, como no solo sob sabiá e, principalmente, sob acácia.

Em relação à análise de correlação linear de Pearson (Tabelas 5), os resultados revelam, para as duas camadas de solo, que sob as diversas tensões de água estudadas a RP correlacionou-se, por um lado, positivamente com a densidade e com as variáveis microporosidade e criptoporosidade, que

representam as frações de poros de menor diâmetro, e, por outro lado, negativamente com a porosidade total e com as variáveis macroporosidade e mesoporosidade, que representam as frações de poros de maior diâmetro.

Para os atributos granulométricos e de qualidade da flocculação da argila a análise de correlação revelou poucos valores significativos (apenas 14, entre 50 possíveis) e os resultados apresentaram-se contraditórios entre as duas camadas. Enquanto para a 0-0,10 m as correlações foram positivas com o silte, a argila e a argila dispersa em água e negativa com o grau de flocculação (Tabela 5), para a 0,10-0,20 m as correlações foram positivas com a areia e o grau de flocculação e negativas com a argila e a argila dispersa em água (Tabela 5). Por um lado, a baixa ocorrência de correlações significativas pode estar associada à restrita faixa de variação destas variáveis granulométricas. Por outro lado, a falta de padrão dessas correlações pode estar relacionada a variações na umidade do solo, já que o estabelecimento de tensões de água fixas para a realização dos ensaios de penetração não impede variações no conteúdo de água entre as amostras sob uma mesma tensão, as quais podem decorrer de variações, tanto do arranjo estrutural da matriz do solo quanto de sua composição granulométrica.

Para as variáveis químicas verificou-se que, das correlações testadas (110), mais que a metade (61) foi significativa. Os resultados apresentaram-se concordantes entre as duas camadas, sendo que a RP correlacionou-se positivamente com as variáveis que se associam a uma maior fertilidade no solo e disponibilidade de nutrientes (pH, P, Ca, Mg, K, CTC_{efet} e V%) e negativamente com as variáveis que denotam o inverso (Al, H+Al e m%). A maior fertilidade e disponibilidade de nutrientes no solo representa, de fato, maior disponibilidade de cargas na superfície das partículas, o que é determinante para o estabelecimento de ligações químicas que estabilizam a estrutura do solo.

Análise de componentes principais e de agrupamentos pelo método de Tocher para o horizonte superficial A

A análise de componentes principais (ACP) realizada a partir de alguns atributos físicos e químicos do solo permitiu explicar grande parte da variação total verificada entre as áreas de referência, capoeira (preservada) e pasto (degradada), e as revegetadas com leguminosas arbóreas. Na ACP realizada para a camada

0-0,10 m do solo verificou-se que 85,54% da variação total estiveram associadas aos dois primeiros componentes principais (Figura 2a). Dos atributos considerados, os mais fortemente correlacionados com o componente principal 1 (CP1) foram RT 8, RP100, DS, Macro e C, que explicaram 47,0% da dissimilaridade entre os sistemas (Tabela 6). Já o componente principal 2 (CP2) explicou 38,5% da variação entre os sistemas, e teve como atributos mais relevantes Argila, SB, CTC_{efet} e CTC_{pH=7} (Tabela 6).

Tabela 6. Análise de componentes principais (ACP) das variáveis do solo (camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

Componente da variância	Camada 0-0,10 m (Figura 2a)		Camada 0,10-0,20 m (Figura 2b)	
	CP1	CP2	CP1	CP2
Variáveis da ACP	Cargas fatoriais das componentes principais			
RT 8	0,98	0,12	0,46	0,84
RT 12,5	0,50	0,03	-0,17	0,95
RP100	-0,71	0,68	0,90	0,21
Argila	0,42	-0,82	-0,93	0,20
DS	-0,91	0,22	0,87	-0,10
Macro	0,98	-0,03	-0,81	-0,05
C	0,88	0,25	-0,24	0,56
SB	-0,14	0,92	0,95	0,07
CTC _{efet.}	0,15	0,96	0,74	0,62
CTC _{pH=7}	0,38	0,89	-0,06	-0,12

RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP100: resistência à penetração a amostra retida a tensão de 100 kPa, DS: densidade do solo, distribuição na escala usual: macroporos (macro: diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$), C: carbono do solo, SB: soma de bases, CTC_{efet.}: CTC efetiva do solo, CTC_{pH=7}: CTC do solo a pH=7.

Observa-se, na Figura 2a, referente à camada 0-0,10 m, que as áreas apresentaram separações distintas pela ACP. A capoeira, área com a qual se busca uma aproximação das áreas revegetadas pelas leguminosas arbóreas, se posicionou no quadrante inferior direito e ficou isolada das demais áreas, mais relacionada com a CP1, sendo as variáveis que mais contribuíram para essa distinção a macroporosidade, o carbono e a resistência tênsil (RT 8). No quadrante inferior esquerdo posicionou-se a área do pasto, relacionada com a CP2 e não associada a nenhuma variável específica. Em uma diagonal intermediária à capoeira e ao pasto ficaram as áreas das leguminosas, sendo que a acácia e sabiá tiveram sua posição no quadrante superior esquerdo influenciada pela CP2, associado à SB e RP100, enquanto o ingá posicionou-se no quadrante inferior direito, também afetado pela CP2, sob influência da argila.

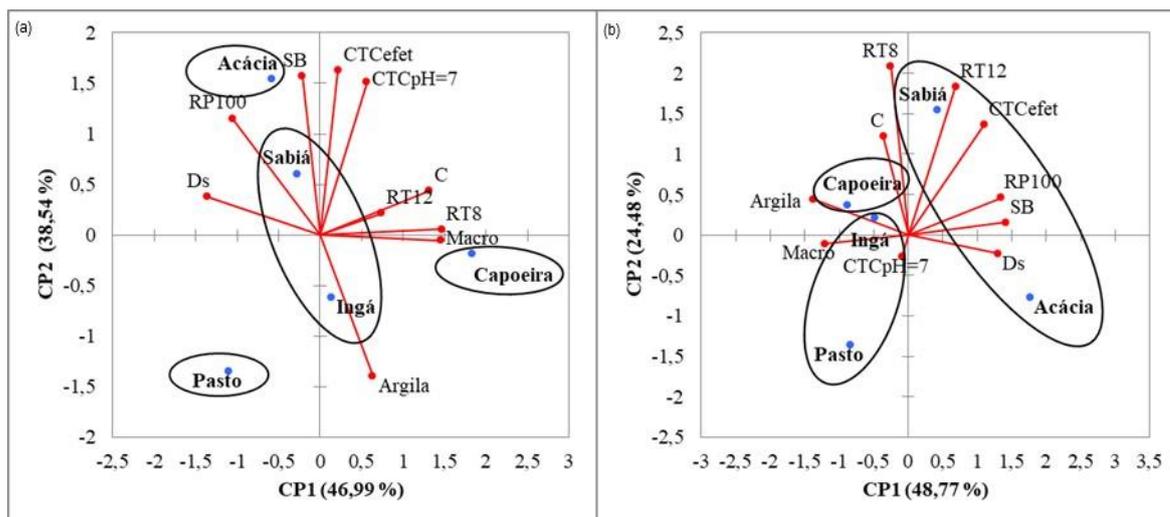


Figura 2. Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais dos atributos físicos e químicos, elipses criadas de acordo com a análise de agrupamento pelo método de Tocher. (a) camada 0-0,10 m, (b) camada 0,10-0,20 m, RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP100: resistência à penetração de 100 kPa, DS: densidade do solo, Macro: macroporosidade do solo, C: carbono do solo, SB: soma de bases, CTCefet.: CTC efetiva, CTC_{pH=7}: CTC a pH=7 no solo.

Os mesmos atributos do solo foram utilizados para a análise pelo método de Tocher e permitiu a formação de quatro grupos, representados na Figura 2a pelas elipses, sendo três deles representados por coberturas isoladas e afastadas entre si (capoeira, pasto e acácia) e o quarto, em posição central aos demais, formado pelo ingá e sabiá. A separação ocorreu de forma praticamente equitativa entre as variáveis, com a argila contribuindo com 13,38% para a distinção (maior valor), seguida da CTC_{pH=7}, com contribuição de 12,00%, e das demais variáveis, com contribuições entre 8,48% e 10,61%.

A análise pelo método de Tocher confirmou, em parte, a distinção das áreas pela ACP, e também a observada na análise de variância, evidenciando a separação da capoeira e pasto, com as demais áreas ocupando posição intermediária. A variação dos atributos do solo na vegetação nativa é muito menor quando se compara com solos manejados e, por isso, é usada como referencial para avaliação de solos onde se busca manejá-lo de forma conservacionista.

Gama-Rodrigues et al. (2008), estudando os atributos microbianos do solo nessas mesmas áreas, em amostras coletadas na camada do solo de 0-0,10 m com 2 anos e 8 meses após sua implantação, verificaram, por meio do método de Tocher, que as áreas foram distribuídas em dois grupos: o primeiro formado pela acácia, sabiá, eucalipto e capoeira e o segundo pelo pasto. Esse agrupamento das áreas revegetadas com a capoeira revela que, mesmo com reduzido tempo de

implantação do sistema, os atributos microbianos do solo foram capazes de se aproximar da área de referência, ao contrário do ocorrido nos atributos físicos do presente estudo. Estes resultados sugerem que, em curto prazo, os atributos microbianos são mais responsivos ao manejo imposto ao solo, o que decorre da elevada capacidade de reprodução dos microrganismos quando se incrementa a MOS, até que se tenha a estabilização do material aportado sobre o solo. O contraste desses resultados com os do presente trabalho confirma a hipótese de que a qualidade física do solo, quando perdida, é mais difícil de recuperar, devido à complexidade do arranjo das partículas e suas ligações com a matéria orgânica do solo (Imhoff et al., 2002).

Na ACP realizada para a camada 0,10-0,20 m do solo (Figura 2b) verificou-se um padrão de distribuição um pouco diferente dos resultados da camada 0-0,10 m. Nesse caso as duas componentes principais explicaram 73,25% da variação total dos sistemas, tendo a CP1 explicado 48,8% e a CP2 24,5% dessa variabilidade total (Figura 2b). As variáveis RP100, Argila, DS, Macro, SB e CTC_{efet} estiveram correlacionadas com a CP1, enquanto RT 12,5, RT 8 e C correlacionaram-se com a CP2 (Tabela 6).

A área da capoeira, assim como o ingá, posicionou-se no quadrante superior esquerdo, correlacionada ao CP1, sob influência das variáveis argila e macroporosidade. O pasto se posicionou no quadrante inferior esquerdo, correlacionada ao CP2, porém sem associação a uma variável específica. A acácia posicionou-se no quadrante inferior direito, mais correlacionado com a CP2 e sob influência maior da DS. A área do sabiá, mais correlacionada com a CP2 e sob influência da resitência tênsil e da CTC_{efet}, posicionou-se no quadrante superior direito.

Diferente do ocorrido para 0-0,10 m, a análise dos dados da camada 0,10-0,20 m pelo método de Tocher permitiu a separação de três grupos, sendo o primeiro formado pela capoeira, o segundo pelo pasto e ingá, e o terceiro pela acácia e sabiá. A contribuição de cada variável utilizada para a formação dos grupos também foi praticamente equitativa, com a RP100 contribuindo com 14,85% (maior valor), seguida da RT 8 e C (com aproximadamente 11,36%) e das demais variáveis (com valores entre 8,3% e 10,06% de contribuição).

Também para a camada 0,10-0,20 m a dispersão gráfica dos sistemas estudados em relação aos eixos da ACP confirmou parcialmente que os grupos

formados pelo método de Tocher e também as diferenças identificadas pela análise de variância dos resultados de resistência tênsil e à penetração. Dentro do grupo 2 há uma dissimilaridade das áreas, sendo que o pasto ficou na posição oposta ao ingá, que está mais próximo da capoeira. Mudanças na cobertura vegetal promovem alterações no material orgânico depositado e sua taxa de decomposição, o que pode levar as mudanças nos atributos do solo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Li et al., 2015). Além disso, é reconhecido que as pastagens apresentam elevado aporte de resíduos, principalmente raízes, com volume e extensão lateral significativos no horizonte superficial, o que pode promover variações nos atributos químicos do solo (Orgill et al., 2015). Guidolini (2015), estudando os atributos físicos e químicos de um Argissolo sob diferentes sistemas de uso da terra, verificaram que a área da mata apresentou evidente dissimilaridade das demais áreas, devido tanto ao intenso aporte de matéria orgânica quanto à diversidade de suas formas químicas (lábeis e recalcitrantes).

Gama-Rodrigues et al. (2008) também encontraram resultados diferentes aos deste estudo para os atributos químicos do solo na análise pelo método de Tocher. Os referidos autores relatam que as áreas dividiram em dois grupos: o primeiro, formado pelo sabiá, pasto, eucalipto e acácia; e o segundo, pela capoeira. No grupo 1 é mencionado que a área da acácia apresenta uma dissimilaridade das demais do mesmo grupo. A recuperação química do solo também demonstra ser um processo lento, assim como a recuperação física, considerando o solo sob a capoeira como referência.

Trabalhando no mesmo sítio experimental do presente estudo, Costa et al. (2014) concluíram que a área da acácia proporciona maior proteção ao solo e a área do sabiá maior disponibilidade de nutrientes. Essa dinâmica de influência do componente arbóreo sobre o solo acarretou, no presente trabalho, a dispersão gráfica dessas duas áreas, no grupo 3 formado pela análise de Tocher. Vale ressaltar que as diferenças das cargas fatoriais do carbono nas duas ACP foram possivelmente consequência da quantidade de C na camada 0-0,10 m ser 25% maior que na camada 0,10-0,20 m (Gomes et al., 2018). Na camada 0-0,10 m, onde há maior influência da serapilheira, o valor foi de 0,88 associado a CP1, onde a explicação dos dados é maior. Já na camada 0,10-0,20 m o valor foi de 0,56 associado a CP2, talvez porque essa camada, sendo mais afastada da superfície,

possua menor taxa de renovação das raízes e de entrada de serapilheira facilmente decomponível, resultando em menores teores de C.

Resistência tênsil de agregados e resistência do solo à penetração no horizonte subsuperficial Bt

Na Tabela 7 são apresentados os resultados de resistência tênsil dos agregados retidos nas peneiras de malha 12,5 mm (RT 12,5) e 8 mm (RT 8) e, também, de resistência do solo à penetração sob as tensões da água 33, 100, 500 e 1500 kPa (RP33, RP100, RP500 e RP1500, respectivamente), obtidos para as camadas 0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m, 0,60-0,80 m e 0,80-1,00 m de profundidade.

Tabela 7. Resistência tênsil de agregados (RT) e resistência do solo à penetração sob as tensões da água 33, 100, 500 e 1500 kPa (RP33, RP100, RP500 e RP1500, respectivamente), para as diferentes coberturas vegetais e camadas de solo estudadas, em Conceição de Macabú - RJ.

Cobertura Vegetal	RT 8 -----(kPa)-----	RT 12,5 -----	RP33 -----	RP100 ----- (MPa) -----	RP500 -----	RP1500 -----
0,20 – 0,40 m						
Capoeira	29,00	69,07	3,72	3,43	3,69	7,31
Pasto	16,70	28,00	0,20	0,69	0,40	1,57
Acácia	22,30	50,93	5,49	4,80	8,98	7,43
Ingá	16,55	46,72	3,64	2,71	6,68	7,63
Sabiá	21,75	40,29	3,77	0,76	9,54	7,69
0,40 – 0,60 m						
Capoeira	12,50	34,37	1,45	2,08	3,36	5,90
Pasto	10,09	29,58	0,33	1,23	1,24	3,06
Acácia	19,66	27,94	2,70	4,37	6,21	4,21
Ingá	15,03	27,37	1,17	2,89	3,22	5,02
Sabiá	19,07	32,15	4,25	5,07	7,64	9,93
0,60 – 0,80 m						
Capoeira	17,75	18,71	1,57	1,26	3,21	4,38
Pasto	8,14	16,59	0,83	1,26	1,80	2,08
Acácia	14,78	26,62	2,35	0,96	5,47	4,56
Ingá	10,13	20,90	0,51	2,40	2,74	6,67
Sabiá	11,38	22,04	2,66	2,72	5,64	7,39
0,80 – 1,00 m						
Capoeira	12,75	18,44	2,26	1,54	3,42	3,65
Pasto	7,75	26,90	0,48	0,79	2,61	3,85
Acácia	10,00	25,02	2,08	1,27	6,16	6,42
Ingá	9,86	18,71	1,27	1,06	4,06	5,05
Sabiá	18,29	31,87	0,41	2,52	4,13	8,33

Com relação à resistência tênsil verifica-se, para ambos os tamanhos de agregado, que os valores foram decrescentes em profundidade, com as médias de RT 8 e RT 12,5 das cinco coberturas vegetais variando, respectivamente, de 21,3 e 47,0 kPa, na camada 0,20-0,40 m, para 11,7 e 24,2 kPa na camada 0,80-1,00 m. Comparando a magnitude desses valores observados no horizonte subsuperficial Bt (Tabela 7) à dos valores do horizonte superficial A (Tabela 3), verifica-se que os valores de RT 8 no horizonte Bt (média geral de 15,2 kPa) foram muito menores que no horizonte A (média geral de 41,7 kPa indicando redução de 63,5%), ao passo que os valores de RT 12,5 foram apenas um pouco menores no Bt (média geral de 30,6 kPa) que no A (média geral de 34,7 kPa indicando 11,8% de redução). Além disso, enquanto os valores observados para RT 8 no horizonte Bt foram sempre menores que os do horizonte A (Tabela 3), para RT 12,5 os valores na camada 0,20-0,40 m do horizonte Bt superaram os do horizonte A, sendo inferiores a eles somente nas camadas mais profundas, abaixo de 0,60 m. Outro aspecto que pode ser observado é que a relação entre os valores de RT 8 e RT 12,5 no horizonte Bt sofreu uma completa inversão em relação ao comportamento verificado nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade do horizonte superficial A (Tabela 3). Enquanto no horizonte A a RT 8 teve média geral 26,32% superior à da RT 12,5 (47,1 e 34,7 kPa, respectivamente), para o horizonte Bt a média geral da RT 12,5 foi superior em 48,67% à da RT 8 (30,61 e 15,71 kPa, respectivamente).

A despeito do conjunto de dados do horizonte Bt não permitir a realização da análise de variância e a comparação de médias, uma vez que esses foram obtidos sem repetições nas camadas, algumas inferências podem ser feitas em relação às coberturas. Para a RT 8, tal qual nas camadas do horizonte superficial, a área do pasto permanece com os menores valores em todas as camadas subsuperficiais, enquanto as áreas das leguminosas e da capoeira revezam-se quanto aos maiores valores nas camadas. Quanto à RT 12,5 a área do pasto tem destaque pelo valor baixo somente na camada 0,20-0,40 m, apresentando, nas demais camadas, valor similar ao das outras coberturas vegetais, as quais se revezam em relação aos maiores valores nas camadas.

