

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
“SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL”

**CÉSAR AUGUSTO DA COSTA SCAGLIANTI**

QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES  
COBERTURAS EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO DO PNMCBIO, SOROCABA/SP

Sorocaba, SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
“SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL”

**CÉSAR AUGUSTO DA COSTA SCAGLIANTI**

QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES  
COBERTURAS EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO DO PNMCBIO, SOROCABA/SP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade na Gestão Ambiental – PPGSGA da Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba, para obtenção do título de mestre em Sustentabilidade na Gestão Ambiental.

Orientação: Prof. Dr. Reginaldo Barboza Silva.  
Co-orientadora: Prof, Kelly Cristina Tonello

Sorocaba, SP

2022

Scaglianti, César Augusto da Costa

Qualidade física de um latossolo vermelho sob diferentes coberturas em áreas de restauração do PNMCBIO, Sorocaba/SP / César Augusto da Costa Scaglianti -- 2022.

63f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Reginaldo Barbosa Silva

Banca Examinadora: Piero Iori, Janaina Braga do Carmo

Bibliografia

1. Atributos físicos. 2. Restauração florestal. 3. Qualidade do solo. I. Scaglianti, César Augusto da Costa. II. Título.

Dedico ao meu pai (in memoriam) e a minha Mãe, por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Reginaldo Barboza Silva, meu orientador pela confiança e por todo o ensinamento que me passou durante este tempo.

À Dra. Kelly Cristina Tonello, minha co-orientadora pelo incentivo e por todo apoio recebido.

Ao grupo de pesquisa pelas conversas e ajuda que recebi durante a pesquisa e aos amigos adquiridos ao longo da pós-graduação.

Às minhas irmãs e meus sobrinhos pela amizade e apoio permanente.

A todos os alunos da UFSCAR e UNISO que me auxiliaram nas campanhas de campo e pelas novas amizades que fiz.

À Secretaria do Meio Ambiente de Sorocaba por disponibilizar o Parque Natural Municipal Corredores da Biodiversidade para que pudesse realizar a pesquisa.

Aos funcionários do Parque Tecnológico de Sorocaba pela boa vontade e auxílio que recebi durante a pesquisa.

À Universidade Federal de São Carlos *campus* Sorocaba e ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade na Gestão Ambiental, e a todos os professores pelo apoio e por todo conhecimento adquirido.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” *campus* Registro pelo auxílio, cuidado e dedicação dispendido nas análises dos solos e por tudo mais.

## RESUMO

Para que o solo possa desempenhar bem as suas funções é preciso que seus atributos estejam dentro de limites adequados de funcionamento, regulando adequadamente processos que dependem de uma boa drenagem ou armazenamento de água, circulação de ar e da funcionalidade de sua estrutura, condições necessárias ao desenvolvimento do sistema radicular e suporte à cobertura vegetal. Em contrapartida, acredita-se que a funcionalidade do solo, assim como, a qualidade de seus atributos é dependente do tipo de coberturas e o manejo a elas associadas.

Este entendimento ganha relevância em área degradadas que estão sob processo de restauração voluntária, cuja carência de métricas e de indicadores, principalmente de solo e água constituem um desafio para pesquisadores e gestores de parques. O Objetivo desta pesquisa foi verificar o impacto que a cobertura florestal tem sobre os atributos físico-hídrico-mecânicos de um Latossolo vermelho, localizado no Parque Municipal Natural Corredores da Biodiversidade, uma unidade de conservação do município de Sorocaba.

O estudo foi conduzido em áreas com coberturas florestais com diferentes históricos de formação: Floresta implantada em uma campina (VH); Floresta implantada no interior de um antigo florestamento de eucalipto (ECP), Floresta implantada em uma área de bota-fora (BF), e Floresta em estágio médio (MTA). Em cada cenário foram delimitadas, aleatoriamente, 03 parcelas de 9 m<sup>2</sup>, cujas amostragens e ensaios prospectivos in situ se deram nas camadas de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. Os atributos do solo investigados constituíram-se daqueles indicadores (características ou propriedades) físico-hídrico-mecânicos inerentes ao solo como a textura, e os atributos dinâmicos que podem se alterar em uma escala de tempo curta conforme mudanças nas condições climáticas, manejo, e vegetação considerados neste estudo, e que entre estes há indicadores determinantes das funções do solo: a) relação de massa e volume dos constituintes do solo; b) estabilidade estrutural do solo; c) dinâmica hídrica do solo e, d) matéria orgânica do solo.

Os resultados da pesquisa mostram o quanto é estratégico definir e estudar os atributos físico-hídrico-mecânicos, associando-os à qualidade química do solo para quantificar o impacto da cobertura florestal sobre a função estrutural do solo de áreas em processo de recuperação florestal. Também permite concluir que em decorrência da matéria orgânica do solo (MOS), foi verificado o impacto positivo sobre a funcionalidade estrutural do solo, porém, os indicadores prospectados nesta pesquisa revelam que com exceção de MTA, as estratégias de recuperação do PNMCBIO ainda não proveram as melhorias esperadas dentro de um processo e restauração florestal ou ecológica, no que diz respeito à qualidade físico-estrutural do Latossolo Vermelho.

**Palavras-chave:** atributos físicos, área degradada, restauração florestal, qualidade do solo

## ABSTRACT

For the soil to perform well its functions, it is necessary that his indicators stay within certain boundaries to performance well, regulate processes properly that depends on good water drainage and storing, air circulation and his structural functionality, necessary conditions for root growing, and give support to the plants. In another way, it must be recognized that soil functionalities, as well as its processes perform depends on the vegetal coverage kind and the associated management employed.

This understanding is even more important in degraded areas which are passing through voluntary restoration process, where the lack of metrics and indicators, mainly for soil and water represent a challenge for researchers and protect areas managers. The goal of this research was to verify the impact that forest coverage has over physics and hydrological attributes in a Latossolo Vermelho (Oxisols), located at Parque Municipal Natural Corredores da Biodiversidade, a protected area in Sorocaba municipality. The research was conducted in a semideciduos forest in early secondary stage established in a meadow (VH), a semideciduos forest in early secondary stage established in a former eucalyptus commercial forest (ECP), a semideciduos forest in early secondary stage establish in a soil disposal area (BF), and a semideciduos forest in middle secondary stage (MTA). In each area it was aleatory set 03 parcels with 9 m<sup>2</sup> which samples and field prospective essays in situ were carry out in 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m layers.

The investigated attributes were composed by indicators (characteristics or properties) physical, hydrological and mechanical that are inherent to the soil as texture, and other properties that are dynamic and change in a shorter time scale according to disturbances caused by weather, soil management and vegetation considered in this study. Among the indicators there are those that are determinants of soil functioning: a) mass and volume relation soil constituents; b) soil structural stability; c) hydrological dynamics; d) soil organic matter.

The research outputs show how strategic it is to define, study and investigate the physical-hydrological-mechanical soil attributes, relating them to soil chemical quality in order to figure out the impact of forest vegetation over soil structural functions in forest restoration areas. It is also possible to conclude that soil organic matter (SOM), has a positive impact over the soil structural functionality, although the indicators used in this research show, with the exception of MTA, the restoration strategies used to recover PNMCBio forest areas didn't produce the improvement expected for the forest restoration or ecological forest process, regarding physical-structural quality of the Latossolo Vermelho.