Tabela 8. Atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	Areia	Silte	Argila	DS	PT	Macro	Micro
	-----(g kg^{-1})-----			Mg m^{-3}	----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----		
0,20-0,40 m							
Capoeira	443,0	143,2	413,7	1,38	0,48	0,17	0,31
Pasto	490,3	156,9	352,8	1,18	0,55	0,35	0,20
Acácia	383,4	135,7	480,9	1,47	0,44	0,16	0,28
Ingá	364,3	157,7	478,0	1,32	0,50	0,20	0,30
Sabiá	395,2	151,8	453,0	1,35	0,49	0,19	0,30
0,40-0,60 m							
Capoeira	418,7	134,2	447,1	1,29	0,51	0,21	0,30
Pasto	434,3	154,4	411,3	1,13	0,57	0,34	0,23
Acácia	359,9	129,3	510,7	1,36	0,49	0,16	0,32
Ingá	377,8	150,4	471,8	1,19	0,55	0,25	0,30
Sabiá	368,7	149,7	481,7	1,37	0,48	0,13	0,35
0,60-0,80 m							
Capoeira	391,6	138,6	469,7	1,20	0,54	0,24	0,30
Pasto	430,8	145,3	423,9	1,10	0,58	0,31	0,27
Acácia	406,7	129,2	464,0	1,19	0,55	0,23	0,32
Ingá	394,2	159,5	446,4	1,16	0,56	0,24	0,32
Sabiá	381,4	142,1	476,4	1,26	0,52	0,20	0,32
0,80-1,00 m							
Capoeira	398,8	128,1	473,1	1,22	0,53	0,22	0,31
Pasto	411,2	148,5	440,2	1,13	0,57	0,28	0,29
Acácia	428,3	132,0	439,7	1,24	0,53	0,17	0,35
Ingá	381,5	150,7	467,8	1,21	0,54	0,21	0,33
Sabiá	385,7	146,4	467,8	1,22	0,53	0,20	0,33

A resistência à penetração mostrou, para as quatro tensões de água avaliadas, valores decrescentes em profundidade (Tabela 7), similarmente ao que foi descrito para a resistência tênsil. Diferente da resistência tênsil, no entanto, os valores de RP no horizonte Bt, principalmente na camada 0,20-0,40 m, não foram menores, mas sim superiores, aos observados no horizonte A (Tabela 3). Em relação às coberturas vegetais, e a despeito de se tratar de dados sem repetição e que impedem a diferenciação estatística entre as mesmas, o pasto apresentou os menores valores, atingindo o limite crítico de 3,0 MPa somente na tensão equivalente ao ponto de murcha permanente (RP1500), em dois casos (camadas 0,40-0,60 m e 0,80-1,00 m de profundidade). Nas demais coberturas, inclusive na capoeira, a frequência de ocorrência de valores acima de 3,0 MPa foi de 62,5% (40 vezes, entre 64 possíveis), concentrando-se nas tensões mais elevadas (500 e 1500 kPa). Este pico de resistência mecânica, tanto tênsil quanto à penetração, no topo do horizonte Bt é compatível com o esperado para a classe Argissolo e com os atributos do perfil de solo apresentados, tanto morfológicos (consistência do solo

seco “dura” - Tabela 4) quanto físicos (maiores densidades e menores porosidades - Tabela 2 e Tabela 8).

Tabela 9. Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	pH (H ₂ O)	P (mg kg ⁻¹)	C ---(g kg ⁻¹)---	N	Al	H + Al	SB	CTC _{efet}	CTC _{pH=7}
0,20-0,40 m									
Capoeira	4,54	0,60	8,14	0,79	1,5	6,27	0,64	2,14	6,91
Pasto	4,81	0,60	6,66	0,60	0,9	4,29	0,55	1,45	4,84
Acácia	4,54	0,60	6,54	0,78	1,0	4,29	1,39	2,39	5,68
Ingá	4,80	0,60	6,40	0,67	1,0	4,79	0,73	1,73	5,51
Sabiá	4,78	0,40	6,22	0,67	1,0	3,63	0,88	1,88	4,51
0,40-0,60 m									
Capoeira	4,57	0,40	6,60	0,44	1,3	6,11	0,60	1,90	6,70
Pasto	4,70	0,60	6,32	0,38	0,9	4,29	0,37	1,27	4,66
Acácia	4,48	0,60	6,16	0,70	1,1	4,62	1,15	2,25	5,77
Ingá	4,78	0,40	6,06	0,59	1,1	4,13	0,52	1,62	4,65
Sabiá	4,73	0,40	6,10	0,64	1,1	4,46	0,95	2,05	5,41
0,60-0,80 m									
Capoeira	4,72	0,40	5,06	0,34	1,2	5,94	0,54	1,74	6,48
Pasto	4,71	0,40	4,94	0,43	0,8	3,80	0,64	1,44	4,44
Acácia	4,39	0,60	5,50	0,56	1,3	4,13	0,73	2,03	4,86
Ingá	4,95	0,60	4,68	0,43	1,1	4,29	0,51	1,61	4,80
Sabiá	4,71	0,60	5,26	0,64	1,2	4,46	0,75	1,95	5,21
0,80-1,00 m									
Capoeira	4,62	0,80	4,30	0,38	1,2	3,96	0,55	1,75	4,51
Pasto	4,84	0,20	4,48	0,32	0,6	3,80	0,55	1,15	4,34
Acácia	4,37	0,60	4,40	0,56	1,3	3,96	0,83	2,13	4,79
Ingá	4,96	0,60	4,24	0,35	1,0	3,96	0,53	1,53	4,49
Sabiá	4,72	0,40	3,36	0,50	1,2	3,80	0,73	1,93	4,53

Similarmente ao que foi feito para o horizonte A, os dados de resistência mecânica do horizonte Bt (Tabela 7) foram submetidos à análise de correlação linear com atributos físicos (Tabela 8) e químicos (Tabela 9) do solo. Na Tabela 10 são apresentados os resultados dessa análise, obtidos para o conjunto dos dados das quatro camadas que compõem o horizonte Bt (0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m, 0,60-0,80 m e 0,80-1,00 m de profundidade). Para essas camadas mais profundas do solo a suposição de que as correlações da RT seriam positivas com a DS do solo e negativas com a porosidade total foram atendidas, diferente do ocorrido para as camadas do horizonte A. Em relação à resistência à penetração, os coeficientes de correlação também se comportaram conforme esperado, sendo positivos com a densidade e negativos com a porosidade total, tal como havia ocorrido para os dados do horizonte A (Tabela 5).

Tabela 10. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre resistência tênsil de agregados (RT), resistência do solo à penetração sob as tensões da água 33, 100, 500 e 1500 kPa (RP33, RP100, RP500 e RP1500, respectivamente) e os atributos químicos e físicos do solo nas camadas 0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m, 0,60-0,80 m e 0,80-1,00 m, em Conceição de Macabú, RJ.

	RT 12,5	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau Floc.	DS	PT	Macro1.	Micro1.	Macrop2.	Mesop.	Microp2.	Cripto.
RT 8	0,78**				0,51*	-0,47*	0,77**	-0,77**	-0,51*			-0,62**	-0,52*	0,44*
RT 12,5					0,52*		0,70**	-0,70**				-0,55*	-0,51*	
RP33				0,46*			0,90**	-0,90**	-0,76**		-0,70**	-0,61**		0,66**
RP100				0,52*			0,72**	-0,72**	-0,65**		-0,61**			0,55*
RP500		-0,60**		0,62**			0,79**	-0,79**	-0,81**	0,53*	-0,78**			0,73**
RP1500		-0,54*		0,48*			0,66**	-0,66**	-0,81**	0,66**	-0,83**			0,76**
	C	N	P	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	CTC _{efet}	V%	m%		
RT 8	0,61**	0,75**			0,44*				0,53*	0,64**				
RT 12,5	0,72**	0,71**								0,45*				
RP33	0,47*	0,75**					0,56**		0,79**	0,75**	0,62**		-0,51*	
RP100		0,63**					0,57**		0,51*	0,64**			-0,52*	
RP500		0,62**					0,63**		0,90**	0,72**	0,79**		-0,62**	
RP1500		0,49*							0,61*	0,59**				

* e ** significativos ($p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente). Coeficientes não significativos não foram apresentados na tabela. RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP10: resistência à penetração de 10 kPa, RP33: resistência à penetração de 33 kPa, RP100: resistência à penetração de 100 kPa, RP500: resistência à penetração de 500 kPa, RP1500: resistência à penetração de 1500 kPa, Arg.Disp: argila dispersa, Grau floc.: grau de flocculação, DS: densidade do solo, distribuição na escala usual: macroporos (macro: diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos (micro: diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$); distribuição na escala detalhada: macroporos (macrop2: diâmetro $\geq 100 \mu\text{m}$), mesoporos (mesop: $100 \mu\text{m} \geq$ diâmetro $\geq 30 \mu\text{m}$), microporos (micro2: $30 \mu\text{m} \geq$ diâmetro $\geq 0,2 \mu\text{m}$) e criptoporos (cripto: diâmetro $\leq 0,2 \mu\text{m}$), C: carbono do solo, P: fósforo, pH: acidez do solo, Al: alumínio, H+Al: hidrogênio mais alumínio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, K: potássio, CTC_{efet}: CTC efetiva, V%: saturação por base, m%: saturação por alumínio.

Análise de componentes principais e de agrupamentos pelo método de Tocher para o horizonte subsuperficial Bt

A análise de componentes principais (ACP) realizada a partir dos mesmos atributos físicos e químicos considerados para o horizonte superficial permitiu, também para o horizonte subsuperficial, usando a média das quatro camadas, explicar grande parte da variação total verificada entre as áreas sob capoeira, pasto e leguminosas arbóreas. Nessa ACP verificou-se que 79,92% da variação total estiveram associadas aos dois primeiros componentes principais (Figura 3), com o componente principal 1 (CP1) explicando 52,6% da dissimilaridade entre os sistemas, sob forte influência dos atributos RT 8, RP100, Argila, DS, Macroporosidade e CTC_{efet} (Tabela 11), e o componente principal 2 (CP2) explicando 27,4% da variação, tendo como atributos mais relevantes RT 12,5, C e CTC_{pH=7} (Tabela 11).

Tabela 11. Análise de componentes principais (ACP) das variáveis do horizonte subsuperficial solo (média de quatro camadas) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

Componente da variância	CP1	CP2
Variáveis da ACP	Cargas fatoriais das componentes principais	
RT 8	0,75	0,52
RT 12,5	0,67	0,71
RP100	0,91	-0,03
Argila	0,94	-0,05
DS	0,83	0,28
Macro	-0,94	-0,14
C	-0,28	0,95
SB	0,46	-0,07
CTC _{efet.}	0,72	0,31
CTC _{pH=7}	0,36	0,93

RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP100: resistência à penetração a amostra retida a tensão de 100 kPa, DS: densidade do solo, distribuição na escala usual: macroporos (macro: diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$), C: carbono do solo, SB: soma de bases, CTC_{efet.}: CTC efetiva do solo, CTC_{pH=7}: CTC do solo a pH=7.

Em relação à distinção das áreas pela ACP, observa-se que as áreas capoeira e acácia se posicionaram no quadrante superior direito, mais relacionadas com a CP2, tendo as variáveis CTC_{pH=7}, RT 12,5 e C como as que mais contribuíram para esta distinção. No quadrante oposto a elas (inferior esquerdo) ficou a área do pasto, isolada das demais, relacionada com a CP1 e sendo a variável Macro a que mais contribuiu para essa distinção. No quadrante inferior

direito ficaram as áreas do ingá e sabiá, relacionadas ao CP1 e tendo como principais variáveis para essa dissimilaridade RP100, argila e SB.

Pela análise pelo método de Tocher os mesmos atributos do solo permitiram formar dois grupos, representados na Figura 3 pelas elipses, sendo um deles composto pelas coberturas capoeira, acácia, ingá e sabiá e outro pelo pasto, confirmando em parte a distinção das áreas com base na ACP. A separação das áreas ocorreu com contribuições praticamente equitativas das variáveis, com a RT 8 contribuindo com 11,86% (maior valor), seguida da SB, com 11,25%, e as demais variáveis, com contribuições entre 10,21% e 8,91%.

Para o horizonte subsuperficial Bt nota-se que a distribuição dos grupos confirmou a hipótese do presente trabalho, onde as áreas revegetadas agruparam-se com a capoeira e o pasto fica isolado. Esse efeito pode ser decorrente do sistema radicular das leguminosas arbóreas, que são semelhantes ao da capoeira e que, com passar dos anos, reduzem o efeito residual da vegetação anterior ao plantio das leguminosas arbóreas, que era uma pastagem.

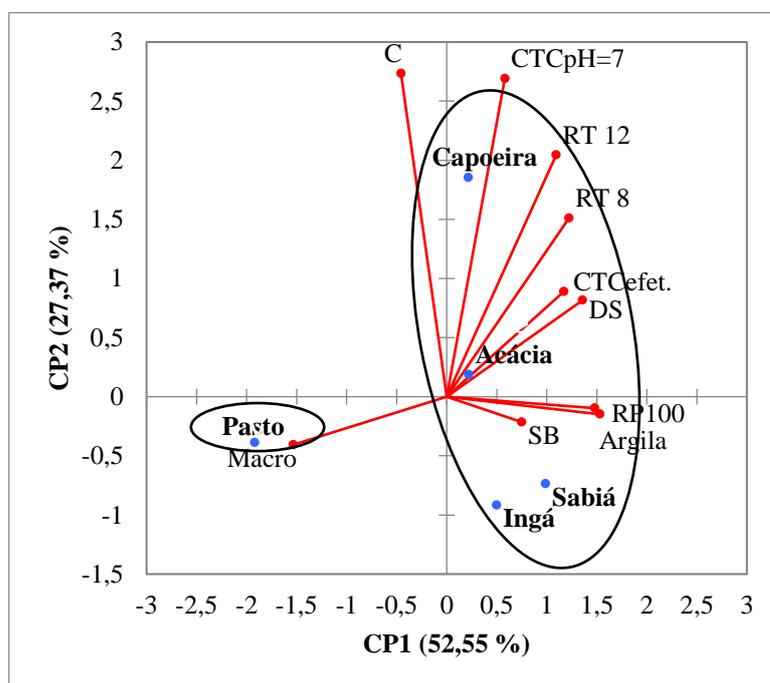


Figura 3. Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais dos atributos físicos e químicos, elipses criadas de acordo com a análise de agrupamento pelo método de Tocher. (a) camada 0-0,10 m, (b) camada 0,10-0,20 m, RT 8: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 8 mm, RT 12,5: resistência tênsil em agregados retidos na peneira de 12,5 mm, RP100: resistência à penetração de 100 kPa, DS: densidade do solo, Macro: macroporosidade do solo, C: carbono do solo, SB: soma de bases, CTCefet.: CTC efetiva, CTC_{pH=7}: CTC a pH=7 no solo.

CONCLUSÕES

As áreas revegetadas pelas leguminosas arbóreas alteram a condição física do solo em todas as profundidades estudadas. A pastagem apresentou os menores valores de RT dos agregados, o que pode levar a uma perda de agregação, tornando essa área mais susceptível a alterações estruturais.

Nas camadas superficiais os agregados de menor diâmetro apresentam maior resistência tênsil, enquanto nas subsuperficiais (horizonte Bt) há uma inversão de comportamento, com agregados maiores tendo uma maior RT.

Em relação a resistência a penetração nas camadas superficiais a área da acácia apresentou, em todas as tensões de água, valores críticos a penetração de raízes, enquanto a capoeira apresentou valores de RP sempre baixos. Para o horizonte Bt a acácia, sabiá e capoeira apresentam valores críticos ao crescimento de raízes em quase todas as tensões de água.

Para as camadas superficiais onde o efeito da serapilheira é maior e as modificações nos atributos dos solos é mais pronunciado, a dispersão gráfica dos sistemas estudados pela análise de componentes principais, confirmada, em parte, pelos grupos formados no método de Tocher, usando os atributos físicos e químicos do solo, deixou evidente a distinção da capoeira das demais áreas. Para o horizonte Bt a ACP e Tocher permitiram verificar que as áreas revegetadas se distinguiram do pasto e se agrupam com a capoeira, revelando efeito positivo das leguminosas sobre os atributos do solo em profundidade em avaliações de longa duração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bronick, C.J.; Lal, R. (2005) Soil structure and management: A review. *Geoderma*, v.124, p.3-22.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* v.12, p.37-51.
- Costa, M.G.; Gama-Rodrigues, A.C.; Zaia, F.C.; Gama-Rodrigues, E.F. (2014) Leguminosas arbóreas para recuperação de áreas degradadas com pastagem em Conceição de Macabu, Rio de Janeiro, Brasil. *Sci. For.* v.42, p.101-112.

- Couto, W.H.; Anjos, L.H.C.; Wadt, P.G.S.; Pereira, M.G. (2016) Atributos edáficos e resistência à penetração em áreas de sistemas agroflorestais no sudoeste amazônico. *Ciência Florestal*, v.26, p.811-823.
- Cruz, C.D.; Regazzi, A.J.; Carneiro, P.C.S. (2004) Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. vol. 1 ed. Universidade Federal de Viçosa.
- Dexter, A.R.; Watts, C. (2000) Tensile strength and friability. In: Smith K, Mullins C. eds. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York: Marcel Dekker.
- Dexter, A.R. (1988) Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* v.11, p.199-238.
- Dexter, A.R.; Kroesbergen, B. (1985) Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.* v.31, p.139-147.
- Doran, J.W.; Parkin, T.B. (1994) Quantitative indications of soil quality: a minimum data set. In: Doran JW, Jones AJ. eds *Methods for assessing soil quality*. Madison: SSSA. ed.49, p.25-37.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. Brasília: Embrapa 353p.
- Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Paulino, G.M.; Franco, A.A. (2008) Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do Estado do Rio de Janeiro. *R. Bras. Ci. Solo.* v.32, p.1521-1530.
- Gomes, D.S.; Marciano, C.R.; Faustino, L.L. (2018) Physical quality of a Typic Hapludult soil under forest leguminous trees and pasture. *Floresta e Ambiente*, v.25, p.xx-xx.
- Grant, C.D.; Dexter, A.R.; Huang C. (1990) Roughness of soil fracture surfaces as a measure of soil microstructure. *J. Soil Sci.* v.41, p.95–110.
- Guérif, J. (1994) Effects of compaction on soil strength parameters. In: Soane, B.D.; Van, O. C. (Ed.) *Soil compaction in crop production*. Elsevier science, chapter 9, p. 191-213.

- Guidolini, J.F. (2015) Atributos físicos e químicos de um Argissolo sob diferentes sistemas de uso da terra (SUTs). Dissertação: Jaboticabal-SP, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP.
- Guimarães, R.M.L.; Tormena, C.A.; Alvez, S.J.; Fidalski, J.; Blainski, E. (2009) Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Sci. Agric.*, v.66, p.499-505.
- Imhoff, S.; Pires da Silva, A.; Dexter, A. (2002) Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.66, p.1656-1661.
- Lehrsch, G.A.; Sojka, R.E.; Koehn, A.C. (2012) Surfactant effects on soil aggregate tensile strength. *Geoderma*, v.189, p.199–206.
- Libardi, P.L. (2010) Água no solo. In: Jong Van Lier, Q. (Org.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.103-152.
- Lipiec, J.; Hatano, R. (2003) Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, v.116, p.107-136.
- Lopes, P.G.N. (2017) Atributos hidrodinâmicos e hidrofobicidade em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob mata atlântica secundária, pastagem degradada e leguminosas arbóreas. Dissertação: Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF.
- Mielniczuk, J. (2008) Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: Santos, G.A.; Silva, L.S.; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole.
- Orgill, S.E.; Spoljaric, N.; Kelly, G. (2015) Soil carbon under perennial pastures; benchmarking the influence of pasture age and management. *Soil Change Matters*, v.25, p.1-4.
- Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Braidá, J.A. (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, v.27, p.29-48.
- Reis, D.A.; Lima, C.L.R.; Pauletto, E.A. (2014) Resistência tênsil de agregados e compressibilidade de um solo construído com plantas de cobertura em área de mineração de carvão em Candiota, RS. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.38, p.669-678.

- Sağlam, M.; Dengiz, O. (2017) Spatial variability of soil penetration resistance in an alluvial delta plain under different land uses in middle Black Sea Region of Turkey. *Archives of Agronomy and Soil Science.*, v.63, p.60-73.
- Salton, J.C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Boeni, M.; Conceição, P.C.; Fabrício, A.C.; Macedo, M.C.M.; Broch, D.L. (2008) Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.11-21.
- Santos, R.D.; Lemos, R.C.; Santos, H.G.; Ker, J.C.; Anjos, L.H.C.; Shimizu, S.H. (2013) Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6.ed. Viçosa, SBCS.
- Tormena, C.A.; Araújo, M.A.; Fidalski, J.; Imhoff, S.; Silva, A.P. (2008b) Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.943-952.
- Tormena, C.A.; Fidalski, J.; Rossi Junior, W. (2008a) Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.33-42.
- Tótola, M.R.; Chaer, G.M. (2002) Microorganismos e processos microbiológicos como indicadores de qualidade dos solos. In: Novais, R.F. ed. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2, 692p.
- Valicheski, R.R.; Grossklaus, F.; Sturmer, S.L.k.; Tramontin, A.L.; Baade, E.S.A.S. (2012) Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.16, p.969–977.
- Watts, C.W.; Dexter, A.R. (1998) Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.*, v.49, p.73–84.
- Wendling, B.; Vinhal-Freitas, I.C.; Oliveira, R.C.; Babata, M.M.; Borges, E.N. (2012) Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do Cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Biosci. J.*, v.28, p.256-265.