**Key-words:** soil physical attributes, degraded area, forest restoration, soil quality.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização do Parque da Biodiversidade (PNMCBIO), município de Sorocaba, SP.....	24
Figura 2- Precipitação média e temperaturas máximas e mínimas da área de estudo para os anos de 2019 e 2020, período de coletas dos dados. ....	25
Figura 3 - Parque da Biodiversidade, os cenários da pesquisa e pontos de coleta. ....	27
Figura 4 - Imagens dos diferentes tipos de cobertura: Vegetação Herbácea (A), Eucalipto (B), Bota-fora (C) e Floresta Estacional (D). ....	28
Figura 5- Minitrincheira (esquerda), coleta se amostra de solo indeformada 0-20 cm (centro), coleta de amostra de solo indeformada 20-40 cm (direita). ....	29
Figura 6 – A - Trado Holandês, B - Amostrador de solo Ulland, C - Amostradores de solo deformado D -Amostra de solo indeformado. ....	30
Figura 7: A – Minitrincheira onde foram retiradas as amostras deformadas e B - Amostras deformadas de solo. ....	30
Figura 8: Infiltrômetro Mini Disk. A esquerda detalhe dos ensaios em uma das áreas do estudo. À direita, detalhes do equipamento, segundo o fabricante. (METER GROUP, 2021) .....	34
Figura 9: Ensaio de resistência do solo à penetração (RP), realizado com o penetrológ – medidor eletrônico de compactação do solo.....	35
Figura 10: Esquema representativo da ruptura dos agregados, descrito por Dhattrak, 2016 (a esquerda); e agregados após ensaio de ruptura para a determinação da RT em consistência tenaz e friável, respectivamente (a esquerda) (Fonte: Silveira, 2020).....	36
Figura 11: Dispositivo e procedimentos estabelecidos para a separação dos agregados do solo (Fonte: Silveira, 2020). ....	37
Figura 12: Equipamento e acessórios empregados nas análises de RT. (Fonte: Silveira 2020).....	37
Figura 13: Detalhe do ensaio de RC realizado in situ, em área do estudo. ....	38
Figura 14: Detalhes e especificações técnicas do equipamento (Silva & Lanças, 2006)....	38
Figura 15 Matéria orgânica no solo (MOS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada .....	42

Figura 16: Densidade do solo de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada. ....	44
Figura 17: Espaço poroso saturado por água (WFPS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada (I: processo de nitrificação. II: processo de desnitrificação. III: retorno de N <sub>2</sub> para atmosfera).....	46
Figura 18: Índice de estabilidade estrutural (IE) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada. (I) Solo estruturalmente degradado, (II) Solo com alto risco de degradação estrutural, (III) Solo com baixo risco de degradação estrutural e (IV) Solo estruturalmente estável. ....	47
Figura 19: Valores médios de K <sub>s</sub> e respectiva classificação, adaptado de Ferreira (1999), de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada. I (muito rápida): >250; II (rápida): 250-125; III (moderadamente rápida). ...	50
Figura 20: Perfil de Resistência do solo à Penetração de um Latossolo Vermelho para cada tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada. ....	51
Figura 21: Envoltórias de RC e respectivos valores de coesão aparente (kPa) e ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) da camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho, para diferentes tipos de cobertura florestal. ....	53

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Caracterização química e granulométrica das camadas 0-20 e 20-40 cm de um Latossolo Vermelho do, em função do tipo de cobertura florestal..... 26
- Tabela 2: Valores médios de argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF), diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada. .... 40
- Tabela 3: Carbono total (C total), matéria orgânica do solo (MOS), nitrogênio total (N total) e potencial hidrogeniônico (pH) de um Latossolo Vermelho, em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada..... 41
- Tabela 4: Valores médios de densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partícula ( $D_p$ ), porosidade total (PT), microporosidade (MIC), macroporosidade (MAC) e water filled pore space/ espaço poroso saturado por água (WFPS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada..... 43
- Tabela 5: Valores médios do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ), condutividade hidráulica ( $K_\theta$ ), índice de cone (IC) e Resistência Tênsil de agregados (RT) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada..... 49
- Tabela 6: Equações ajustadas para as envoltórias de Coulomb e os respectivos valores de coesão aparente (kPa) e ângulo de atrito interno do solo ( $\Phi$ ) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal na camada 0-20 cm..... 54
- Tabela 7: Teste de significância, segundo Snedecor & Cochran (1989), entre as envoltórias de Coulomb e seus respectivos parâmetros, obtidos para de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal na camada 0-20 cm..... 55

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Hipótese</b> .....	15
<b>1.2 Objetivos</b> .....	15
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	15
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
<b>2.1 Restauração ecológica e florestal</b> .....	16
<b>2.2. Qualidade do solo em ambientes sob restauração florestal</b> .....	18
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1. Localização e caracterização da área de estudo</b> .....	24
<b>3.2. Arranjo experimental e cenários estudados</b> .....	27
<b>3.2.1 Uso do solo e caracterização da cobertura vegetal</b> .....	27
<b>3.2.2. Camadas prospectadas</b> .....	29
<b>3.2.3. Teor de água no solo</b> .....	30
<b>3.3. Indicadores físico-hídricos e mecânicos do solo avaliados</b> .....	31
<b>3.3.1. Atributos físico-hídricos do solo</b> .....	31
<b>3.3.2. Atributos mecânicos do Solo</b> .....	35
<b>3.4. Sistematização e análise dos dados</b> .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	55
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural que dá suporte aos ecossistemas, a atividade rural e urbana, e o seu conhecimento nos permite saber se ele possui condições de desempenhar bem suas funções, o que levou a se criar o conceito de qualidade do solo. O conceito de qualidade do solo foi introduzido em 1977 como a capacidade de determinado solo, dentro de limites naturais e manejados, sustentar as plantas e a produtividade animal, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e suportar a saúde e a habitação humana. Frequentemente é considerada como a sua capacidade de interagir positivamente com o meio ambiente externo do ecossistema. A qualidade do solo abrange atributos químicos, como matéria orgânica, físicos, como densidade do solo, resistência do solo à penetração, e porosidade e biológicos que envolve todos os organismos como minhocas, insetos e microrganismos como fungos e bactérias que vivem no solo. Há uma dificuldade em se definir a qualidade do solo devido a sua complexidade e conforme o uso que se faz do solo. A sua composição física, química e biológica varia muito, em decorrência da dinâmica e da diversidade dos sistemas e conforme o uso que se faz do solo, e desta forma o conceito de qualidade pode mudar, isto é, um solo com qualidade para uma determinada atividade pode não ser adequado para outra atividade.

O solo possui características que são inerentes a ele e que só se alteram no longo prazo como a textura, enquanto que há propriedades são dinâmicas e a sua mudança ocorre em uma escala temporal menor (< 10 anos). As características do solo determinam a sua classificação, o seu potencial e a recomendação de manejo, enquanto as propriedades dinâmicas são sensíveis ao clima e ao uso do solo e são afetadas pelo manejo do solo que tem influência direta em suas propriedades dinâmicas, como ocorre nos sistemas agrícolas.

As florestas possuem solos mais estáveis que na agricultura onde estes são cultivados e mesmo quando se compara com o plantio direto, os solos florestais tem sua estrutura mais preservada.

Os solos em sistemas florestais por não estar sujeito a ação antrópica dos sistemas agropecuários e das áreas urbanas apresentam uma melhor qualidade que pode ser verificada pelos seus atributos físicos, químicos e biológicos.

A deterioração da qualidade solo, especialmente aquela associada aos atributos físico-hídricos e mecânicos do solo pode ser percebida em fenômenos como maior compactação do solo, diminuição na infiltração da água e agravamento da erosão do solo, fenômenos que podem impactar diretamente no processo de restauração florestal. Conhecer

a qualidade do solo requer uma quantidade mínima de conjunto de dados que pode ser composta por diferentes combinações de um pequeno número de indicadores físicos, químicos e biológicos do solo cuidadosamente selecionados para caracterizar se o solo possui qualidade para a atividade que se pretende realizar. Assim, o claro entendimento da relação entre indicadores do solo e a função do solo que estes indicadores monitoram é fundamental para que se avalie corretamente se o solo está proporcionando adequadamente os serviços necessários e, portanto, possui qualidade. Desta forma, a escolha dos indicadores para determinar a qualidade do solo depende das características e objetivos da pesquisa.