3.2. Intervalo hídrico ótimo e densidades críticas de um solo sob Mata Atlântica, leguminosas arbóreas e pastagem

RESUMO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador de qualidade física do solo para o crescimento de plantas determinado não só pela disponibilidade de água, mas também pela aeração e resistência que o solo oferece à penetração das raízes. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência da revegetação com as leguminosas arbóreas acácia, ingá e sabiá para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo inicialmente sob pastagem degradada, utilizando como indicador o intervalo hídrico ótimo (IHO) e as densidades críticas dele decorrentes. A área, localizada em Conceição de Macabú, RJ, constitui-se de cinco coberturas vegetais. Dessas, três foram plantios puros das leguminosas arbóreas acácia, sábia, e ingá, implantadas em 1998 em parcelas de 1,500 m². As outras, utilizadas como referência e adjacentes aos plantios de leguminosas, foram uma pastagem degradada e um fragmento florestal de Mata Atlântica. Amostras de solo, coletadas em anéis volumétricos nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, foram utilizadas para a obtenção da curva de retenção de água, da curva de resistência à penetração e do IHO em função da densidade. Em nenhuma área ou camada foi verificada restrições à aeração do solo. Por outro lado, valores de RP superiores ao limite crítico de 3,0 MPa foram verificados em grande parte dos casos, fazendo com que o IHO fosse menor que a água disponível. O IHO mostrou-se mais sensível que a AD para avaliar as variações físicas e estruturais do solo impostas pelas coberturas vegetais distintas.

Palavras-chave: revegetação, recuperação de áreas degradadas, compactação do solo, resistência do solo à penetração, aeração do solo.

ABSTRACT

Least limiting water range and critical densities of a soil under the Atlantic Forest, tree legumes and pasture

The Least Limiting Water Range (LLWR) is an indicator of soil physical quality for plant growth determined not only by the availability of water, but also by aeration and soil resistance to root penetration. The objective of this work was to evaluate the LLWR and the critical values of bulk density of a Typic Hapludult soil under the Atlantic Forest, degraded pasture and revegetation with tree legumes. The area, located in Conceição de Macabu, RJ, is constituted of five vegetation coverages. Of these, three were pure plantations of the *Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpinifolia* e *Inga spp* tree legumes, implanted in 1998 in plots of 1,500 m². The others, used as reference and adjacent to the legume plantations, were a degraded pasture and a forest fragment of Atlantic Forest. Soil samples, collected in volumetric rings in the 0-0.10 and 0.10-0,20 m depth layers, were used to obtain the water retention curve, penetration resistance curve and LLWR as a function of density. In no area or layer has been verified restrictions to soil aeration. On the other hand, RP values above the critical limit of 3.0 MPa were verified in most cases, making the LLWR smaller than the field capacity. The LLWR IHO showed to be more sensitive than AD to evaluate the physical and structural variations of the soil imposed by the different vegetation cover.

Keywords: revegetation, recovery of degraded areas, soil compaction, soil resistance to penetration, soil aeration.

INTRODUÇÃO

Os solos da região Norte Fluminense foram muito exauridos pela exploração agropecuária, o que pode ser evidenciado pela grande degradação física e perda da fertilidade em comparação aos solos de áreas sob vegetação nativa. Isso ocorreu devido ao cultivo de cana-de-açúcar com o uso de queimadas, ao cultivo do café em encostas íngremes e à pecuária com pastagens mal manejadas (Gama-Rodrigues et al., 2008), configurando um modelo intensivo-extrativista de produção

agropecuária. A perda da qualidade física do solo é um processo gradual que se inicia com a deterioração da estrutura do solo e termina com a perda diferencial de partículas por meio da erosão (Omuto, 2008), sendo agravada pelo processo de compactação (Reichert et al., 2007).

A compactação do solo decorre da aplicação de cargas externas (pisoteio, tráfego de máquinas, ação mecânica de implementos, etc.) que leva à redução do volume e conseqüente aumento da densidade do solo (D_s), o que se dá pela aproximação entre partículas e redução do espaço poroso total (Reichert et al., 2007). Essa redução da porosidade total (PT) ocorre pela conversão de poros de maior diâmetro em poros de menor diâmetro, de modo que o volume final desses poros torna-se menor que o inicial (Dias et al., 2016).

Em seu clássico trabalho de revisão bibliográfica sobre qualidade física do solo, Letey (1985) conclui que o crescimento de plantas é afetado diretamente por quatro fatores: (i) disponibilidade de água; (ii) aeração; (iii) temperatura; e (iv) resistência mecânica à penetração das raízes. A degradação de um solo, em particular aquela decorrente da compactação, tem implicações negativas sobre esses fatores físicos, levando à redução da quantidade de água disponível e da taxa de difusão de oxigênio e ao aumento da resistência à penetração para níveis que podem limitar o crescimento radicular mesmo com o solo na faixa hídrica considerada adequada às plantas.

Em relação à disponibilidade hídrica às plantas, assume papel central o conceito de água disponível (AD), a qual fica retida no solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Além de representar uma quantidade de água, o conceito de AD traz implícita a apreciação qualitativa dessa água, uma vez que seus limites de umidade superior (θ_{CC}) e inferior (θ_{PMP}) são usualmente associados à condição energética dessa água retida no solo (correspondendo, respectivamente, às tensões de 10 kPa e 1500 kPa). A compactação pode, em uma fase inicial, promover aumento da AD, pois afeta predominantemente poros grandes (diâmetro maior que 30 μm) e que não retêm água na CC (Libardi, 2010), convertendo-os em poros menores e que retêm água. Com o avanço do processo, poros menores que 30 μm de diâmetro passam a ser afetados e têm seu volume reduzido, o que leva à redução da θ_{CC} e da AD.

Quanto à aeração de um solo, verifica-se que está se dá majoritariamente pelos poros livres de água (Jong van Lier, 2010), e que a porosidade de aeração

na capacidade de campo (PACC), composta por poros maiores que 30 μm de diâmetro, deve ser no mínimo igual a um valor crítico, usualmente admitido ser da ordem de 10% do volume do solo ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tormena et al., 2008). Nessa condição, o solo estaria na umidade crítica à aeração (θ_{PAc}), acima da qual as trocas gasosas ocorreriam em ritmo prejudicial ao crescimento do sistema radicular das plantas. Como a compactação do solo reduz o volume de poros maiores em favor dos menores, em certo ponto do processo seria atingida uma condição em que a PACC corresponderia exatamente a 10% do volume do solo, em θ_{CC} seria equivalente à θ_{PAc} . Nesse ponto seria identificada a densidade do solo crítica à aeração (D_{SCPA}), acima da qual a θ_{CC} seria maior que a θ_{PAc} e, portanto, a PACC seria menor que 10% volume do solo (Farias et al., 2013; Dias et al., 2016).

No que se refere à resistência mecânica do solo à penetração (RP), verifica-se que o valor de RP é exponencialmente crescente com a densidade e decrescente com a umidade do solo (Busscher, 1990), e que o crescimento radicular é impedido por RP acima de um dado valor crítico, entre 2 e 4 MPa (Tormena et al., 2008). Em solos com baixa densidade a umidade correspondente ao citado nível crítico de RP (θ_{RPc}) seria também muito baixa, possivelmente inferior à θ_{PMP} , de modo que o crescimento radicular seria impedido pela restrição hídrica antes de sofrer a restrição mecânica. Com o processo de compactação a θ_{RPc} se elevaria e em certo ponto seria equivalente à θ_{PMP} , de modo que o impedimento ao crescimento radicular seria devido não apenas à baixa disponibilidade hídrica mas também à RP crítica. Nesse ponto seria identificada a densidade do solo crítica à penetração (D_{SCRp}), acima da qual θ_{RPc} seria maior que a θ_{PMP} e, portanto, a RP na θ_{PMP} seria crescentemente maior que o valor crítico considerado para a espécie vegetal em questão (Farias et al., 2013; Dias et al., 2016).

A avaliação dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação e a qualidade física do solo é melhor realizada por medidas integradoras destas modificações nos fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas (Dias et al., 2016). O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra em um só índice três dos quatro fatores dos elencados por Letey (1985), sendo esses a aeração, a resistência à penetração e as características de retenção de água do solo (Tormena et al., 2008; Moreira et al., 2014; Dias et al., 2016). As inter-relações entre esses fatores dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de compactação a

que o solo está submetido. O IHO pode ser quantificado em função da D_s e pode, portanto, ser utilizado como um bom indicador da qualidade física do solo (Silva et al., 1994).

Com base na dinâmica da compactação anteriormente descrita, para solos com baixa densidade o IHO corresponde à própria AD, sendo delimitado acima pela θ_{CC} e abaixo pela θ_{PMP} . À medida que a compactação aumenta as umidades que delimitam o IHO podem ser substituídas, com θ_{PAc} no lugar de θ_{CC} como seu limite superior e θ_{RPc} no lugar de θ_{PMP} como seu limite inferior, de modo que o IHO se torne menor que a AD. O avanço continuado do processo de compactação levará, por um lado, à redução cada vez maior da θ_{PAc} , e, por outro lado, à elevação crescente da θ_{RPc} . Estudos realizados em diversos solos revelam que o IHO decresce acentuadamente com o aumento da D_s , podendo até atingir valores de $IHO = 0$, o que ocorre quando θ_{PAc} se torna igual a θ_{RPc} . A partir desse ponto, para umidade que o solo venha a assumir, sua condição física será sempre restritiva às plantas, de modo que esse valor de D_s é denominado de densidade do solo crítica (D_{sc}) (Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2001). Quando $D_s > D_{sc}$, assume-se uma severa degradação física do solo, o que torna restrito o crescimento das plantas (Collares et al., 2008).

Não é necessário que o IHO assuma a nulidade para indicar a degradação física do solo, uma vez que com a redução do IHO, em razão do aumento da D_s , a variação temporal e espacial do conteúdo de água do solo pode resultar em estresses físicos às plantas, seja por restrição de aeração, quando a umidade é elevado, ou por causa da excessiva resistência do solo à penetração, em razão do secamento do solo (Bengough et al., 2011; Tormena et al., 2007; Blainski et al., 2012). Conhecer, por meio do IHO, os limites críticos da densidade do solo (D_{SCPA} ; D_{SCRp} ; D_{sc}) auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo (Dias et al., 2016). Dessa forma, o IHO destaca-se como um moderno e importante indicador de qualidade física do solo (Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004; Tormena et al., 1998, 2007), utilizado em diferentes solos e sistema de uso e manejo.

Uma forma de reverter o cenário típico de áreas degradadas é a implantação de sistemas florestais com espécies leguminosas arbóreas, que são plantas de crescimento rápido, capazes de realizar a fixação biológica de nitrogênio e de promover a ciclagem de nutrientes, permitindo assim a recuperação produtiva

desses solos (Gama-Rodrigues et al., 2008; Gomes et al., 2018). A revegetação permite também a recuperação física dos solos, tanto pela ação direta das raízes (rompimento de camadas compactadas, retenção de partículas, estruturação do solo, etc.) como por efeitos indiretos decorrentes da recuperação química do solo e do incremento da atividade biológica. A baixa qualidade inicial de uma área degradada pode restringir o crescimento vegetativo das espécies usadas para a revegetação (Kaiser et al., 2009), mas a própria atuação das plantas, principalmente as leguminosas, pode alterar rapidamente esse cenário.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da revegetação com as leguminosas arbóreas *Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Inga spp* para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico inicialmente sob pastagem degradada, utilizando como indicador o intervalo hídrico ótimo (IHO) e as densidades críticas dele decorrentes.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental localiza-se no município de Conceição de Macabú, Norte Fluminense, na Fazenda Carrapeta (21°37' S e 42°05' W). Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, quente e úmido, com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 1.400 mm (Gama-Rodrigues et al., 2008). O relevo é forte ondulado, com declividade em torno de 0,35 m m⁻¹. O solo, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, tendo como material de origem rochas graníticas-gnáissicas que compõem o embasamento cristalino regional.

No referido sítio, cinco áreas sob diferentes coberturas vegetais foram estudadas. Três dessas áreas são talhões de 1500 m², constituídas de plantios puros das espécies arbóreas de leguminosas *Acacia auriculiformis* (acácia), *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) e *Inga spp.* (ingá), implantadas em dezembro de 1998 para fins de recuperação ambiental. As outras duas áreas, adjacentes aos plantios de leguminosas, têm como coberturas vegetais uma pastagem e uma

capoeira. A pastagem, que representa a vegetação anterior ao plantio das espécies arbóreas, tem o predomínio de capim-gordura (*Melinis minutiflora*), grama-pernambuco (*Paspalum maritimum*) e sapê (*Imperata brasiliensis*), sendo admitida como referência de área degradada por possuir pouca cobertura sobre o solo. A capoeira é um fragmento florestal de Mata Atlântica em sucessão secundária, com espécies em diferentes estádios sucessionais, já está há cerca de 50 anos sem remoção de árvores por ação antrópica e foi admitida neste trabalho como referência de área preservada (Gama-Rodrigues et al., 2008).

Tabela 1. Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	pH (H ₂ O)	P -----(mg kg ⁻¹)-----	C	N	Al -----(cmol _c kg ⁻¹)-----	H + Al -----(cmol _c kg ⁻¹)-----	SB	CTC _{efet} -----(cmol _c kg ⁻¹)-----	CTC _{pH=7}
0-0,10 m									
Capoeira	4,22	0,12	18,8	1,56	1,13	7,82	0,79	1,9	8,6
Pasto	4,26	0,22	13,1	0,93	0,85	6,40	0,41	1,3	6,8
Acácia	4,48	0,17	14,6	1,37	0,37	6,77	2,14	2,5	8,9
Ingá	4,22	0,15	13,9	1,07	0,98	6,55	0,90	1,9	7,5
Sabiá	4,26	0,18	16,0	1,36	1,17	7,77	1,05	2,2	8,8
0,10-0,20 m									
Capoeira	4,12	0,08	12,2	1,10	1,12	7,48	0,30	1,4	7,8
Pasto	4,18	0,04	11,3	0,86	0,92	7,07	0,16	1,1	7,2
Acácia	4,34	0,11	11,1	1,00	0,88	6,62	0,79	1,7	7,4
Ingá	4,28	0,08	10,8	1,01	1,08	6,57	0,40	1,5	7,0
Sabiá	4,22	0,10	11,9	1,00	1,23	6,65	0,46	1,7	7,1

pH em água (1:2,5); P: fósforo - Extrator Mehlich⁻¹; C: carbono - C orgânico determinado com dicromato de potássio por colorimetria; N total foi determinado pelo método Kjeldahl; Al: alumínio - extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo-solução de 1:10; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹; SB: Soma de bases trocáveis; CTC - Capacidade de troca catiônica efetiva e a pH 7,0. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Em julho de 2015 amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, em seis pontos de coleta (repetições) de cada talhão, afastados 5 m entre si, na direção da maior declividade. Ambos os tipos de amostras foram utilizadas por Gomes et al. (2018), sendo as deformadas para caracterização química e granulométrica (Tabelas 1 e 2) e as indeformada para caracterização física (Tabela 2). As amostras indeformadas foram coletadas em anéis metálicos de 53 mm de altura e 100 m³ de volume, com um amostrador SondaTerra®, sendo oito anéis por ponto de coleta (quatro por camada), totalizando 48 anéis por área e 240 anéis no total.

Tabela 2. Atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	Areia	Silte	Argila	Ds	PT	Macro	Micro
	----- (g kg ⁻¹) -----			Mg m ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----		
0-0,10 m							
Capoeira	640,0	85,5	274,5	1,114	0,580	0,398	0,181
Pasto	637,0	90,7	271,7	1,361	0,486	0,249	0,228
Acácia	627,1	70,1	302,8	1,386	0,477	0,321	0,221
Ingá	610,8	93,1	296,1	1,215	0,542	0,294	0,233
Sabiá	603,8	96,8	299,4	1,258	0,525	0,223	0,263
0,10-0,20 m							
Capoeira	598,5	93,8	307,6	1,093	0,587	0,355	0,233
Pasto	533,3	110,2	394,1	1,271	0,520	0,175	0,268
Acácia	510,0	96,0	394,1	1,474	0,444	0,241	0,275
Ingá	535,7	108,4	356,0	1,283	0,516	0,193	0,290
Sabiá	515,4	111,7	372,9	1,370	0,483	0,265	0,255

Ds: densidade do solo, PT porosidade total, Macro: macroporos diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$ e Micro: microporos diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Durante a obtenção da curva de retenção de água no solo, as amostras que atingiam o equilíbrio nas câmaras de pressão, nas tensões 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, eram retiradas e utilizadas para a determinação da resistência à penetração (RP), conforme protocolo estabelecido por Silva et al. (1994). Para tal foi utilizado o penetrógrafo de bancada, com ponteira de 4 mm de diâmetro basal e semiângulo de 30°, com velocidade de penetração ajustada para 10 mm min⁻¹. Um computador acoplado ao aparelho registra, a cada segundo, durante 240 segundos, em um curso de penetração de 40 mm, os valores de resistência medidos por uma célula de carga. Para representar a resistência à penetração de cada amostra (RP, MPa) foi considerada a média dos referidos valores, com descarte daqueles iniciais, crescentes, anteriores ao atingimento de um patamar gráfico, sendo os dados ajustados ao modelo de Busscher (1990), para a obtenção da curva de RP em função da umidade (θ) e densidade (Ds) (Silva et al., 1994):

$$RP = aDs^b \theta^c \quad (1)$$

onde a, b e c são constantes de ajuste, estimadas com o auxílio do suplemento 'solver' do programa Microsoft Office Excel 2010, pelo método dos mínimos quadrados.

Os dados de retenção de água originalmente obtidos por Gomes et al. (2018) foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha \cdot \tau^n)^m} \quad (2)$$

onde θ_s é a umidade volumétrica na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), assumida como correspondente à porosidade total (PT); θ_r é a umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); α (kPa^{-1}) e m e n (adimensionais) são parâmetros empíricos do modelo, com m dependente de n ($m = 1 - 1/n$). Para que as equações fossem representativas da diversidade estrutural do solo, a densidade do solo (D_s) foi inserida no modelo, por meio da substituição de θ_r e θ_s por expressões equivalentes, quais sejam: $\theta_r = U_r D_s / D_a$ e $\theta_s = PT = 1 - D_s / D_p$. Nessas expressões, U_r é a umidade residual gravimétrica (kg kg^{-1}), D_a é a densidade da água (assumida como 1000 kg m^{-3}) e D_p é a densidade de partículas (assumida como 2650 kg m^{-3}). O ajuste foi feito utilizando o suplemento 'solver' do Microsoft Office Excel 2010, sendo os parâmetros de ajuste U_r , α e m estimados iterativamente pelo método dos mínimos quadrados.

A partir da curva de retenção (equação 2) os valores de umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), delimitadores da faixa de água disponível às plantas (AD) e equivalentes às tensões 10 e 1500 kPa, respectivamente, foram estimados, para cada área e camada, em função de D_s . Assumindo-se para a porosidade livre de água o valor mínimo crítico à aeração correspondente a 10% do volume do solo, a umidade em tal condição ($\theta_{PA=10\%}$) foi obtida a partir da PT, subtraindo-se $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\theta_{PA=10\%} = PT - 0,10$), também expresso em função de D_s . Da mesma forma, assumindo-se para a resistência mecânica do solo o valor máximo crítico à penetração de raízes correspondente a 3 MPa (Unger e Kaspar, 1994; Serafim et al., 2013), a umidade que representa esta condição ($\theta_{RP=3MPa}$) foi obtida a partir da equação 1, também em função de D_s .

A partir dos limites críticos acima mencionados foi determinado o intervalo hídrico ótimo (IHO) e os valores de densidade crítica às plantas. Matematicamente, o IHO é a diferença entre dois valores-limite de umidade, um superior e um inferior. Como limite superior considera-se o menor valor entre θ_{CC} e $\theta_{PA=10\%}$, sendo que no ponto em que as duas umidades tornam-se equivalentes identifica-se a densidade do solo crítica à aeração (D_{SCPA}). Como limite inferior considera-se o maior valor entre θ_{PMP} e $\theta_{RP=3MPa}$, sendo que no ponto de equivalência entre as duas umidades

identifica-se a densidade do solo crítica à penetração das raízes (D_{sCRP}). No ponto em que os limites superior e inferior de umidade se igualarem, quaisquer que sejam esses, o IHO torna-se zero e identifica-se, então, a densidade do solo crítica ao crescimento vegetal (D_{sc} ou D_{scIHO}). Graficamente, o IHO é representado pela área entre as funções representativas das umidades críticas superior e inferior.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros de ajuste das curvas de resistência à penetração (Busscher, 1990) e de retenção de água no solo (Van Genuchten, 1980). A partir desses parâmetros foi possível obter, em um primeiro momento, os gráficos representativos do IHO para cada área e camada de solo, apresentados na Figura 1.

Tabela 3. Densidade do solo (D_s), porosidade total (PT) e parâmetros de ajuste da equação de Busscher ($RP = a D_s^b \theta^c$) nas diferentes coberturas vegetais no Norte Fluminense-RJ.

Cobertura Vegetal	Parâmetros de Busscher (equação 1)			Parâmetros de van Genuchten (equação 2)			
	a	b	c	U_r	alfa	m	n
	0-0,10 m						
Capoeira	0,001	4,442	-3,493	0,126	1,641	0,509	2,037
Pasto	0,015	5,442	-2,005	0,110	1,245	0,347	1,532
Acácia	2,094	0,100	-0,278	0,102	4,611	0,289	1,407
Ingá	0,030	5,208	-1,477	0,115	3,571	0,342	1,520
Sabiá	0,008	7,725	-2,286	0,133	2,851	0,374	1,597
	0,10-0,20 m						
Capoeira	0,023	1,470	-2,095	0,144	1,394	0,449	1,815
Pasto	0,001	4,583	-4,063	0,122	1,611	0,362	1,569
Acácia	0,000	10,247	-4,800	0,104	2,270	0,260	1,352
Ingá	0,033	8,570	-1,505	0,138	1,428	0,365	1,575
Sabiá	0,228	3,307	-1,270	0,139	0,927	0,381	1,615

Em um segundo momento foram calculados os valores das variáveis físicas que delimitam o IHO correspondentes às densidades médias observadas para as coberturas vegetais e camadas de solo estudadas, que constam na Tabela 4, quais sejam: (i) umidade no ponto de aeração crítica ($\theta_{PA=10\%}$); (ii) umidade na capacidade de campo (θ_{CC}); (iii) umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); e (iv) umidade no ponto de resistência à penetração crítica ($\theta_{RP=3MPa}$).

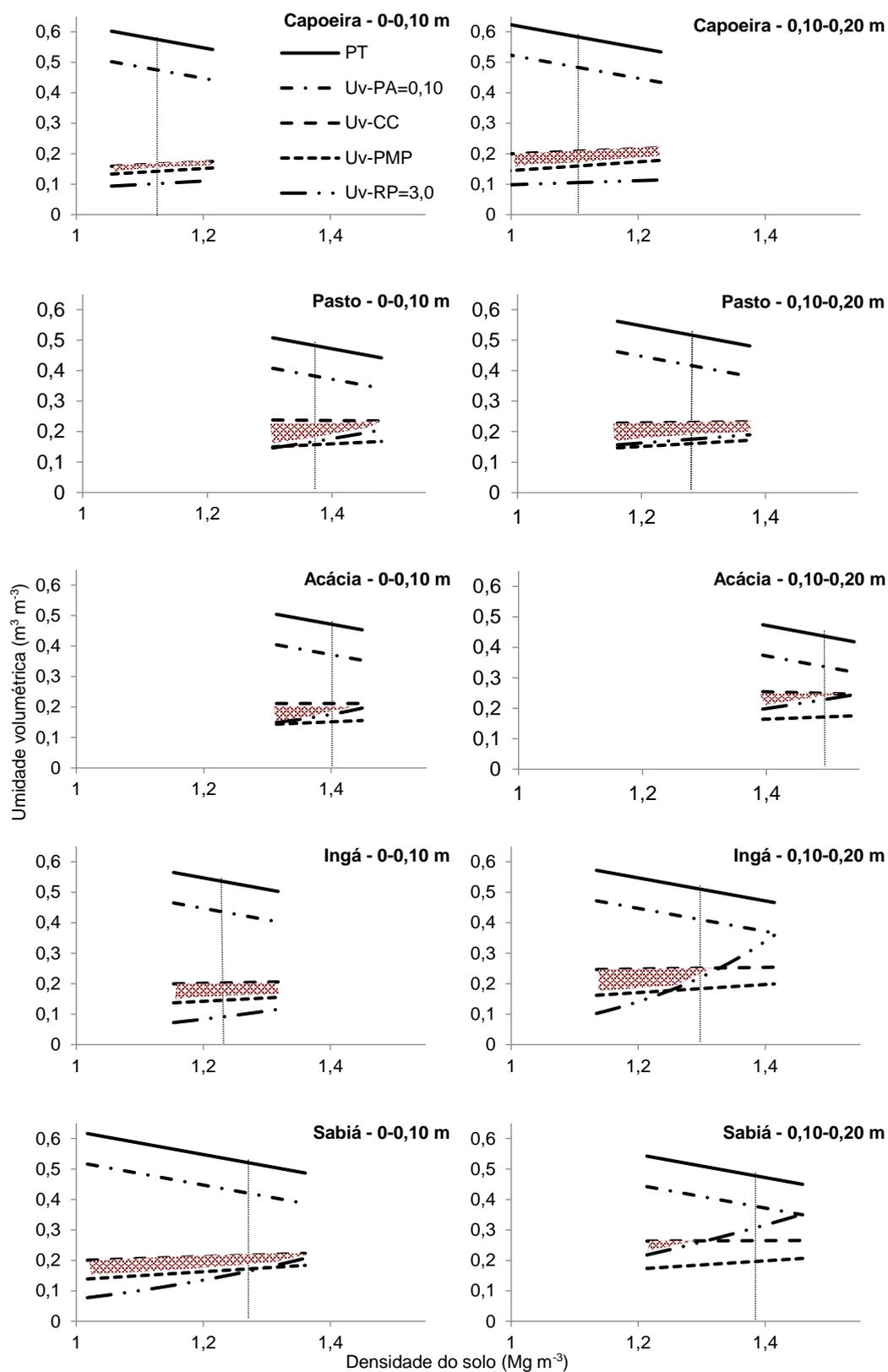


Figura 1. Variação do conteúdo volumétrico de água em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo em função da densidade do solo para os limites críticos de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade de aeração de 10 % e resistência do solo à penetração de 3,0 MPa, nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO); linhas pontilhadas representa o ponto médio calculado da Tabela 2

Na Tabela 4 também são apresentados os valores de água disponível (AD) e do intervalo hídrico ótimo (IHO) e, ainda, os valores de densidade do solo que são críticos para a porosidade de aeração (D_{SCPA}) e para a resistência à penetração (D_{SCRp}) e em que o intervalo hídrico ótimo torna-se zero (D_{SCIHO}).

Na Figura 1 a área hachurada representa graficamente o IHO e mostra a sua amplitude de acordo com o aumento da D_s . Em relação ao limite superior do IHO observa-se que, para todas as amostras das duas camadas de solo sob as cinco coberturas vegetais estudadas, este foi sempre correspondente à umidade na capacidade de campo (θ_{CC}). O valor de $\theta_{PA=10\%}$ foi sempre maior que θ_{CC} , podendo-se estimar que os valores de densidade em que essa igualdade ocorreria e nos quais a aeração passaria a ser crítica às plantas (D_{SCPA}) estariam entre 1,68 a 1,82 $Mg\ m^{-3}$, variando conforme a cobertura vegetal e a camada do solo considerada (Tabela 4). Ressalta-se que esses valores estão bastante acima dos maiores valores de D_s observados na prática, que na camada 0-0,10 m foi no pasto (1,48 $Mg\ m^{-3}$) e na 0,10-0,20 m na acácia (1,54 $Mg\ m^{-3}$). Isso evidencia que, mesmo com estrutura degradada, este solo não apresenta problemas de aeração, o que se justifica por sua textura franco-argilosa, com alto teor de areia (Tabela 2), resultado que corrobora com os encontrados por Silva et al. (2004), em que nos solos de textura arenosa o limite superior do IHO foi sempre a θ_{CC} .

Quanto ao limite inferior do IHO foram identificadas três situações ou casos distintos. No primeiro, para a área da acácia, em ambas as camadas, e para as áreas do sabiá e pasto, na camada 0,10-0,20 m, verificou-se que este limite inferior do IHO foi sempre determinado, desde as menores densidades, pela umidade em que a resistência à penetração é crítica ($\theta_{RP=3MPa}$). Isso caracteriza uma situação de compactação do solo em que há graves restrições mecânicas ao crescimento radicular mesmo com o solo na faixa de umidade da água disponível. No segundo caso, para as áreas da capoeira, em ambas as camadas, e do ingá, na 0-0,10 m, verificou-se, em contraponto, que mesmo nas maiores densidades observadas a θ_{PMP} foi sempre o limite inferior do IHO, evidenciando ausência das mencionadas restrições mecânicas ao crescimento radicular. No terceiro caso, para as áreas do sabiá e pasto, na camada 0-0,10 m, e do ingá, na camada 0,10-0,20 m, verificou-se que o IHO se inicia, nas menores densidades, tendo como limite inferior do IHO a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), mas com o incremento da D_s a $\theta_{RP=3MPa}$ assume o posto de limite inferior do IHO, indicando que, na faixa de água

disponível, há nessas camadas porções do solo com e outras sem restrições mecânicas às raízes.

Ainda a respeito ao limite inferior do IHO, foram estimados os valores críticos de densidade $D_{SCR\text{P}}$, em que θ_{PMP} e $\theta_{\text{RP}=3\text{MPa}}$ seriam iguais (Tabela 4). Para os dois primeiros casos mencionados no parágrafo anterior (respectivamente, a situação de graves restrições mecânicas às raízes, e a situação da ausência dessas restrições), esses valores de $D_{SCR\text{P}}$ estiveram fora da faixa de D_s observada no campo para cada cobertura vegetal e camada de solo em questão. Da primeira situação verifica-se, para a acácia, nas duas camadas, e sabiá, na camada 0,10-0,20 m, que a estimativa de $D_{SCR\text{P}}$ resultou em valores abaixo da faixa de D_s observada (Tabela 4), mas factíveis na prática se ocorrer uma recuperação mais expressiva da estrutura do solo. Já para o pasto, na camada 0,10-0,20 m, o valor estimado foi baixo ($D_{SCR\text{P}} = 0,86 \text{ Mg m}^{-3}$), podendo, na prática, ser considerado não factível, pois é inferior inclusive ao menor valor de densidade verificado sob capoeira ($0,99 \text{ Mg m}^{-3}$). Para a segunda situação, a estimativa de $D_{SCR\text{P}}$ para a camada 0-0,10 m do ingá levou a um valor acima da faixa de D_s observada, porém ainda factível na prática (Tabela 4). Já para a capoeira tal estimativa não produziu valores factíveis, nem para a camada 0-0,10 m ($D_{SCR\text{P}} = 3,85 \text{ Mg m}^{-3}$), nem para a 0,10-0,20 m ($D_{SCR\text{P}} = 0,24 \text{ Mg m}^{-3}$). Para a terceira situação, de compactação intermediária (sabiá e pasto, na camada 0-0,10 m, e ingá, na camada 0,10-0,20 m), os valores de $D_{SCR\text{P}}$ estimados estiveram na faixa de D_s observada para as respectivas coberturas vegetais e camadas de solo (Tabela 4).

Acerca dos resultados acima descritos, pode-se mencionar ainda que todas as amostras que compõem a primeira situação (15 amostras do pasto e 15 do sabiá, em ambos os casos provenientes da camada 0,10-0,20 m, e 30 amostras da acácia, 15 de cada camada) apresentaram RP acima de 3 MPa, mesmo estando o solo com umidade acima do valor crítico θ_{PMP} . Por outro lado, todas as amostras a segunda situação (15 do ingá, da camada 0-0,10 m, e 30 amostras da capoeira, 15 de cada camada) apresentaram RP abaixo de 3 MPa, mesmo o solo estando na umidade crítica θ_{PMP} . Para as amostras que compõem a terceira situação, estando essas na umidade crítica θ_{PMP} , parte apresentou RP acima de 3 MPa (11 do pasto e 7 do sabiá, da camada 0-0,10 m, e 10 do ingá, da 0,10-0,20 m) e parte apresentou RP abaixo de 3 MPa (4 do pasto e 8 do sabiá, da camada 0-0,10 m, e 5 do ingá, da 0,10-0,20 m).

O IHO torna-se nulo quando a umidade que determina seu limite inferior ($\theta_{RP=3MPa}$ ou θ_{PMP}) se iguala (ou supera) a umidade que determina o limite superior ($\theta_{PA=10\%}$ ou θ_{CC}), identificando-se, nesse ponto, a densidade do solo crítica ao crescimento vegetal (D_{SCIHO}) (Leão et al., 2004).

Para a faixa de D_s observada na prática em cada cobertura vegetal e camada de solo, essa possibilidade ($IHO = 0$) se concretizou apenas na camada 0,10-0,20 m do solo sob ingá e sabiá (Tabela 4), sendo, nesses casos, a D_{SCIHO} identificada pela igualdade entre θ_{CC} e $\theta_{RP=3MPa}$. Nessa situação o nível de compactação pode ser considerado severo, pois mesmo com a umidade na capacidade de campo, que é o limite superior da faixa de água disponível, há porções do solo com resistência mecânica restritiva ao crescimento radicular. Das 15 amostras de solo da camada 0,10-0,20 m dessas coberturas vegetais, 5 do ingá (33,3%) e 13 do sabiá (87,7%) apresentaram D_s acima do nível crítico D_{SCIHO} e, portanto, exibiram severa restrição mecânica às raízes. Em todos os demais casos, nenhuma amostra exibiu tal nível de restrição ao crescimento radicular. Para a capoeira, similarmente ao que havia ocorrido na estimativa da D_{SCRp} , o valor de D_{SCIHO} estimado foi muito alto ($D_{SCIHO} = 2,94 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada 0-0,10 m) ou muito baixo ($D_{SCIHO} = 0,53 \text{ Mg m}^{-3}$, na 0,10-0,20 m), fora não só da faixa de D_s para a qual foram ajustadas as curvas de resistência à penetração (equação 1) e de retenção de água (equação 2), mas fora de uma faixa de D_s factível na prática. Nos demais casos, os valores estimados de D_{SCIHO} (Tabela 4), embora acima da faixa de D_s observada no campo para cada cobertura vegetal e camada do solo em questão, ficaram entre 1,40 e 1,68 Mg m^{-3} , patamar factível se ocorrer aumento da compactação e piora da condição estrutural do solo.

Os resultados acima descritos, acerca dos limites do IHO e das densidades críticas deles resultantes, evidenciam que, para a faixa de D_s observada no solo sob leguminosas arbóreas (à exceção do ingá na camada 0-0,10 m) e sob pasto, o IHO foi menor que a AD, sendo que, nesses casos, o fator que determinou tal inferioridade foi sempre a elevada resistência mecânica do solo. A constatação de que a RP é o principal fator físico limitante às plantas também foi feita por Silva et al. (2009) e Bengough et al. (2011) para solos de diferentes texturas e sob diversas condições de manejo.

Tabela 4. Valores de umidade do solo no ponto de aeração crítica ($\theta_{PA=10\%}$), na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e ponto de resistência à penetração crítica ($\theta_{RP=3MPa}$); valores de água disponível (AD), de intervalo hídrico ótimo (IHO) e de densidade do solo crítica para a porosidade de aeração (D_{SCPA}), para a resistência à penetração (D_{SCRp}) e em que o intervalo hídrico ótimo torna-se zero (D_{SCIHO}), correspondentes à condição média de densidade de cada área e camada, nas diferentes coberturas vegetais no Norte Fluminense-RJ.

Cobertura Vegetal	$\theta_{PA=10\%}$	θ_{CC}	θ_{PMP}	$\theta_{RP=3MPa}$	AD	IHO	D_{SCPA}	D_{SCRp}	D_{SCIHO}
0-0,10 m									
Capoeira	0,480	0,164	0,140	0,100	0,024	0,024	1,777	-	-
Pasto	0,386	0,237	0,156	0,164	0,081	0,073	1,775	1,324	1,552
Acácia	0,377	0,211	0,150	0,171	0,061	0,041	1,824	1,270	1,478
Ingá	0,442	0,202	0,144	0,087	0,058	0,058	1,792	1,474	1,571
Sabiá	0,425	0,216	0,170	0,159	0,046	0,046	1,732	1,295	1,395
0,10-0,20 m									
Capoeira	0,487	0,207	0,158	0,104	0,049	0,049	1,702	-	-
Pasto	0,420	0,230	0,160	0,174	0,070	0,056	1,750	0,863	1,682
Acácia	0,344	0,250	0,170	0,222	0,080	0,028	1,766	1,232	1,546
Ingá	0,416	0,250	0,182	0,207	0,069	0,044	1,692	1,249	1,329
Sabiá	0,383	0,265	0,194	0,299	0,070	0,000	1,676	1,060	1,307

As áreas revegetadas e o pasto já haviam sido no passado áreas cultivadas, de modo que o manejo então adotado (para o cultivo do café, o pastejo de animais e mesmo para a implantação dos atuais sistemas florestais com leguminosas) pode ter sido a origem da atual compactação e ocorrência de restrições mecânicas ao desenvolvimento radicular, as quais definem o limite inferior do IHO.

Em sistemas de adição contínua de matéria orgânica, como no presente caso, era de se esperar que a melhoria da estrutura do solo de modo a aumentar, por um lado, a porosidade total e a umidade na qual a porosidade de aeração é crítica (θ_{PAcrit}), e a diminuir, por outro lado, a umidade na qual a resistência à penetração é também crítica (θ_{RPcrit}), o que levaria ao aumento do IHO. Em seu estudo, Sharma e Bhushan (2001) observaram tal evidência, de que a adição de biomassa ao solo provocou aumento na θ_{PAcrit} e diminuição na θ_{RPcrit} , com consequente aumento do IHO. Os autores encontraram valores IHO 1,7 vezes maiores nos tratamentos onde foi aplicada biomassa vegetal, em relação a testemunha sem aplicação de biomassa. Isso contrasta com os resultados desse estudo, onde se esperava que as áreas revegetadas pelas leguminosas se assemelhassem mais à capoeira, principalmente na camada 0-0,10 m, onde a influência da matéria orgânica é maior.

Para a área da capoeira, nas duas camadas, e do ingá, na 0,10-0,20 m, o IHO é igual à “água disponível”, sendo esta igualdade indicadora de solo com

qualidade física favorável ao crescimento das plantas. Nesse caso, toda a água entre θ_{CC} e θ_{PMP} pode ser utilizada pelas plantas sem restrições físicas para as raízes, o que potencializa a capacidade do sistema em mitigar o déficit hídrico (Serafim et al., 2013). Ocorre que o solo da capoeira apresentou valores muito baixos de AD e, conseqüentemente, de IHO (Tabela 4), com média das duas camadas de $0,036 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Guimarães et al. (2013), quantificando os efeitos de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre o IHO, encontram para a área de mata nativa um valor de AD de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, quase o triplo do obtido no presente trabalho. Lopes (2017), avaliando os atributos hidrodinâmicos e da afinidade água-solo em agregados da área do presente estudo e coletados na mesma ocasião, também em junho de 2015, encontraram níveis de hidrofobicidade maiores no solo sob capoeira que sob as demais coberturas vegetais. A autora relata que, em certas situações, a tentativa de associar atributos relacionados à dinâmica da água com atributos estruturais do solo não foi bem-sucedida, sendo esse insucesso decorrente de se admitir como verdadeiros e universais certos aspectos específicos da afinidade água-solo, negligenciando, de forma equivocada, a possibilidade de ocorrência de ângulo de contato maior que zero.

A autora obteve como resultado que o ângulo de contato para a área da capoeira nas duas camadas avaliadas foi elevado ($78,0^\circ$, para a 0-0,10 m, e $80,4^\circ$, para a 0,10-0,20 m), superior à média das demais coberturas vegetais ($54,8^\circ$, para a 0-0,10 m, e $53,5^\circ$, para a 0,10-0,20 m), com implicações na estimativa dos valores de θ_{CC} e θ_{PMP} , os quais definem a AD e o IHO.