A seleção de indicadores para avaliar a qualidade do solo deve ser feita a partir do estabelecimento de critérios para selecionar os indicadores de qualidade do solo: o indicador deve correlacionar-se com processos naturais do ecossistema (aspectos da funcionalidade); ser relativamente fácil de usar no campo (poder ser utilizado por especialistas e produtores); ser susceptível às variações climáticas e de manejo (caráter dinâmico); e ser componente de uma base de dados, quando possível.

A qualidade do solo, avaliada pelos seus atributos, é condição básica para proporcionar as condições adequadas ao crescimento das mudas plantadas. Esta condição pode ser verificada através da análise de seus atributos físicos, químicos e biológicos. Portanto, um solo que mantém sua função estrutural permite um bom crescimento radicular, condição necessária para o crescimento das plantas, o estabelecimento de um plantio e o sucesso da restauração florestal e com isso, promovem serviços importantes para o funcionamento dos ecossistemas, como armazenar e reciclar o carbono, ciclagem de nutrientes, regulação hídrica e suprimento de água.

O solo possui funções que são inerentes a ele e que não variam, ou variam muito pouco com o seu manejo ou variações do meio, como a textura, tipos de argilas, profundidade do solo até a rocha, e classe de drenagem. O solo apresenta características que dependem do uso ou manejo que o homem faz e também de distúrbios naturais, que pode variar em uma escala de tempo tão curta como um único dia, décadas e até séculos. Às vezes, mesmo uma pequena alteração na densidade do solo por uma mudança no seu manejo tem expressivas alterações em outros atributos físicos.

Isto posto, e dada a ausência de resultados de pesquisa dedicados ao impacto da restauração florestal sobre a função estrutural do solo, estudos como o que está sendo proposto ganha relevância, especialmente quando se estabelece perspectivas de que os tipos de cobertura vegetal dentro de um projeto de restauração florestal apresenta potencial de impacto sobre o comportamento físico-hídrico-mecânicos e químicos do solo.

## **1.1 Hipótese**

Esta pesquisa estabelece como hipótese que o estudo dos atributos físico-hídrico-mecânicos, associados à qualidade química do solo podem ser uma importante estratégia para avaliar e ou quantificar o impacto da cobertura florestal sobre a função estrutural do solo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho em diferentes cenários de manejo e cobertura vegetal.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar a relação de massa e volume dos constituintes do solo: textura, densidade de partículas e do solo, macro, micro e porosidade do solo;
- Avaliar a qualidade estrutural do solo: resistências tênsil dos agregados, índice de cone, resistência ao cisalhamento do solo ( $c$ ,  $\phi$ ), estabilidade dos agregados e seus respectivos índices estruturais, associando-os com dinâmica da matéria orgânica e hídrica do solo em áreas com coberturas florestais formadas em áreas originalmente com cobertura do solo formada por vegetação herbácea, bota-fora, florestamento de eucalipto e área de mata.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Restauração ecológica e florestal**

A primeira iniciativa para restaurar áreas degradadas no Brasil ocorreu no início do século 19 no Rio de Janeiro em meio a uma crise no abastecimento de água da cidade, que foi identificado como consequência do desmatamento das florestas para se fazer o plantio de lavouras de café. Desta iniciativa surgiu a Floresta da Tijuca que cobre os morros no entorno da cidade do Rio de Janeiro (ARQUIVO NACIONAL, 2012). O estado de São Paulo também viu a suas florestas se reduzirem a 13,5% no início dos anos 1990, mas com os muitos plantios que foram feitos desde então e também pela evolução do mapeamento florestal, houve um aumento na cobertura vegetal no estado que se encontra em 19,5% (SÃO PAULO, 2020).

A restauração florestal tem o propósito de revegetar uma área degradada, proteger o solo, os recursos hídricos e reabilitar alguns processos naturais que foram perdidos com a supressão da vegetação. Na restauração ecológica além destas questões, há a preocupação com a diversidade de espécies, a fim de restaurar a estrutura e funcionamento históricos anteriores ao distúrbio, o que nem sempre acontece (BRANCALION ET AL. 2015). A Sociedade para Restauração Ecológica (SER) define restauração ecológica como o processo de auxiliar na recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído. A mesma SER define o termo restauração para a atividade realizada e o termo recuperação para o resultado almejado, isto é, se deseja atingir recuperação total de um atributo-chave do ecossistema, como composição de espécies e condições físicas ou a meta é a recuperação parcial. Desta forma o objetivo da restauração ecológica é formar uma floresta funcional, sustentável e capaz de se adaptar aos distúrbios da natureza (SER, 2019).