Os valores médios de Ds variaram de 1,11 a $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada 0-0,10 m, e de 1,10 a $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$, na 0,10-0,20 m (Tabela 2). Considerando-se as densidades médias obtidas para cada área e camada, foram calculados os valores das variáveis que definem o IHO e o próprio IHO, os quais constam na Tabela 4 e podem também ser obtidos a partir das linhas verticais pontilhadas na Figura 1. Na camada 0-0,10 m das áreas sob pasto e acácia o limite inferior do IHO foi a $\theta_{RP=3MPa}$, evidenciando-se solo compactado na média das densidades observadas. Já na camada 0,10-0,20 m somente na capoeira o limite inferior foi a θ_{PMP} , de modo que, nas demais áreas, na densidade média observada do solo já reflete um nível de compactação cuja resistência mecânica à penetração pode estar restringindo o crescimento vegetal. Apenas para o sabiá na 0,10-0,20 m o IHO foi zero, pois esse foi o único caso em que a densidade média do solo ($1,37 \text{ Mg m}^{-3}$) foi superior à

D_{scIHO} ($1,31 \text{ Mg m}^{-3}$). Kaiser et al. (2009) relatam, em seu trabalho, que a densidade crítica em que o IHO tornou-se zero devido ao alto valor de $\theta_{RP=3 \text{ MPa}}$ foi de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$. No presente estudo a acácia, na camada 0-0,10 m, o sabiá, nas duas camadas, e o ingá, na 0,10-0,20 m, apresentaram valores de D_{scIHO} inferiores ao citado pelo referidos autores. De acordo com a classificação proposta por Reichert et al. (2003), considerando a classe textural franco-argilosa, as densidades verificadas no presente deveriam garantir boa qualidade física do solo sob todas as coberturas vegetais, pois os valores de densidade ficaram abaixo de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, limite crítico para o crescimento radicular, exceção à acácia na camada 0,10-0,20 m, com $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 1).

Gomes et al. (2018), trabalhando com os atributos físicos densidade e distribuição da porosidade na escala detalhada, relatam que para a área da capoeira o solo possui uma baixa densidade (D_s), alta porosidade total (PT) e elevado proporção de poros grandes, e que o pasto, apesar de apresentar distribuição de poros adequada, possui elevada D_s e baixa PT, tendo as áreas de ingá e sabiá apresentado resultados intermediários. Em relação à acácia, esta apresentou a pior qualidade física, com maior D_s , menor PT e menor proporção de poros grandes. Apesar de algumas áreas não terem apresentado uma distribuição adequada de poros, este não foi o fator limitante ao desenvolvimento radicular das plantas. Os solos não perturbados por práticas de manejo proporcionam uma elevada porosidade total, formada em grande parte por macroporos, os quais não atuam diretamente no processo de retenção de água, agindo principalmente na drenagem e aeração do solo (Brady e Weil, 2013).

A amplitude do IHO foi de 0 a $0,073 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, muito abaixo dos encontrados na literatura, sendo que a maior amplitude encontrada foi para a área do sabiá. Nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m as amplitudes do IHO nos diferentes usos apresentaram a seguinte ordem: sabiá>acácia>capoeira>pasto>ingá, sendo que as áreas do sabiá e acácia obtiveram maior amplitude devido terem apresentado valor reduzido com $IHO = 0$ em alguma das camadas, indicando restrição ao desenvolvimento das plantas. Sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma maior frequência de situações de stress por excesso ou falta de água. Leão et al. (2004), trabalhando com sistemas de pastejo contínuo e rotacionado, encontram uma amplitude total de variação do IHO de 0 até $0,1482 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Em casos onde o IHO não seja aumentado ou reduzido entre uma camada e outra do solo têm-se um indicativo de um manejo adequado das propriedades físicas do solo. Uma redução do IHO pode significar redução da produtividade e que o manejo destinado ao solo pode não ser sustentável. Nas presentes áreas de estudo, principalmente a da acácia, já se observa que algumas plantas em processo de senescência. Assim, pensando que nessas mesmas áreas poder-se-á vir plantar algum tipo de cultura perene, estas terão problemas severos de enraizamento, o que poderá levar ao fracasso no crescimento.

O IHO é calculado de forma semelhante à AD, pela diferença entre um limite superior e um inferior de umidade do solo. Solos com estrutura adequada têm IHO igual à AD, sendo estes limites θ_{CC} e θ_{PMP} , respectivamente. Solos compactados, por outro lado, podem ter IHO menor que a AD. Isso pode decorrer de $\theta_{PA=10\%}$ assumir o lugar da θ_{CC} como limite superior de umidade do solo, o que evidenciaria problemas de aeração do solo e que no presente trabalho não ocorreu. Outra possibilidade é $\theta_{RP=3MPa}$ assumir o lugar da θ_{PMP} como limite inferior de umidade do solo, evidenciando, assim, problemas de resistência à penetração restritiva ao crescimento radicular, o que ocorreu em grande parte dos casos do presente trabalho.

CONCLUSÕES

O solo do presente estudo, de textura franco-argilosa e com alto teor de areia, mesmo exibindo elevada compactação e degradação da estrutura, não apresenta indicadores que evidenciem problemas de aeração.

Para a faixa de densidade do solo observada no presente estudo, e considerando-se a classe textural desse solo, sempre que ocorre IHO menor que a AD o fator determinante é a elevada resistência mecânica do solo.

Para a camada 0-0,10 m, comparativamente ao pasto, o ingá e o sabiá reduziram a compactação do solo e a ocorrência de restrições mecânicas ao crescimento radicular e, ainda, promoveram o maior IHO, fatos esses que não ocorreram na acácia.

Para a camada 0,10-0,20 m, com exceção do pasto, a compactação e suas consequências foram mais pronunciadas que na 0-0,10 m, com severas restrições

mecânicas ao crescimento radicular e redução do IHO, com destaque negativo para a acácia e o sabiá

O solo da capoeira, embora sem exibir restrição mecânica às raízes, apresentou valores muito baixos de IHO e de AD, o que, possivelmente, decorre da hidrofobicidade desse solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bengough, A.G.; Mckenzie, B.M.; Hallett, P.D.; Valentine, T. A. (2011) Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62:59-68.
- Blainski, E.; Tormena, C.A.; Guimarães, R.M.L.; Nanni, M.R. (2012) Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:79-87.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução técnica; Igo Fernando Lepsch. 3. ed. Porto Alegre.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v.12, p.37-51.
- Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. & Kaiser, D.R. (2008) Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942.
- Dias, C.B.; Rocha, G.C.; Assis, I.R.; Fernandes, R.B.A. (2016) Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. *Rev. Ceres, Viçosa*, v. 63, n.6, p. 868-878.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. Brasília: Embrapa 353p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3 ed. Brasília: Embrapa 573p.
- Farias, I.L.; Pacheco, DE.P.; Viégas, P.R.A. (2013) Characterisation of the optimal hydric interval for a Yellow Argisol cultivated with sugarcane on the coastal plains of Alagoas, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 4, p. 669-675.

- Ferreira, M.M. (2010) Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (ed.) Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.1-27.
- Gomes, D.S.; Marciano, C.R.; Faustino, L.L. (2018) Physical quality of a Typic Hapludult soil under forest leguminous trees and pasture. *Floresta e Ambiente*, v.25, p.xx-xx.
- Jong Van Lier, Q. de (2010) Aeração do solo. In: Jong Van Lier, Q. de (ed.) Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.xx-xx.
- Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Collares, G. L.; Kunz, M. (2009) Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, v.33, p.845-855.
- Leão, T. P.; Silva, A. P.; Macedo, M. C. M.; Imhoff, S.; Euclides, V. P. B. (2004) Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, v.1, p.277-294.
- Libardi, P.L. (2010) Água no solo. In: Jong Van Lier, Q. de (ed.) Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.xx-xx.
- Lopes, P.G.N. (2017) Atributos hidrodinâmicos e hidrofobicidade em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob mata atlântica secundária, pastagem degradada e leguminosas arbóreas. Dissertação: Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF.
- Moreira, F. R.; Dechen, S. C. F.; Pires da Silva A.; Figueiredo, G. C.; Clerici De Maria, I.; Terezinha, P. (2014) Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. *R. Bras. Ci. Solo*, 38:118-127
- Omuto, C.T. (2008) Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.128, p.199-211.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braida, J. A. (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, v.27, p.29-48.
- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J. (2007) Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e

- mitigação. In: Ceretta, C.A.; Silva, L.S.; Reichert, J.M. (eds.) Tópicos Ciência do Solo, v.5. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.49-134.
- Silva, A. P.; Kay, B. D.; Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.1775-1781.
- Tormena, C.A.; Araújo, M.A.; Fidalski, J. (2007) Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219.
- Tormena, C.A.; Araújo, M.A.; Fidalski, J.; Imhoff, S.; Silva, A.P. (2008) Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.943-952.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581.
- Unger, P. W.; Kaspar, T. C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.*, v.86, p.759-766.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.44(5), p.892-898.

3.3. Distribuição por tamanho e morfometria de agregados de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas florestais e pasto

RESUMO

Áreas revegetadas por leguminosas arbóreas em experimentos de longa duração podem levar a importantes alterações nas propriedades físicas do solo quando comparadas às suas condições originais. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da revegetação com leguminosas arbóreas para a recuperação da qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, por meio da análise morfométrica de agregados e de sua distribuição por classes de tamanho. Em julho de 2015 foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade em três áreas revegetadas com leguminosas arbóreas (*Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpinifolia* e *Inga ssp.*) e duas áreas de referência (capoeira e pasto). As leguminosas apresentaram agregados maiores que o pasto e capoeira, o que foi constatado tanto no geral (pela maior proporção nas classes de maior diâmetro) quanto em cada classe de tamanho (pela superioridade de suas variáveis morfométricas). A dissimilaridade entre as coberturas vegetais variou de acordo com a camada de solo estudada.

Palavras-chave: revegetação, matéria orgânica, agregados do solo, análise morfométrica de agregados.

ABSTRACT

Distribution by size and morphometry of aggregates of a Typic Hapludult soil under forest systems and pasture

Areas revegetated by tree legumes in long-term experiments provide important information on changes in soil physical properties when compared to original soil conditions. The objective of this study was to evaluate the efficiency of revegetation with tree legumes to recover the structural quality of a Typic Hapludult soil Distrophic

by means of the morphometric analysis of aggregates and their distribution by size classes. In July 2015, soil samples of a preserved and non-preserved structure of the 0-0.10 m and 0.10-0.20 m depth layers were collected in three vegetated areas with tree legumes (*Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpinifolia* and *Inga ssp.*) And two reference areas (capoeira and pasture). Besides the physical and chemical attributes evaluation of the soils, the morphometric analysis was performed with the aid of the ImageJ software and the distribution of the aggregates by size classes. There was a predominance of legumes in having higher aggregate area values in the classes of larger diameter aggregates. The dissimilarity between the vegetation cover varied according to the soil layer studied.

Keywords: revegetation, organic matter, soil aggregates, aggregate morphometric analysis.

INTRODUÇÃO

O desafio dos sistemas de produção atuais é a busca pela sustentabilidade ou novas condições de equilíbrio que afetem menos os recursos naturais. No que diz respeito ao manejo do solo, este é considerado adequado quando não resulta em perda de qualidade (química, física e biológica) que limite a capacidade de o solo cumprir no ecossistema os papéis que lhe são inerentes. O manejo do solo influencia sua estruturação, ou seja, afeta a distribuição por tamanho e a estabilidade dos agregados, uma vez que interfere no arrançamento e adesão das partículas do solo (Olzeviski et al., 2004, Carducci et al., 2016).

Na região Norte Fluminense a Mata Atlântica foi reduzida a 5% da área original, sendo essa cobertura substituída pela atividade agropecuária caracterizada principalmente por pastagens mal manejadas e pelo cultivo intensivo da cana-de-açúcar (com o uso das queimadas) e do café (Gama-Rodrigues et al., 2008; Gomes et al., 2018). Tendo acumulado um grande passivo ambiental de áreas degradadas, nas últimas décadas ações têm sido feitas no sentido de que um manejo mais adequado do solo seja implementado.

Uma alternativa para a recuperação do potencial produtivo destes solos é o uso de leguminosas arbóreas. Além de serem fixadoras do N₂ atmosférico, essas espécies possuem a capacidade de aumentar o teor de matéria orgânica e a

disponibilidade de nutrientes e de melhorar os atributos físicos dos solos. Por outro lado, áreas sob gramíneas também podem ter melhoria de seus atributos, pois tais espécies exercem papel muito importante na adição contínua de matéria orgânica do solo, em particular quando manejada de forma correta, sem superpastejo, além de seu sistema radicular ajudar na formação de agregados (Bronick e Lal, 2005; Salton et al., 2008).

A avaliação da qualidade do solo para cumprir seu papel ecológico deve ser feita a partir de índices abrangentes, incluindo indicadores que permitam interpretar sua condição estrutural. Dentre as possibilidades, a distribuição de agregados em classes de tamanho é uma técnica antiga e bastante difundida. A análise morfométrica de agregados, por outro lado, é uma técnica bem mais recente e ainda demanda estudos para que seus resultados possam ser correlacionados com outros atributos físicos.

Para avaliar a distribuição de agregados em classes existem dois métodos principais, que são sua separação por tamisamento via seca ou via úmida. Ambos os métodos se baseiam em um processo de peneiramento, onde amostras de solo são dispostas em um jogo de peneiras de aberturas de malhas decrescentes. A partir do peso de solo retido em cada peneira obtém-se a proporção de agregados em cada classe de tamanho e, então, pode-se calcular índices de agregação, como o diâmetro médio ponderado (DMP) ou o diâmetro médio geométrico (DMG). No método via úmida são mais determinantes a estabilização física biológica (por raízes finas, hifas de fungo, etc) ou as forças de natureza química eletrostáticas (pontes de hidrogênio, ligações iônicas, etc), enquanto no via seca, além dos fatores citados, incluem-se forças de atração de curto alcance de natureza física (forças moleculares de London-van der Waals). Nesse último caso, via seca, com o processo de secamento dos agregados as interfaces água-ar nos poros têm sua curvatura convexa aumentada, o que promove a aproximação física entre as partículas e aumenta as forças internas de coesão nos agregados. No primeiro caso, via úmida, a saturação com água elimina os meniscos água-ar do interior dos agregados, e permite, assim, que ocorra o afastamento físico das partículas, o que dependerá dos fatores químicos e biológicos citados.

A análise de imagens de agregados mostra-se como ferramenta útil para compor tais índices de avaliação. Essa técnica, conhecida como morfometria, permite a caracterização do agregado de acordo com a geometria de suas formas,

podendo ser realizada por meio de técnicas de processamento de imagem bidimensionais, que têm baixo custo e são fáceis de manusear (Olszewski et al., 2004; Viana et al., 2004; Cremon et al., 2011; Carducci et al., 2016). Em seus estudos, Fernandes (1982) e Dadalto et al. (1989) relatam que os agregados do solo mostram diferenças quanto a tamanho, forma, estabilidade e adesão entre si e que alterações nas condições naturais do solo por sistemas de manejo podem alterar o tamanho, a distribuição e a estabilidade desses agregados.

A avaliação de agregados por meio de imagens digitalizadas permite que as etapas lentas do processo de análise morfométrica sejam efetuadas de forma rápida e automática (Viana et al., 2004). Da mesma maneira, Prakongkep et al. (2010), realizando a caracterização das partículas de areia em solos cultivados com arroz, por meio da análise de imagens via microcomputadores, enfatizaram o baixo custo e a compatibilidade com os recursos da maioria dos usuários, além da facilidade de uso.

A análise de imagem consiste em todas as operações necessárias para obter informações a partir da mesma. A sequência típica de operações inclui a aquisição e processamento da imagem e a obtenção e interpretação dos dados. A avaliação da qualidade estrutural de agregados do solo a partir da análise morfométrica de imagens bidimensionais digitalizadas pode contribuir para a construção de conhecimento qualitativo acerca da estrutura de um solo.

O software mais utilizado no processamento de imagens digitais é o ImageJ (Rasband, 2004), que é livre e foi desenvolvido no *National Institute of Health* dos EUA, baseado na linguagem de programação Java®. É um programa aberto, que além dos *plug-ins* nativos (*built-in*), permite a agregação de novos *plug-ins* pelos desenvolvedores e usuários. O software vem sendo amplamente utilizado nas mais diversas áreas científicas, como agrárias, biologia, medicina, engenharia, etc. (Collins, 2007).

Uma vez que as mudanças estruturais influem diretamente na morfologia dos agregados, considera-se fundamental a procura de novos métodos de estudos macromorfológicos para permitir o acompanhamento das modificações dessa característica nos solos. Dessa forma, seria de amplo interesse a utilização de instrumentos práticos, mais sensíveis para a predição da sustentabilidade do uso desse recurso natural (Olszewski et al., 2004). Cremon et al. (2011), trabalhando com micromorfometria de um Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico cultivado com

arroz, relatam que as estruturas granulares dos solos ricos em óxidos são extremamente resistentes e dificilmente alteradas pelo cultivo, sendo que o estudo com agregados de maiores dimensões, nestes tipos de solos, é primordial para que se verifique se tais agregados são mais sensíveis em sofrer alteração de sua morfologia.

Além disso, vale ressaltar que em solos sob vegetação original, isentos da ação humana, com nível estável e usualmente elevado de matéria orgânica e com estabilidade de sua estrutura, as condições morfométricas encontradas são consideradas adequadas (Salton et al., 2008; Costa Junior et al., 2012; Tirloni et al., 2012), pelo simples fato de o mesmo cumprir seu papel ecológico natural.

Diante do exposto, o objetivo da pesquisa foi avaliar a eficiência da revegetação com as leguminosas *Acacia auriculiformis*, *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Inga spp.* para a recuperação da qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, em Conceição de Macabú-RJ, por meio da distribuição de agregados em classes de tamanho, da análise morfométrica desses agregados e das inter-relações entre as variáveis morfométricas.

MATERIAL E MÉTODOS

O sítio experimental localiza-se no município de Conceição de Macabú, Norte Fluminense, na Fazenda Carrapeta (21°37' S e 42°05' W). Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, quente e úmido, com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 1400 mm (Gama-Rodrigues et al., 2008). O relevo é forte ondulado, com declividade em torno de 0,35 m m⁻¹. O solo, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, tendo como material de origem rochas graníticas-gnáissicas que compõem o embasamento cristalino regional.

No referido sítio, cinco áreas sob diferentes coberturas vegetais foram estudadas. Três dessas áreas são constituídas de plantios puros das espécies arbóreas de leguminosas *Acacia auriculiformis* (acácia), *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) e *Inga spp.* (ingá), implantadas em dezembro de 1998 para fins de recuperação ambiental. As outras duas áreas, adjacentes aos plantios de leguminosas, têm como coberturas vegetais uma pastagem e uma capoeira. A

pastagem, que representa a vegetação anterior ao plantio das espécies arbóreas, tem o predomínio de capim-gordura (*Melinis minutiflora*), grama-pernambuco (*Paspalum maritimum*) e sapê (*Imperata brasiliensis*), sendo admitida como referência de área degradada por possuir solo compactado e pouca cobertura vegetal sobre o solo. A capoeira é um fragmento florestal de Mata Atlântica em sucessão secundária, com espécies em diferentes estádios sucessionais, que já estava há cerca de 50 anos sem remoção de árvores por ação antrópica e foi admitida como referência de área preservada (Gama-Rodrigues et al., 2008).

Em julho de 2015 foram coletadas amostras de solo em seis pontos cada área, afastados 5 m entre si, na direção da maior declividade. As amostras foram coletadas das camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, mediante escavação com auxílio de martelo pedológico, faca e colher de pedreiro, buscando-se preservar íntegros os agregados naturais (amostras de agregados), sendo acondicionadas em embalagens plásticas rígidas com tampa, totalizando duas amostras por ponto (uma por camada), 12 por área e 60 para a área experimental. Na mesma ocasião também foram coletadas amostras com estrutura deformada e estrutura preservada em anéis volumétricos, ambos alvos do estudo de Gomes et al. (2018).