As primeiras motivações para se fazer a restauração florestal de áreas degradadas foram mais a proteção do solo e da água, do que a biodiversidade, caso da Floresta da Tijuca. Esta fase inicial da restauração onde não havia preocupação com os processos ecológicos foi até 1982. Conforme novos conhecimentos foram sendo gerados, eles foram se incorporando na prática da restauração florestal como o conceito de sucessão ecológica e a seleção das espécies passaram a ser feitas conforme o seu grupo ecológico, mas ainda com no máximo 30 espécies (RODRIGUES ET AL., 2009a). A restauração ecológica entrou então em um período onde a pesquisa favoreceu os estudos com fitossociologia, os plantios incluíram os fragmentos nos novos projetos de restauração e se aumentou a diversidade dos plantios. Em uma nova fase se entendeu que havia a necessidade da restauração ecológica formar florestas



autossustentáveis e que a restauração ecológica não era um processo que visava atingir comunidades com determinadas espécies, mas onde a floresta madura seja formada por espécies aleatórias, isto é, a comunidade clímax possui diferentes resultados. A fase atual incorporou ao cuidado com a fitossociologia, questões de diversidade genética e maior cuidado com a seleção de sementes (RODRIGUES ET AL., 2009b).

Muitas áreas que precisam ser restauradas se encontram em áreas particulares e poucas são as ações voluntárias de restauração das áreas degradadas. A legislação Federal ao instituir a Lei 12.651/2012, o código florestal, estabeleceu a necessidade de recomposição das Áreas de Preservação Permanente, e das Reservas legais, o que deve ser realizado com a implantação do Cadastro Ambiental Rural. O governo do estado de São Paulo tem incentivado a discussão de políticas para viabilizar a restauração florestal no estado desde 1998, envolvendo agências de pesquisa neste processo (RODRIGUES, 2009b). Esta parceria permitiu que o conhecimento científico orientasse as políticas ambientais do estado e que legislações pioneiras fossem criadas. Algumas legislações foram criadas e substituídas até se chegar na Resolução SMA 32/2014 atualmente em vigência, com orientações para os projetos de restauração ecológica no Estado de São Paulo, que estabelece critérios para determinar as espécies que serão plantadas, assim como estabelece os indicadores ecológicos para acompanhar a restauração ao longo do tempo, e se esta está na trajetória correta até se atingir a conclusão do projeto. Outra legislação importante para a restauração ecológica é a Resolução SMA 07/2018 que trata da compensação ambiental para a supressão de vegetação no estado de São Paulo, onde se instituiu áreas prioritárias no estado e os critérios de compensação destas áreas.

A Restauração Florestal é uma prática que visa recuperar áreas degradadas em Unidades de Conservação, Áreas de Preservação Permanente, Reservas Legais e plantios motivados pelo licenciamento ambiental de empreendimentos que causem dano ambiental (ARAKI E MINUCI, 2019). Para se atingir a restauração de uma área degradada pode-se promover a regeneração natural das áreas onde há este potencial, ou fazer a regeneração artificial pelo plantio de mudas ou pela semeadura direta (CALEGARI ET. AL., 2010). O diagnóstico ambiental da área irá dizer qual o grau de degradação de uma área para a restauração florestal e determinar qual o melhor método a ser usado na restauração florestal e no seu manejo do solo (RODRIGUES, 2009A, HOLL E AIDE, 2011). Há áreas com um bom banco de sementes, ou próximas à fragmentos de vegetação onde a regeneração natural é viável, e há lugares mais degradados onde é necessário fazer a regeneração através do

plantio de mudas, semeadura direta, ou transposição de serrapilheira (RODRIGUES ET AL. 2010A, GROMBONE-GUARATINI E RODRIGUES, 2002).

Nas situações onde há vegetação, porém com pouca diversidade, deve ser feito o seu enriquecimento com o plantio de mudas de espécies nativas para se aumentar a sua diversidade de espécies (CHAZDON, 2008) ou a condução da regeneração natural em áreas onde há este potencial (CESAR ET AL., 2018). Em meios degradados a probabilidade de se restaurar a vegetação aos níveis anteriores à perturbação da floresta original é baixa, principalmente se houve a degradação do solo ou a supressão total da vegetação (TOLEDO ET AL., 2018). Em condições abióticas favoráveis, o plantio de mudas de espécies nativas pode ser uma estratégia necessária conforme os condutores da sucessão ecológica (CÉSAR ET AL., 2017). Em situações não favoráveis à restauração por falta de água, pode ser necessário manejar as condições edáficas com o uso de comunidades alternativas no longo prazo (TOLEDO ET AL., 2018) antes de se introduzir a mudas das espécies da região. Com todos os esforços para elevar a diversidade de espécies nas áreas restauradas, a quantidade de espécies na floresta natural é pelo menos duas vezes maior (RODRIGUEZ, 2009b). Kageyama e Castro (1986) afirmam que o correto manejo da vegetação sucessional é básico para entender a dinâmica da floresta tropical e a condução da regeneração natural.

## **2.2. Qualidade do solo em ambientes sob restauração florestal**

Um dos fatores que afetam a estrutura do solo é o conteúdo de água no solo, haja vista que a elevação da umidade transforma solos antes coesos em solos friáveis, diminuindo a sua resistência, aumentando a macroporosidade e permitindo a penetração das raízes em camadas antes adensadas (SANTANA ET AL., 2006).

A capacidade de estocagem de água é afetada pela cobertura vegetal do solo, sendo mais elevada em solos de florestas em relação ao solo cultivado com culturas agrícolas, pastagens e em relação ao solo nu, comportamento que fica mais evidente quando o solo se encontra com menor umidade (LOPES ET AL., 2020; XIA ET AL., 2019; BLANCO-CANQUI, 2005).

Estudos com solos de florestas formados por *Salix matsudana* + *Distichlis spicata*, *Fraxinus chinensis* + *Tamarix chinensis* + *Medicago sativa*, e *Salix americana* + *Glicine max* tiveram um aumento na sua capacidade de estocagem de água de 24,6%, 24,3% e 9,0% respectivamente e na floresta formada por apenas *Salix americana* houve aumento, mas de apenas 4,8% (XIA ET AL., 2019). Por outro lado, em áreas agrícolas, o plantio de adubação

verde ou plantas de cobertura antes da semeadura da cultura principal aumentou a água disponível para as plantas comparado com áreas onde não houve o plantio de plantas de cobertura (KEISLING ET AL, 1994, NOURI ET AL, 2019). Acredita-se que este aumento é devido à maior infiltração de água pelo aumento na quantidade de macroporos pela ação das raízes das plantas de cobertura.

Os macroporos são formados pela ação da fauna do solo, como minhocas e formigas, pela decomposição das raízes das plantas, que pode responder por 35% do volume do solo de uma floresta, assim como por trincas e fissuras causadas por dessecação e por canais naturais que se formam pelos fluxos subsuperficiais de água (BEVEN & GERMANN, 1982). O aumento da densidade do solo diminui sua macroporosidade e reduz a sua aeração, comprometendo a sua qualidade para o crescimento radicular (SILVEIRA ET AL, 2011). Cintra (1997), trabalhando com Argissolos, verificou que o aumento de 17 % na densidade do solo (de 1,52 g.cm<sup>-3</sup> no horizonte Ap para 1,77 g.cm<sup>-3</sup> no horizonte BA) causou uma diminuição de 24% na porosidade total do solo. Um experimento comparando cobertura do solo de inverno (ervilhaca e centeio) e pousio nas culturas do milho e soja em diferentes combinações mostrou em todos os casos que há um aumento na densidade do solo em profundidade de 8,5% onde foi feito pousio e de 15% onde se plantou cobertura do solo de inverno (VILAMIL ET AL., 2006) diferença que ocorre pela atividade radicular das coberturas de inverno induzida pelos ciclos de molhamento e secamento do solo.