Tabela 1. Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	pH (H ₂ O)	P -----(mg kg^{-1})-----	C	N	Al	H + Al -----($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)-----	SB	CTC _{efet} -----($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)-----	CTC _{pH=7}
0-0,10 m									
Capoeira	4,22	0,12	18,8	1,56	1,13	7,82	0,79	1,9	8,6
Pasto	4,26	0,22	13,1	0,93	0,85	6,40	0,41	1,3	6,8
Acácia	4,48	0,17	14,6	1,37	0,37	6,77	2,14	2,5	8,9
Ingá	4,22	0,15	13,9	1,07	0,98	6,55	0,90	1,9	7,5
Sabiá	4,26	0,18	16,0	1,36	1,17	7,77	1,05	2,2	8,8
0,10-0,20 m									
Capoeira	4,12	0,08	12,2	1,10	1,12	7,48	0,30	1,4	7,8
Pasto	4,18	0,04	11,3	0,86	0,92	7,07	0,16	1,1	7,2
Acácia	4,34	0,11	11,1	1,00	0,88	6,62	0,79	1,7	7,4
Ingá	4,28	0,08	10,8	1,01	1,08	6,57	0,40	1,5	7,0
Sabiá	4,22	0,10	11,9	1,00	1,23	6,65	0,46	1,7	7,1

pH em água (1:2,5); P: fósforo - Extrator Mehlich⁻¹; C: carbono - C orgânico determinado com dicromato de potássio por colorimetria; N total foi determinado pelo método Kjeldahl; Al: alumínio - extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo-solução de 1:10; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹; SB: Soma de bases trocáveis; CTC - Capacidade de troca catiônica efetiva e a pH 7,0. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

As amostras deformadas, após serem secas ao ar e peneiradas, foram utilizadas para a caracterização química (Tabela 1) e granulométrica do solo (Tabela 2). As amostras em anéis foram utilizadas para a determinação da densidade, porosidade e distribuição de poros por tamanho (Tabela 2).

As amostras com agregados naturais preservados foram passadas em peneiras de malhas com abertura sucessivamente decrescentes, conforme descrito a seguir. Inicialmente foi usada malha de 19 mm, promovendo-se suave agitação e submendo os agregados retidos a cuidadosa fragmentação manual, em suas superfícies de fraqueza, até que todo o material passasse pela peneira (exceto os raros calhaus, que, se presentes, foram eliminados). O material passado na malha de 19 mm foi então colocado em peneira de malha de 12,5 mm, promovendo-se nova e suave agitação, porém agora sem fragmentar os agregados retidos, que foram recolhidos e quantificados por pesagem.

Tabela 2. Atributos físicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú, RJ.

Cobertura Vegetal	Areia -----(g kg ⁻¹)-----	Silte -----	Argila -----	DS Mg m ⁻³	PT -----m ³ m ⁻³ -----	Macro -----	Micro -----
0-0,10 m							
Capoeira	640,0	85,5	274,5	1,114	0,580	0,398	0,181
Pasto	637,0	90,7	271,7	1,361	0,486	0,249	0,228
Acácia	627,1	70,1	302,8	1,386	0,477	0,321	0,221
Ingá	610,8	93,1	296,1	1,215	0,542	0,294	0,233
Sabiá	603,8	96,8	299,4	1,258	0,525	0,223	0,263
0,10-0,20 m							
Capoeira	598,5	93,8	307,6	1,093	0,587	0,355	0,233
Pasto	533,3	110,2	394,1	1,271	0,520	0,175	0,268
Acácia	510,0	96,0	394,1	1,474	0,444	0,241	0,275
Ingá	535,7	108,4	356,0	1,283	0,516	0,193	0,290
Sabiá	515,4	111,7	372,9	1,370	0,483	0,265	0,255

DS: densidade do solo, PT porosidade total, Macro: macroporos diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$ e Micro: microporos diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$. Análises realizadas conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

O material que passou pela peneira de 12,5 mm também foi quantificado e então colocado em peneira de malha de 8 mm, repetindo-se a agitação e o recolhimento da fração de agregados retida. O procedimento foi repetido sucessivamente, com o material passando por peneiras de malha cada vez menores, seguindo-se as de 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm. O material que passou nesta última peneira (0,25 mm) foi também recolhido e pesado, sendo então obtidas oito classes ou frações de agregado: 1 - 19-12,5 mm; 2 - 12,5-8 mm;

3 - 8-4 mm; 4 - 4-2 mm; 5 - 2-1 mm; 6 - 1-0,50 mm; 7 - 0,50-0,25 mm; e 8 - < 0,25 mm.

A quantificação da distribuição percentual de agregados nessas classes foi feita de acordo com a equação 1:

$$FA_i = 100 \frac{MA_i}{\sum_{i=1}^8 MA_i} \quad (1)$$

Em que: i é a identificação classe de agregado (1 a 8); FA é fração de agregado na classe “ i ” (%); e MA é massa de agregado na classe “ i ” (g).

Foram calculados também o diâmetro médio ponderado (DMP), por meio da equação 2, e o diâmetro médio geométrico (DMG), por meio da equação 3:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (2)$$

e

$$DMG = 10^{\sum_{i=1}^n (w_i \log x_i) / \sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

Em que: i é a identificação das classes de agregado (1 a 8); w_i é a proporção gravimétrica de cada classe “ i ” de agregados em relação ao total das classes; e x_i é o diâmetro médio de cada classe “ i ” de agregados.

Para cada amostra a análise morfométrica foi realizada utilizando-se 35 agregados de cada uma das cinco maiores frações. Essa análise não foi realizada nas frações de 6 a 8 devido serem agregados muito pequenos, em que não foi possível fazer a segregação dos mesmos na mesa do scanner. Desse modo, o número de agregados utilizados totaliza 175 por amostra, 350 por ponto de coleta, 2100 por área (sendo 1050 de cada camada) e 10500 para a área experimental (sendo 5250 de cada camada).

Os agregados separados nas classes de tamanho acima mencionado foram estudados quanto à sua forma a partir de imagens bidimensionais digitalizadas. Para a obtenção dessas imagens foi utilizado um scanner da marca Epson Expression 10000XL, com capacidade de resolução de 1200 dpi, porém para este estudo e de acordo com a literatura foi utilizado resolução de 300 dpi (Cremon et al., 2011; Carducci et al., 2016), e o posterior processamento das mesmas foi feito pelo software ImageJ (Viana et al., 2016). Cada conjunto de 35 agregados foi organizado sobre o scanner, tomando o cuidado para que os agregados não

tivessem ponto de contato (Figura 1). No momento da obtenção das imagens um objeto graduado foi colocado no vidro do scanner, para evitar eventuais equívocos na conversão dos pixels das imagens para centímetros, o que facilita a discussão dos resultados.

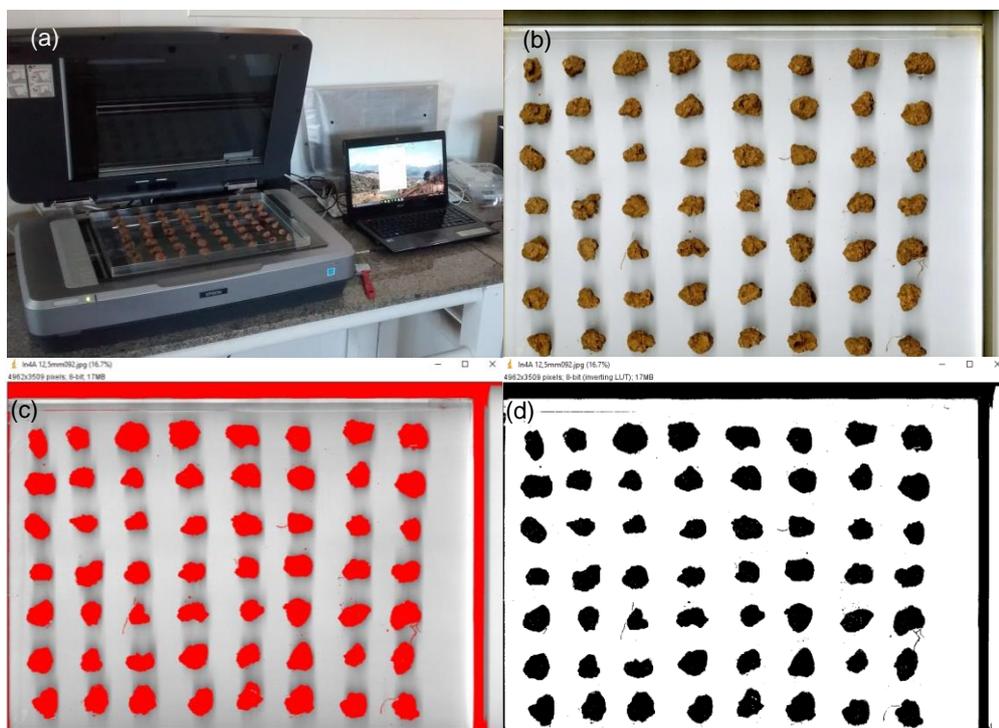


Figura 1. Sequência típica do processamento de imagem no ImageJ. (a) acomodação dos agregados sob o scanner; (b) imagem original obtida no scanner; (c) filtro limiar (*Threshold*); (d) imagem binária após o processamento.

As variáveis avaliadas foram: 1. Área (cm²): medida com o número de pixels convertidos em centímetro no polígono; 2. Maior eixo (cm): é o comprimento da maior linha que pode ser traçada através do objeto; 3. Menor eixo (cm): é o comprimento da maior linha que pode ser traçada através do objeto sendo perpendicular ao maior eixo; 4. Perímetro (cm): comprimento da projeção do limite exterior do agregado; 5. Circularidade ou arredondamento: fornece o resultado entre 0 e 1 e, quanto maior o valor, maior o grau de arredondamento, sendo calculado a partir da fórmula: $(4 \times \pi \times \text{área})/\text{perímetro}^2$; 6. Diâmetro de *Feret*: A média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula (o diâmetro de um círculo que tem a mesma área do objeto); 7. Alongamento: é o quociente entre o menor eixo e o maior eixo. O resultado de alongamento é um valor entre 0 e 1, sendo que se o valor for igual a 1, o objeto é aproximadamente

circular, mas à medida que o valor se afasta de 1, o objeto torna-se mais alongado (Viana et al., 2016).

De forma semelhante a outros trabalhos realizados na presente área de estudo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Costa et al., 2014; Gomes et al., 2018), a análise estatística foi feita admitindo-se um delineamento inteiramente casualizado. Para a análise estatística foram considerados, ainda, os tratamentos em um esquema de parcelas subdivididas, com as coberturas vegetais como parcelas e as duas camadas de amostragem de solo como subparcelas, e os pontos de coleta como repetições. A análise estatística foi realizada usando o programa “Assistat”, incluindo-se a análise de variância experimental, a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e a análise de correlação de Pearson entre as variáveis. Posteriormente, por meio do programa XLStat 7.5 foi realizada a análise de componentes principais (ACP). Com a ACP buscou-se avaliar a dispersão das cinco coberturas vegetais estudadas a partir de variáveis relacionadas com os atributos morfométricos, essa análise foi realizada por separadamente por camada. Também para cada camada foi realizada, ainda, a análise de agrupamento pelo método de Tocher, que permite avaliar a similaridade ou dissimilaridade das coberturas vegetais inter e intragrupos, e também a avaliação da importância de cada variável na variação total disponível entre as coberturas, através do programa estatístico GENES (Cruz et al., 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da distribuição percentual das oito classes de agregados, o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) das diferentes áreas de estudo.

As áreas revegetadas pelas leguminosas arbóreas no geral apresentaram maiores médias nas três classes de agregados de maior tamanho (19-12,5; 12,5-8 e 8-4 mm), mas nas classes seguintes, de menor tamanho, houve distribuição contrária, onde as maiores médias foram para as áreas do pasto e capoeira (Tabela 3). Para o DMP e o DMG as leguminosas não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram das demais áreas.

As áreas das leguminosas aumentaram em 38,6, 26,5 e 10,8% em relação à média da capoeira e pasto para as três classes de maior diâmetro, sendo superior ($p < 0,05$) na classe de 19-12,5 mm. Esses resultados tiveram influência direta no DMP e DMG, pois ambos os índices têm valor maior quanto maior for a proporção da classe de agregados de maior tamanho. Para o índice DMG esse peso das classes de maior diâmetro é um pouco reduzido, e pode-se considerar que ele representa uma estimativa das classes de agregados de maior ocorrência (Hickmann et al., 2011).

Maiores agregados estão relacionados ao maior aporte de material vegetal sobre o solo, sendo que na literatura há diversos trabalhos que tratam do assunto (Matos et al., 2008; Hickmann et al., 2011; Vezzani et al., 2011). Desses trabalhos pode-se verificar que a decomposição da matéria orgânica do solo conduz a um ambiente favorável à agregação, com posterior formação de agregados de tamanho maior.

Para as classes de diâmetro menor que 4 mm a distribuição dos agregados ocorreu de forma diferente das classes de maior diâmetro, com as maiores médias ocorrendo nas áreas da capoeira e pasto, sendo a média destas duas áreas superiores à média das áreas sob leguminosas em 26,31, 24,27, 31,10, 45,46 e 45,30% para as classes 4-2 mm, 2-1 mm, 1-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e $< 0,25$ mm, respectivamente. Esses resultados condizem com os mencionados por Hickmann et al. (2011), que verificaram que os agregados menores são mais estáveis e menos suscetíveis às alterações induzidas por práticas de manejo do solo do que os agregados maiores. Essa definição corrobora parte da teoria de formação hierárquica dos agregados proposta Tisdall e Oades (1982), onde as partículas primárias livres se uniriam pelos agentes ligantes persistentes, como matéria orgânica humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos, formando então os microagregados. Esses, por sua vez, são unidos por agentes ligantes temporários (raízes ou hifas de fungos) e transientes (polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas), resultando em macroagregados.

No presente estudo a introdução das leguminosas favoreceu a agregação, permitindo que fossem formados agregados maiores, o que não ocorreu na capoeira, mesmo essa área sendo usada como de referência da qualidade adequada do solo. Essa condição pouco favorável a formação de agregados

maiores na capoeira pode ter ocorrido por esta ter apresentado menor valor de deposição vegetal sob o solo (Costa et al., 2014). Estes mesmos autores trabalharam com as mesmas áreas deste estudo, exceto o ingá, e avaliaram a produção e acúmulo de serapilheira, encontrando para a capoeira o menor conteúdo de biomassa do folheto, tendo o sabiá conteúdo 50,46% maior.

As diferentes coberturas vegetais afetaram as variáveis morfométricas área, maior e menor eixo, perímetro, circularidade, diâmetro de Feret e alongamento dos agregados do solo nas cinco classes de diâmetro estudadas. De maneira geral, para as classes maiores que 4 mm de diâmetro esses parâmetros foram maiores ($p < 0,05$) no solo sob as leguminosas florestais, embora para a classe de 8-12,5 mm tenha sido observado diferença estatística significativa apenas para a circularidade. A similaridade de comportamento entre as diversas variáveis morfométricas confirma-se pelos coeficientes de correlação significativos e predominantemente positivos que constam na Tabela 5, à exceção da circularidade. Para essa variável as menores médias foram observadas principalmente no pasto, sendo para a classe 12,5-19 mm sem diferir da capoeira, para a classe 4-8 mm sem diferir do sabiá, e para as classes 2-4 mm e 1-2 mm sem diferir do ingá e sabiá.

A área dos agregados retidos na peneira de 12,5 mm de malha foi maior para o ingá (3,19 cm²), não se diferenciando estatisticamente das leguminosas acácia (3,09 cm²) e sabiá (3,06 cm²), mas superando o pasto (2,77 cm²) e a capoeira (2,75 cm²), que não diferiram entre si (Tabela 4). Esses resultados são condizentes com a sua distribuição por tamanho (Tabela 3), uma vez que o solo sob essas coberturas vegetais mostram predomínio de agregados maiores nas classes de maior diâmetro.

Cremon et al. (2009), trabalhando com análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso, relataram que as diferenças de área dos agregados se devem ao aporte de material vegetal ao solo. Agregados maiores são geralmente indicativos de boa qualidade, uma vez que eles possuem uma distribuição de tamanho de poros que melhoram a relação ar-água e favorecem o melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Cremon et al., 2009; Carducci et al., 2016).

Tabela 3. Distribuição das classes de agregados dos solos sob diferentes coberturas vegetais no Norte Fluminense – RJ

Cobertura Vegetal	19-12,5 mm	12,5-8 mm	8-4 mm	4-2 mm	2-1 mm	1-0,5 mm	0,5-0,25 mm	<0,25 mm	DMP	DMG
0-10 cm										
-----%-----										
										mm
Capoeira	11,75	14,37	21,60 bcA	13,57 aA	13,68 aA	14,25 bA	7,38 bA	3,38	5,37	2,91
Pasto	10,56	11,19	17,59 cB	13,11 aB	13,26 abB	19,58 aA	11,89 aA	2,80	4,65	2,33
Acácia	16,08	15,19	29,54 aA	9,25 bB	10,90 cB	11,73 bA	6,03 bA	1,26	6,41	3,89
Ingá	18,41	15,72	23,69 bA	9,70 bA	11,28 bcA	11,94 bA	7,99 bA	1,25	6,51	3,75
Sabiá	17,14	20,16	24,00 bA	10,54 bA	8,42 dA	11,30 bA	5,84 bA	2,58	6,76	3,98
Média	14,78 A	15,33 B	23,28	11,23	11,51	13,76	7,83	2,26 A	5,94 B	3,37 B
10-20 cm										
Capoeira	13,42	15,80	21,51 aA	12,15 bcA	12,28 bA	13,63 abA	7,85 abA	3,31	5,71	3,16
Pasto	9,60	12,15	22,90 aA	14,80 aA	14,97 aA	14,52 aB	9,10 aB	1,95	4,94	2,76
Acácia	20,23	15,66	19,78 aB	12,95 abA	14,69 aA	10,09 bcA	5,37 cA	1,21	6,68	3,95
Ingá	20,21	18,82	24,00 aA	10,39 cA	11,92 bA	7,68 cB	6,00 bcB	0,98	7,12	4,44
Sabiá	18,95	23,73	22,26 aA	11,44 bcA	9,52 cA	7,97 cB	4,02 cB	1,09	7,31	4,63
Média	16,48 A	17,23 A	22,09	12,35	12,67	10,78	6,47	1,91 B	6,35 A	3,79 A
0-20 cm (Média das camadas)										
Capoeira	12,59 b	15,09 b	21,56	12,86	12,98	13,94	7,62	3,35 a	5,54 b	3,03 b
Pasto	10,07 b	11,67 c	20,24	13,95	14,11	17,05	10,50	2,38 b	4,80 b	2,54 b
Acácia	18,15 a	15,43 b	24,66	11,10	12,79	10,91	5,70	1,24 c	6,55 a	3,92 a
Ingá	19,31 a	17,27 b	23,84	10,04	11,60	9,81	7,00	1,12 c	6,82 a	4,10 a
Sabiá	18,04 a	21,95 a	23,12	10,99	8,97	9,64	4,93	2,33 b	7,04 a	4,31 a
Méd. Geral	15,63	16,28	22,68	11,79	12,09	12,27	7,15	2,08	6,15	3,58
CV% Parcela	27,53	16,89	14,78	10,68	11,29	21,32	23,77	26,86	11,34	15,00
CV% Subparcela	23,43	12,14	13,44	10,98	11,16	13,73	17,21	19,92	9,19	10,13

Para cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula (que compara coberturas vegetais) ou de mesma letra maiúscula (que compara as camadas) não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Esses resultados podem ser confirmados pela análise de correlação de Pearson (Tabela 6), em que a variável área do agregado teve correlação positiva significativa com a porosidade total e com os macroporos tanto para a classe 19-12,5 mm ($R = 0,30^*$ e $R = 0,29^*$, respectivamente) quanto para a classe 4-2 mm ($R = 0,37^{**}$ e $R = 0,50^{**}$, também respectivamente).

Em áreas degradadas ou em recuperação o ideal é que se busque manejar o solo com o objetivo de obter agregados de maior diâmetro, pois uma condição estrutural adequada influencia os regimes de água, ar e calor do solo. Neste estudo as áreas revegetadas forneceram valores iguais ou às vezes até superiores aos da capoeira em todas as classes de tamanho, revelando o efeito positivo da revegetação na formação de agregados do solo maior.

De maneira geral o comprimento do maior e do menor eixo acompanharam o padrão dos resultados estatísticos já descrito para a variável área de agregado. Para os agregados retidos na peneira de malha de 12,5 mm as leguminosas não se diferenciaram quanto ao menor eixo, mas foram estatisticamente superiores à capoeira e ao pasto, os quais também não diferiram entre si. Apesar de algumas diferenças entre os resultados dos eixos menor e maior, estas não foram suficientes para influenciar o alongamento, cujo cálculo é feito pela razão entre os citados eixos, não sendo observadas diferenças estatísticas ($p < 0,05$) para os agregados retidos nessa peneira.

Em relação a variável alongamento esperava-se que o manejo que promove menor perturbação do solo pudesse mostrar menores valores, em razão da menor quebra de agregados, induzindo o crescimento da estrutura preferencialmente em uma direção (Hickmann et al., 2011). Neste trabalho houve pouca variação dos valores de alongamento, sendo que todos apresentaram valores superiores a 0,63, indicando que os agregados têm por suas características um formato mais arredondado ou quadrado (Tabela 4).

Para o perímetro houve poucas alterações estatísticas entre as coberturas e entre as camadas estudadas. De acordo com Cremon et al. (2011), o perímetro do agregado tem relação direta com a sua área, pois quanto maior o agregado, maior o comprimento de sua borda. Neste estudo constatou-se que essa relação foi parcialmente afetada, pois para a peneira de 12,5 mm de malha não houve diferença estatística para o perímetro, embora, como já mencionado, para a área do agregado houve diferenças estatísticas.

Tabela 4. Atributos morfométricos dos agregados dos solos sob diferentes coberturas vegetais no Norte Fluminense - RJ.

Cobertura e camada	Área -(cm ²)-	Maior eixo -----	Menor eixo -----	Perímetro -----	Circularidade	Feret	Alongamento
12,5 mm							
Capoeira	2,75 b	2,10 c	1,64 b	8,49 a	0,48 b	2,29 b	0,78 a
Pasto	2,77 b	2,12 bc	1,65 b	8,43 a	0,50 b	2,28 b	0,78 a
Acácia	3,06 a	2,20 abc	1,74 a	8,50 a	0,53 a	2,35 ab	0,79 a
Ingá	3,19 a	2,26 a	1,77 a	8,69 a	0,53 a	2,41 a	0,78 a
Sabiá	3,09 a	2,21 ab	1,75 a	8,57 a	0,53 a	2,36 ab	0,79 a
CV%	7,24	3,98	3,66	3,86	3,72	3,46	1,79
0-0,10	2,98 a	2,19 a	1,70 a	8,59 a	0,50 a	2,35 a	0,78 a
0,10-0,20	2,96 a	2,17 a	1,71 a	8,48 a	0,52 a	2,33 a	0,79 a
CV%	6,83	3,59	3,68	4,19	4,35	3,48	2,49
8,0 mm							
Capoeira	1,21 a	1,42 a	1,07 a	5,32 a	0,54 a	1,53 a	0,75 a
Pasto	1,23 a	1,43 a	1,08 a	5,48 a	0,52 b	1,55 a	0,75 a
Acácia	1,24 a	1,43 a	1,08 a	5,28 a	0,55 a	1,53 a	0,76 a
Ingá	1,21 a	1,45 a	1,07 a	5,31 a	0,56 a	1,56 a	0,74 a
Sabiá	1,25 a	1,47 a	1,09 a	5,39 a	0,56 a	1,58 a	0,74 a
CV%	7,05	6,04	4,32	5,86	3,36	6,72	4,61
0-0,10	1,24 a	1,47 a	1,08 a	5,49 a	0,53 b	1,59 a	0,74 a
0,10-0,20	1,21 a	1,41 b	1,07 a	5,22 b	0,56 a	1,51 b	0,76 a
CV%	5,89	6,75	3,07	4,82	3,01	6,60	6,13
4,0 mm							
Capoeira	0,49 ab	0,93 ab	0,66 ab	3,11 ab	0,63 a	1,00 ab	0,70 a
Pasto	0,47 b	0,91 b	0,66 ab	3,05 ab	0,64 a	0,97 b	0,72 a
Acácia	0,51 a	0,96 a	0,67 a	3,16 a	0,64 a	1,03 a	0,70 a
Ingá	0,51 a	0,96 a	0,67 a	3,14 a	0,65 a	1,02 a	0,70 a
Sabiá	0,47 b	0,92 b	0,65 b	3,02 b	0,65 a	0,98 b	0,71 a
CV%	4,94	3,19	2,76	3,08	2,30	3,34	3,05
0-0,10	0,50 a	0,95 a	0,66 a	3,16 a	0,63 b	1,01 a	0,69 b
0,10-0,20	0,48 a	0,92 b	0,66 a	3,04 b	0,66 a	0,98 b	0,72 a
CV%	4,67	3,19	2,83	3,00	2,18	3,15	3,72
2,0 mm							
Capoeira	0,16 a	0,55 a	0,36 a	1,74 a	0,67 b	0,58 a	0,67 b
Pasto	0,14 b	0,50 b	0,36 a	1,59 b	0,71 a	0,53 b	0,72 a
Acácia	0,15 ab	0,51 ab	0,36 a	1,63 ab	0,68 ab	0,55 ab	0,70 ab
Ingá	0,15 ab	0,52 ab	0,35 ab	1,65 ab	0,67 b	0,55 ab	0,68 ab
Sabiá	0,14 b	0,50 b	0,34 b	1,61 b	0,67 b	0,54 b	0,70 ab
CV%	6,02	6,87	2,29	6,41	2,61	6,65	5,42
0-0,10	0,15 a	0,52 a	0,36 a	1,65 a	0,68 a	0,59 aA	0,69 a
0,10-0,20	0,14 b	0,51 a	0,36 a	1,64 a	0,68 a	0,53 bA	0,70 a
CV%	5,40	4,90	2,00	4,82	2,18	4,64	3,87
1,0 mm							
Capoeira	0,034 b	0,255 b	0,171 a	0,812 b	0,701 a	0,278 b	0,682 a
Pasto	0,031 b	0,235 b	0,170 a	0,754 b	0,723 a	0,257 b	0,719 a
Acácia	0,040 a	0,350 a	0,170 a	1,047 a	0,640 b	0,370 a	0,531 b
Ingá	0,031 b	0,240 b	0,168 a	0,768 b	0,705 a	0,258 b	0,713 a
Sabiá	0,032 b	0,241 b	0,169 a	0,772 b	0,706 a	0,263 b	0,701 a
CV%	8,91	19,75	4,60	14,63	4,40	18,69	11,03
0-0,10	0,034 a	0,268 a	0,168 a	0,844 a	0,692 a	0,289 a	0,653 a
0,10-0,20	0,033 a	0,258 a	0,171 a	0,817 a	0,698 a	0,282 a	0,686 a
CV%	14,14	24,74	5,29	18,75	5,92	22,67	11,73

Para cada coluna, médias seguidas de mesma letra (que compara coberturas vegetais) ou de mesma letra (que compara as camadas), não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$)

Diferenças na análise estatística nos agregados menores (peneira de 4, 2 e 1 mm) foram semelhantes às aquelas apresentadas pela área do agregado, exceto para os resultados da peneira de 4 mm de malha, onde o pasto não se diferenciou da capoeira nem do sabiá. Apesar dessas diferenças, em todos os tamanhos de agregados houve, conforme consta na Tabela 5, correlações positivas significativas da área com o perímetro (0,73**, 0,68**, 0,85**, 0,77**, 0,81**) para todas as peneiras avaliadas (12,5, 8, 4, 2 e 1 mm de malha, respectivamente).

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre os atributos morfométricos dos agregados do solo (camadas 0 0,10 m e 0,10 0,20 m) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

	Maior eixo	Menor eixo	Perímetro	Circularidade	Feret	Alongamento
12,5 mm						
Área	0,89**	0,97**	0,73**	0,43**	0,93**	0,33*
Maior		0,97**	0,63**	0,53**	0,83**	
Menor			0,73**	0,92**		
Perímetro				-0,29*	0,87**	-0,29*
Circula.						0,51**
Feret						
8 mm						
Área	0,28*	0,55**	0,68**		0,52**	-0,83**
Maior		0,90**	0,47**			0,30*
Menor						
Perímetro				-0,68**	0,89**	-0,58**
Circula.					-0,38**	0,25*
Feret						-0,82**
4 mm						
Área	0,35**	0,85**	0,85**		0,84**	-0,71**
maior		0,78**	0,49**		0,38**	0,40**
menor			0,85**		0,85**	
Perímetro				-0,67**	0,94**	-0,52**
Circula.					-0,57**	0,67**
Feret						-0,67**
2 mm						
Área	0,40**	0,83**	0,77**	-0,42**	0,80**	-0,91**
maior		0,79**	0,40**		0,38**	
menor			0,78**	-0,42**	0,80**	-0,61**
Perímetro				-0,65**	0,98**	-0,87**
Circula.					-0,61**	0,65**
Feret						-0,92**
1 mm						
Área			0,81**	-0,50**	0,79**	-0,93**
Maior		0,41**		0,26*		0,27*
menor			0,81**	-0,50**	0,79**	-0,74**
Perímetro				-0,73**	0,98**	-0,94**
Circula.					-0,63**	0,72**
Feret						-0,93**

* e ** significativos ($p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente). Coeficientes não significativos não foram apresentados na tabela.

Para a circularidade dos agregados, valores menores ou próximos de 0,50 indicam que os agregados possuem um formato mais alongado. Os agregados foram mais arredondados quanto menores foram os seus diâmetros, sendo que na peneira de 12,5 mm de malha os valores médios foram de 0,51 e na de 1 mm de malha foi de 0,70, resultando em agregados mais circulares (Tabela 4).

Tabela 6. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre os atributos morfométricos dos agregados e os atributos físicos (camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau Floc.	DS	Pt	Macro	Micro	DMP	DMG
12 mm											
Área						0,30*	0,30*	0,29*		0,68**	0,60**
Maior							0,36**	-0,36**	-0,36**	0,61**	0,52**
Menor							0,29*	-0,29*	-0,28*	0,73**	0,64**
Perímetro										0,34**	0,26*
Circula.						0,45**	-0,45**	-0,46**	0,36**	0,51**	0,51**
Feret										0,56**	0,46**
Alongamento						0,28*	-0,28*	-0,32*	0,31*	0,30*	0,31*
8 mm											
Área											
Maior											
Menor											
Perímetro	0,28*		-0,28*	-0,29*	0,32*						
Circula.										0,50**	0,53**
Feret	0,30*		-0,30*	-0,28*	0,25*						
Alongamento	-0,33**		0,33**	0,28*							
4 mm											
Área maior menor											
Perímetro	0,31*	-0,25*	-0,28*	-0,34**					-0,41**		
Circula.	-0,47**	0,45**	0,40**	0,45**		0,27*	-0,27*	-0,40**	0,51**	0,42**	0,44**
Feret	0,32*		-0,31**	-0,37**					-0,37**		
Alongamento	-0,46**	0,29*	0,45**	0,46**				-0,27*	0,34**		
2 mm											
Área maior menor											
Perímetro		-0,35**		-0,30*	0,41**	-0,37**	0,37	0,50**	-0,57**		
Circula.		-0,29*		0,35**				0,30*	-0,40**		
Feret		-0,35**		-0,30*	0,41**	-0,37**	0,37**	0,50**	-0,57**	-0,29*	-0,31*
Alongamento						-0,40**	0,40**	0,43**	-0,38**		
Circula.						0,36**	-0,36**	-0,32*		-0,40**	-
Feret					0,26*	-0,42**	0,42**	0,46**	-0,42**		0,41**
Alongamento						0,40**	-0,40**	-0,42**	0,38**		
1 mm											
Área maior menor											
Perímetro						0,26*	-0,26*				
Circula.											
Feret						0,28*	-0,28*				
Alongamento	-0,30*	0,30*	0,26*	0,28*		-0,30*	0,30*				

* e ** significativos ($p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente). Coeficientes não significativos não foram apresentados na tabela. Arg.Disp: argila dispersa, Grau floc.: grau de flocculação, DS: densidade do solo, distribuição na escala usual: macroporos (macro: diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos (micro: diâmetro $\leq 50 \mu\text{m}$), DMP: diâmetro médio ponderado, DMG: diâmetro médio geométrico.

Riva (2010) cita, em seu trabalho, que o arredondamento é uma medida do grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de um agregado, portanto reflete características de percolação e transporte de sedimentos para o interior do perfil do solo. Hickmann et al. (2011) relatam, no seu trabalho sob esse atributo, que maiores

valores de arredondamento (circularidade) deverão ser encontrados em manejos mais destrutivos à estrutura, pois estes terão sua rugosidade externa destruída tendo como consequência na diminuição do perímetro.

Tabela 7. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre os atributos morfométricos dos agregados e os atributos químicos (camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

	C	N	P	pH	H+Al	SB	CTC _{efet}	CTC _{pH=7}
12 mm								
Área								
Maior	0,29*							
Menor								
Perímetro								
Circula.					-0,28*		0,27*	
Feret								
Alongamento								
8 mm								
Área								
Maior					0,30*			0,29*
Menor								
Perímetro	0,26*		0,27*		0,27*			
Circula.	-0,27*		-0,25*					
Feret								
Alongamento								
4 mm								
Área						0,34**	0,30*	
maior								
menor						0,34**	0,30*	
Perímetro	0,27*					0,38**	0,28*	0,25*
Circula.	-0,33**					-0,27*		
Feret						0,43**	0,34**	0,31*
Alongamento		-0,29*				-0,42**	-0,33**	-0,34**
2 mm								
Área	0,46**	0,44**			0,27*	0,26*	0,26*	0,36**
Maior	0,30*							
menor	0,46**	0,44**			0,27*	0,26*	0,26*	0,37**
Perímetro	0,31*	0,32*			0,34*			0,32*
Circula.		-0,32*					-0,31*	-0,30*
Feret	0,34**	0,32**			0,33**			0,33**
Alongamento					-0,32*			
1 mm								
Área		0,29*		0,39**		0,45**	0,36**	0,34**
Maior								
menor		0,29*		0,38*		0,45**	0,36**	0,34**
Perímetro						0,36**	0,27*	
Circula.						-0,46**	-0,36**	-0,28*
Feret						0,29*		
Alongamento						-0,42**	-0,30*	

* e ** significativos ($p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente). Coeficientes não significativos não foram apresentados na tabela. C: carbono do solo, N: nitrogênio, P: fósforo, pH: acidez do solo, H+Al: hidrogênio mais alumínio, SB: soma de bases, CTC_{efet.}: capacidade de troca catiônica efetiva, CTC_{pH=7}: capacidade de troca catiônica a pH=7.

O teste de correlação de Pearson mostrou que a circularidade em três das cinco classes estudadas apresentou correlação negativa significativa com a

porosidade total e com os macroporos, podendo-se inferir que quanto mais circular o agregado for, haverá uma diminuição da quantidade de poros nos solos, possivelmente pelo arranjo dos agregados que irão sobrepor uns aos outros, diminuindo assim a presença de poros.

Pela Tabela 6, verifica-se que atributos morfométricos de agregados retidos nas três peneiras intermediárias, de 8 e 4 mm, correlacionaram-se com atributos granulométricos, enquanto para os agregados menores, das classes 4-2 mm e 2-1 mm foram relevantes os atributos relacionados à estrutura do solo (DS, PT, macroporos e microporos). Pela Tabela 7 verifica-se que as correlações dos atributos morfométricos com os atributos químicos são significativas principalmente para os agregados de menor diâmetro, sendo os atributos associados à matéria orgânica (teores de C e N) relevantes principalmente para os agregados retidos na peneira de 2 mm, enquanto os atributos indicativos da disponibilidade de cargas no solo (H+Al, SB, CTC) são relevantes para os agregados com diâmetro inferior a 8 mm.

Análise de componentes principais e de agrupamento pelo método de Tocher

A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para explicar a variação total entre as áreas referências (preservada e degradada) e as revegetadas com leguminosas arbóreas de acordo com atributos morfométricos do solo estudados. Na ACP da camada 0-0,10 m do solo verificou-se que 84,81% da variação total entre os sistemas estudados estiveram associadas aos dois primeiros componentes principais (Figura 1a). Desses atributos, os mais fortemente correlacionados com o componente principal 1 (CP1) foram área, maior eixo, menor eixo, diâmetro de Feret, que explicaram 60,5% da dissimilaridade entre os sistemas. Já o componente principal 2 (CP2) explicou 24,31% da variação entre os sistemas, e teve como atributos mais relevantes a circularidade e o alongamento (Tabela 8).

Observa-se na Figura 1 que as áreas apresentaram separações distintas pela ACP de acordo com a camada de solo avaliada. A capoeira, área com a qual se busca uma aproximação das áreas revegetadas pelas leguminosas arbóreas, se posicionou no quadrante inferior esquerdo (Figura 1a) e ficou isolada das demais áreas, relacionado com a CP1. No quadrante superior esquerdo ficou a área do

pasto também isolada e associada ao CP2. As áreas revegetadas pelas leguminosas arbóreas tiveram sua distribuição em dois quadrantes, sendo que o ingá e o sabiá ficaram no quadrante superior direito, associadas ao CP1 e com as variáveis circularidade e área contribuindo para essa distinção, e a acácia se posicionou no quadrante inferior direito, associada ao CP2.

Na ACP realizada para a camada 0,10-0,20 m verificou-se um padrão de distribuição diferente dos resultados da camada 0-0,10 m. Nesse caso as duas componentes principais explicaram 98,31% da variação total dos sistemas, tendo a CP1 explicado 61,83% e a CP2 36,48% (Figura 1b). As variáveis perímetro, maior eixo, diâmetro de Feret e alongamento estiveram correlacionadas com a CP1 e área, menor eixo e circularidade com a CP2 (Tabela 8).

Tabela 8. Análise de componentes principais (ACP) das variáveis morfométricas (camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m) sob diferentes coberturas vegetais, em Conceição de Macabú, RJ.

Componente da variância	Camada 0-0,10 m (Figura 2a)		Camada 0,10-0,20 m (Figura 2b)	
	CP1	CP2	CP1	CP2
Variáveis da ACP	Cargas fatoriais das componentes principais			
Área	0,97	0,23	0,65	0,76
Perímetro	0,20	-0,10	0,98	0,16
Maior	0,98	-0,13	0,94	0,32
Menor	0,99	0,02	0,57	0,82
Circularidade	0,38	0,91	-0,15	0,98
Feret	0,97	-0,13	0,96	0,29
Alongamento	-0,48	0,88	-0,89	0,37

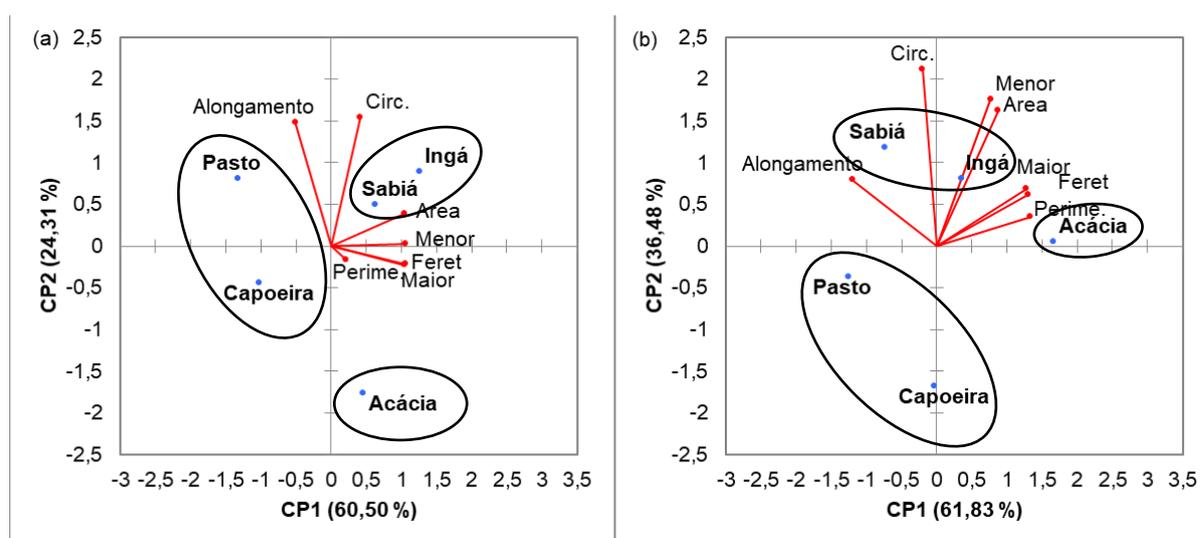


Figura 1. Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais dos atributos morfométricos, (a) camada 0-0,10 m, (b) camada 0,10-0,20 m. Circu.: circularidade, perime.: perímetro, maior: maior eixo, menor: menor eixo, feret: diâmetro de Feret.

As áreas capoeira e pasto localizaram-se no quadrante inferior esquerdo, sendo a capoeira relacionada ao CP2 e o pasto ao CP1. Em relação às posições das áreas das leguminosas nessa camada 0,10-0,20 m houve diferenças em relação ao verificado na camada 0-0,10 m, pois a acácia e o ingá posicionaram-se no quadrante superior direito com a acácia associada ao CP2 e o ingá ao CP1, enquanto o sabiá ficou isolado no quadrante superior esquerdo próximo ao CP1.

Esse conjunto de resultados, tanto da camada 0-0,10 m quanto da 0,10-0,20 m, sugere que mudanças na cobertura vegetal promovem alterações no material orgânico depositado e sua taxa de decomposição, o que leva as mudanças nos atributos do solo (Li et al., 2015). O posicionamento de algumas áreas revegetadas no mesmo quadrante provavelmente ocorreu devido ao tempo de implementação do sistema serem os mesmos, diferente do ocorrido com as áreas tidas como referência.

Os mesmos atributos do solo utilizados na ACP foram usados na análise de agrupamento pelo método de Tocher e permitiu a formação de três grupos, representados na Figura 1a pelas elipses, sendo o primeiro formado pelas coberturas usadas como referência (capoeira e pasto), o segundo por áreas pertencentes ao mesmo quadrante (ingá e sabiá) e o terceiro isolado das demais formado pela acácia. A separação ocorreu de forma praticamente equitativa entre as variáveis, com o perímetro contribuindo com 17% para a distinção (maior valor), seguido da área e circularidade, ambas com contribuição de 16%, e as demais variáveis, com contribuições entre 10% e 13%.

Na Figura 1b a distribuição dos grupos pelo método de Tocher representados pelas elipses se deu da mesma forma que na Figura 1a com ingá e sabiá formando um grupo, capoeira e pasto formando o outro grupo e a acácia permanecendo isolada das demais. Houve uma diferenciação na contribuição das variáveis em relação as da Figura 1a para a distinção dos grupos em que a área contribuiu com 19% (maior valor) seguido do menor eixo com 16%, e as demais com contribuições entre 12% e 14%.

CONCLUSÕES

As leguminosas foram mais promissoras na formação de agregados maiores, possivelmente pela qualidade da matéria orgânica do solo. A distribuição

de agregados por classes de diâmetro mostrou-se sensível as alterações de manejo sendo um promissor indicador de qualidade física do solo.

A análise de imagens mostrou-se sensível há mudanças na morfologia dos agregados do solo, em todas as classes estudadas. Nos agregados retidos na peneira de maior malha 12,5 mm ficou evidente a melhora no atributo morfométrico área.

A dissimilaridade entre as coberturas vegetais variou de acordo com a camada de solo estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bronick C.J.; Lal. R. (2005) Soil structure and management: A review. *Geoderma*, v.124, p.3-22.
- Carducci, C.E.; Vitorino, A.C.T.; Serafim, M.E.; Silva, E.A. (2016) Aggregates morphometry in a Latosol (Oxisol) under different soil anagement systems. *Semina: Ciências Agrárias*, v.37, n.1, p.33-42.
- Collins, T.J. (2007) ImageJ for microscopy. *Bio Techniques* 43 (1 Suppl): 25–30.
- Costa Júnior, C.; Píccolo, M.C.; Siqueira Neto, M.; Camargo, P.B.; Cerri, C.C.; Bernoux, M. (2012) Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no Bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.4, p.1311-1321.
- Costa, M.G.; Gama-Rodrigues, A.C.; Zaia, F.C.; Gama-Rodrigues, E.F. (2014) Leguminosas arbóreas para recuperação de áreas degradadas com pastagem em Conceição de Macabu, Rio de Janeiro, Brasil. *Sci. For.*, v.42, p.101-112.
- Cremon, C.; Rosa Júnior, E.J.; Serafim, M.E.; Ono, F.B. (2009) Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo vermelho distroférico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum- Agronomy*, v.31, n.1, p.139-146.
- Cremon, C.; Sacco, D.; Grignani, C.; Rosa Júnior, E.J.; Mapeli, N.C. Micromorfometria de agregados do solo sob diferentes sistemas de cultivo de arroz. *Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia*, v. 41, n. 3, p. 370-377.

- Cruz, C.D.; Regazzi, A.J.; Carneiro, P.C.S. (2004) Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. vol. 1 ed. Universidade Federal de Viçosa.
- Dadalto, G.G.; Costa, L.M.; Moura Filho, W. (1989) Alterações em características físicas de solos cultivados com pastagem. R. Ceres, v.36, p.317-329.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 573p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. Brasília: Embrapa.
- Fernandes, M.R. (1982) Alterações em propriedades de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, fase cerrado, decorrentes da modalidade de uso e manejo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 65p. (Tese de Mestrado).
- Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Paulino, G.M.; Franco, A.A. (2008) Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do Estado do Rio de Janeiro. R. Bras. Ci. Solo., v.32, p.1521-1530.
- Gomes, D.S.; Marciano, C.R.; Faustino, L.L. (2018) Physical quality of a Typic Hapludult soil under forest leguminous trees and pasture. Floresta e Ambiente, v.25, p.xx-xx.
- Hickmann, C.; Costa, L.M.; Schaefer, C.E.G.R.; Fernandes, R.B.A. (2011) Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos de longa duração e Mata Atlântica secundária. R. Bras. Ci. Solo, v.35, p.2191-2198.
- Matos, E.S.; Sá Mendonça, E.; Leite, L.F.C.; Galvão, J.C.C. (2008) Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. Pesq. Agropec. Bras., v.43, p.1221-1230.
- Olszewski, N.; Costa, L.M.; Fernandes Filho, E.I.; Ruiz, H.A.; Alvarenga, R.C.; Cruz, J.C. (2004) Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. R. Bras. Ci. Solo, v.28, p.901-909.
- Prakongkep, N.; Suddhiprakarn, A.; Kheoruenromne, I.; Gilkes, R.J. (2010) SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils. Geoderma, v.156, p.20-31

- Rasband, W.S. (2004) ImageJ. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>> Acesso em: 19/05/2017.
- Riva, R.D.D. (2010) Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados. Tese: Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa-UFV.
- Salton, J.C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Boeni, M.; Conceição, P.C.; Fabrício, A.C.; Macedo, M.C.M.; Broch, D.L. (2008) Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. R. Bras. Ci. Solo., v.32, p.11-21.
- Tirloni, C.; Vitorino, A.C.T.; Bergamin, A.C.; Souza, L.C.F. (2012) Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, MG, v.36, n.4, p.1299-1309.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soil. J. Soil Sci., v.33, p.141-163.
- Vezzani, F.M.; Mielniczuk, J. (2011) Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. R. Bras. Ci. Solo, v.35, p.213-223.
- Viana, J.H.M.; Clemente, E.P.; Oliveira, A.P. (2016) Procedimento Operacional Padronizado para Quantificação e Mensuração de Areias Via Análise de Imagens. Comunicado Técnico, 73. EMBRAPA - SOLOS.
- Viana, J.H.M.; Fernandes Filho, E.I.; Schaefer, C.E.G.R. (2004) Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, v.28, p.11-19.
- .

4 RESUMO E CONCLUSÕES

A qualidade do solo está diretamente relacionada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas manejados ou naturais, com a capacidade em sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e proporcionar o crescimento e a saúde de plantas e animais. Os dois principais mecanismos que desencadeiam a degradação do solo são a compactação e a degradação da matéria orgânica. A implantação de sistemas florestais com leguminosas é uma das estratégias para a recuperação de áreas degradadas, pois essas plantas melhoram a fertilidade do solo (fixação biológica do N atmosférico e reciclagem de nutrientes), aumentam o teor de matéria orgânica, otimizam a atividade biológica, aumentam o estoque de carbono no solo e melhoram as propriedades físicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da revegetação com espécies leguminosas florestais para a recuperação da qualidade física de um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabú-RJ, a partir da resistência tênsil dos agregados e resistência do solo à penetração, o uso do indicador intervalo hídrico ótimo (IHO) e as densidades críticas dele decorrentes, de seus atributos morfométricos e a distribuição de agregados por tamanho. O trabalho foi conduzido na Fazenda Carrapeta, no Município de Conceição de Macabú - RJ. A área experimental constitui-se de cinco coberturas vegetais lateralmente adjacentes na mesma encosta: *Acacia auriculiformis* (acácia); *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá); *Inga spp* (ingá); pastagem degradada (pasto); e mata secundária (capoeira). Enquanto a capoeira não sofre manejo há mais de 50 anos e a implantação (ou surgimento) da pastagem remonta a década de 1930, as três primeiras (leguminosas arbóreas) foram implantadas em 1998, em talhões de 1500 m² (75 m x 20 m). Em julho de

2015 foram coletadas amostras nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade. Conclui-se deste trabalho que os atributos físicos dos solos ligados à resistência seja de agregados ou a penetração foram fortemente alterados pelas leguminosas arbóreas. Os atributos avaliados foram responsivos as alterações de manejo, podendo ser considerados bons indicadores de qualidade do solo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anjos, L.H.; Fernandes, M.R.; Pereira, M.G.; Franzmeier, D.P. (1998) Landscape and pedogenesis of an Oxisol-Inceptisol- Ultisol sequence in southeastern Brazil. Soil Science Society of America Journal , v.62, n.6, p.1651-1658.
- Alvarenga, C. C. (2012) Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Araújo Filho, J. A.; Sousa, F. B.; Silva, N. L.; Bezerra, T. S. (2007) Avaliação de leguminosas arbóreas, para recuperação de solos e repovoamento em áreas degradadas, Quixeramobim-CE. Rev. Bras. de Agroecologia/out.
- Araújo, E. A.; Ker, J. C.; Neves, J. C. L.; Lani, J. L. (2012) Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia v.5, n.1 jan/abr.
- Assis, C. P.; Jucksch, I.; Mendonça, E. S.; Neves, J. C. L. (2006) Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.10, p.1541-1550, out.
- Barbosa, T.R.L. (2012) Atributos físicos do solo sob espécies florestais da mata atlântica na região serrana Fluminense., 81p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

- Bicalho, I. M. (2011) Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. v.12, p.37-51.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução técnica; Igo Fernando Lepsch. 3. ed. Porto Alegre.
- Beutler, A.N.; Centurion, J.F. (2003) Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 38:849-856.
- Campos, B. C.; Reinert, D. J.; Nicolodi, R.; Cassol, L. C. (1999) Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. R. Bras. Ci. Solo, 23:383-391.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. (2006) Efeitos da compactação em atributos do solo. Artigo em hipertexto. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>>.
- Carducci, C. E.; Vitorino, A. C. T.; Serafim, M. E.; Silva, E. A. (2016) Aggregates morphometry in a Latosol (Oxisol) under different soil management systems. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 37, n. 1, p. 33-42, jan./fev.
- Carvalho, J. M.; Mapeli, Cremon, C.; Mapeli, N. C.; Nunes, M. C. M.; Silva, W. M.; (2011) Magalhães, W. A.; Santos, A. S. Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de cultivo. Revista Agrarian Dourados, v.3, n.10, p.275-285.
- Costa, F. S.; Bayer, C.; Albuquerque, J. A.; Fontoura S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. Ciência Rural, Santa Maria: v.34, n.2, p.587-589, mar-abr, 2004.
- Costa, G. S.; Franco, A. A.; Damasceno, R. N.; Faria, S. M. (2004) Aporte de nutrientes pela serapilheira em uma área degradada e revegetada com Leguminosas arbóreas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28. p.919-927.

- Cremon, C.; Rosa Júnior, E. J.; Serafim, M. E.; Ono, F. B. (2009) Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 31, n. 1, p. 139-146.
- Cremon, C.; Sacco, D.; Grignani, C.; Rosa Júnior, E. J.; Mapeli, N. C. (2011) Micromorfometria de agregados do solo sob diferentes sistemas de cultivo de arroz. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 370-377, jul./set.
- Dexter, A. R. (1988) Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199–238.
- Dexter, A.R. e Watts, (2000) C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. eds. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker. p.401-430.
- Doran, J. W.; Parkin, T.B. (1994) Defining and assessing soil quality. In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F.; Stewart, B. A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society American. p. 3-21. (Special Publication, 35).
- Espíndola, J. A.; Almeida, D. L.; Guerra, J. G. M. (2004) Estratégias para utilização de leguminosas para adubação verde em unidades de produção agroecológica. *Documentos Embrapa Agrobiologia* ISSN 1517-8498.
- Ferreira, A. O.; Moraes Sá, J. C.; Giarola, N. F. Balarezo.; Harms, M. G.; Miara, S.; Bavoso, M. A.; Briedis, C.; Quadros Netto, C. (2011) Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:437-445.
- Ferreira, M. M. (2010) Caracterização física do solo. In: Jong van Lier, Q. de (ed.). *Física do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.283-298.
- Franco, A. A.; Campello, E. F.; Monteiro, E. M. da S.; Faria, S. M. (1992) *Revegetação de solos degradados*. Seropédica: EMBRAPA-CNPBS.
- Freddi, O. S.; Carvalho, M. P.; Júnior, V. V.; Carvalho, G. J. (2006) Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.113-121, jan./abr.

- Gama-Rodrigues, E. F.; Gama-Rodrigues, A. C.; Paulino, G. M.; Franco, A. F. (2008) Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira Ciência Solo*, 32:1521-1530.
- Guariz, H. R.; Campanharo, W. A.; Picoli, M. H. S.; Cecílio, R. A.; Hollanda, M. P. (2009) Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 7709-7716.
- Guerra, A. J.T. (1990) O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. *Anuário do Instituto de Geociências*, Vol. 13, pp. 43 - 52
- Imhoff, S. D. C. (2002) Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Imhoff, S.; Pires da Silva, A.; Dexter, A. (2002) Factors Contributing to the Tensile Strength and Friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1656–1661
- Jong van Lier, Q. de (2010) Disponibilidade de água às plantas. In: Jong van Lier, Q. de (ed.). *Física do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.283-298.
- Jong van Lier, Q. de e Albuquerque, J. A. (1997) Método para calcular o diâmetro médio de agregados de solos. *R. bras. Ci. Solo*, Viçosa, 21:699-705.
- Larson, W. E. e Pierce, F. J. (1994) The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management, in *Defining Soil Quality for Sustainable Environment*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society American. p.37-52. (Special Publication, 35).
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Ley, G.J.; Mullins, C.E.; Lal, R. (1993) Effects of soil properties on the strength of weakly structures tropical soils. *Soil and Tillage Research*, v.28, n.1, p.1-13.

- Lopes da Silva, M. S.; Chaves, V. C.; Cavaleanti, A. C.; Neto, M. B. O.; Santos, J. C. P.; Mendes, A. M. S.; Anjos, J. B. (2007) Adensamento e compactação de solos irrigáveis da zona semi-árida do Nordeste brasileiro. Circular Técnica Embrapa ISSN 1517-5146.
- Macks, S.P.; Murphy, B.W.; Cresswell, H.P.; Koen, T.B. (1996) Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aust. J. Soil Res.*, 34:343- 360.
- Madari, B. E. (2004) Fracionamento de agregados: Procedimento para uma Estimativa Compartimentada do Seqüestro de Carbono no Solo. Comunicado Técnico ISSN 1517-5685 Rio de Janeiro, RJ
- Manhães, C. M. C.; Gama-Rodrigues, E. F.; Moço, M. K. S.; Gama-Rodrigues, A. C. (2013) Meso-and macrofauna in the soil and litter of leguminous trees in a degraded pasture in Brazil. *Agroforest System*, 10.1007/s10457-013-9614-0.
- Melo, V. F.; Moura, R.; Toledo, F. H.; Lima, V. C.; Ghidin, A. A. (2008) Morfologia de agregados de Latossolos Bruno e Vermelho do estado do Paraná, avaliada por imagens obtidas em scanner. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:85-99.
- Mota, L. H. S. O.; Valladares, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 1, p. 39-50, jan-mar, 2011.
- Muggler, C.C.; Van Griethuysen, C.; Buurman, P.; Pape, T. (1999) Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science*, v.164, n.10, p.759-770.
- Neves, C. S. V. J.; Feller, C.; Kouakoua, E. (2006) Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um Latossolo argiloso. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.5, p.1410-1415, set-out
- Olszewski, N.; Costa, L. M.; Fernandes Filho, E. I.; Ruiz, H. A.; Alvarenga, R. C.; Cruz, J. C. (2004) Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:901-909
- Pedrotti, A.; Vahl, L.C.; Pauletto, E.A. (1994) Absorção de nutrientes em diferentes níveis de compactação de um planossolo. In: Reunião brasileira de fertilidade

- do solo e nutrição de plantas. Petrolina. Anais, Petrolina, EMBRAPA/CPATSA. p.302-304.
- Portugal, A. F. (2005) Resiliência da estrutura em argissolo sob diferentes usos, na zona da mata de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Reichardt, K. (1990). A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Ed. Manole Ltda. Cap.3, p.27-65.
- Reichert, J. M.; Reinert, J. M.; Braidá, J. A. (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48.
- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J. (2007) Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C.A.; Silva, L.S.; Reichert, J.M. (eds.) *Tópicos Ciência do Solo*, v.5. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.49-134.
- Reinert, D.J.; Reichert, J.M. (2006) *Propriedades físicas do solo*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. 18p
- Resende, A. S.; Chaer, G. M.; Campello, E. F. C.; Silva, A. P.; Lima, K. D. R.; Curcio, G. R. (2013.) *Uso de leguminosas arbóreas na recuperação de áreas degradadas. Tópicos em Ciências do Solo*, v. 8, p. 71-92
- Ribon, A. A.; Centurion, J. F.; Centurion, M. A. P. C.; Pereira, G. T. (2003) Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. *Acta Scientiarum: Agronomy*, v. 25, n. 1, p. 13-17
- RIBEIRO, L.P.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; MOÇO, M.K.S.; GAMARODRIGUES, A.C. (2014) Influence of mineral fertilization on edaphic fauna in *Acacia auriculiformis* (A. Cunn) plantations. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.39-49.
- RITA, J.C.O.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; ZAIA, F.C.; NUNES, D.A.D. (2013) Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the North of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1207-1215.

- Santos, G. G. (2010) Impacto de sistemas de integração lavoura pecuária na qualidade física do solo. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Goiás.
- Schoenholtz, S.H., H. Van Miegroet, and J.A. Burger. 2000. Physical and chemical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356.
- Seixas, J.; Roloff, G.; Ralisch, R. (2005) Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. *Ci. Rural*, 35:794 -798
- Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Dias Junior, M. S.; Imhoff, S. E Klein, V.A. (2010) Indicadores da qualidade física do solo. In: Van Lier. Q.J. (Ed.) – Física do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 298 p
- Silva, E. A. (2014) Agregação por macromorfometria e “high energy moisture characteristic” em Latossolo, Cambissolo sob manejo intensivo na cafeicultura. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Silva, E. A.; Oliveira, G. C.; Carducci, C. E.; Silva, B. M.; Oliveira, L. M.; Costa, J. C. (2013) Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under Coffee crop. *Rev. Cienc. Agrar.*, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar
- Silva, E. M.; Lima, J. E. F.; Azevedo, J. A.; Rodrigues, L. N. (2006) Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.41, n.2, p.323-330, fev.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. (2000) Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.2, p.239-250.
- Sousa, G. B.; Martins Filho, M. V.; Matias, S. S. R. (2012) Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba – SP. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal v.32, n.3, p.490-500, maio/jun.
- Souza, F.; Rosa Junior, E. J. Fietz, C. R.; Pellin, D. M. P.; Bergamin, A. C.; Gelain, E.; Rosa, Y. B. C. J. (2012) Morphology and stability of aggregates of an Oxisol according to tillage system and gypsum application. *Rev. Ceres*, Viçosa, v. 59, n.6, p. 859-866, nov/dez

- Souza, M. S. (2004) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da região Norte Fluminense. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.
- Stone, L. F.; Silveira, P. M. (1999) Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.34, n.1, p.83-91, jan.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v.33, p.141-163, June.
- Tognon, A.A. (1991) Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo. 85 f. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Tormena, C.A.; Araújo, M.A.; Fidalski, J.; Imhoff, S.; Silva, A.P. (2008b) Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.943-952.
- Tormena, C.A.; Fidalski, J.; Rossi Junior, W. (2008a) Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *R. Bras. Ci. Solo.*, v.32, p.33-42.
- Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L. (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581
- Zou, A. C.; Sands, A. D. R.; Buchan, B. G.; Hudson, C. I. (2000) Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 38, 947-58