Solos sob florestas normalmente possuem maior quantidade de carbono (C) do que solos com outros tipos de cobertura como culturas agrícolas ou pastagens, o que melhora a sua estrutura física e muitas outras características do solo (LOPES ET AL., 2020, OWUOR ET AL. 2018). O C é incorporado ao solo pelas raízes que depois de penetrarem nas diferentes camadas do solo se decompõem e criam canais por onde ocorre a infiltração de água e difusão de gases (FERREREIRA ET AL., 2012, XIA et al., 2019). A deposição da serrapilheira em solos degradados tem uma ação essencial na recuperação destes solos, reativando a ciclagem de nutrientes entre a planta e o solo, protegendo o solo de agentes erosivos e fornecendo nutrientes para os microrganismos do solo (ANDRADE, TAVARES E COUTINHO, 2003). O aumento do carbono orgânico do solo aumenta a macroporosidade, ao melhorar a estrutura do solo (LOPES ET AL., 2020). Estudos em solos com coberturas florestais em composição com diferentes vegetações no seu sub-bosque, a porosidade do solo variou de 42 a 52% (Xia et al., 2019).

O carbono orgânico medido em diferentes coberturas e manejo do solo, encontrou para agregados de 1-2mm, 2-4mm, 4-6mm e 6-8mm em florestas valores de

74,1, 61,1, 54,9 e 47,1 Mg ha<sup>-1</sup> de CO do solo respectivamente, enquanto que em pastagem foram de 38,9, 34,7, 33,8 e 34,1 Mg ha<sup>-1</sup> de CO do solo, e em solos com plantio direto os valores foram 31,7, 31,9, 33,6 e 32 Mg ha<sup>-1</sup> de CO do solo, resultados que ilustram o maior teor de CO em solos sob florestas, independentemente do tamanho dos agregados do solo (BLANCO-CANQUI ET AL. 2005). Holl e Zahawi (2014) pesquisando florestas tropicais não registraram alterações significativas no CO do solo em um período de 5 anos, mostrando que a mudança no carbono orgânico do solo é muito lenta.

A matéria-orgânica fresca de resíduos de plantas se transforma em matéria-orgânica particulada grossa que induz a formação de macroagregados, processo que continua com a fragmentação da matéria em partículas cada vez menores até formar os microagregados (SIX ET AL., 2.000). De acordo com Dexter (1988), quanto menor o tamanho do agregado mais resistente ele é, o que se explica por uma maior ação das forças internas de ligação em relação ao tamanho da partícula e pela menor proporção de espaços porosos nos agregados de menor tamanho.

A estabilidade de agregados mede a vulnerabilidade do solo às forças destrutivas externas. Solos com elevados índices (diâmetro médio geométrico, DMG ou diâmetro médio ponderado, DMP) de estabilidade de agregados são menos susceptíveis à erosão (DEXTER, 1988). Diferentemente Piyaruwan e Leelamanie (2020) concluíram que a estabilidade de agregados não se mostrou ser um bom indicador de suscetibilidade à erosão. A estabilidade de agregados é fortemente influenciada pelo carbono orgânico e argila (VILAMIL ET AL. 2006), e a perda destes constituintes do solo pela erosão leva à diminuição da estabilidade de agregados do solo (KHALEDIAN ET AL. 2016).

Estudos em áreas agrícolas relatam que o tráfego de máquinas em áreas de cana-de-açúcar não alterou a estabilidade de agregados, o que seria explicado pelos processos de peneiras úmidas não conseguir distinguir agregados estáveis de solos estruturados (ESTEBAN ET AL., 2020) fato também verificado para macroagregados (2-4 mm e 4-8mm) em plantio de milho com diferentes manejos no preparo do solo como plantio direto, cultivo reduzido e cultivo convencional, onde houve variações no tamanho dos macroagregados ao longo da cultura, mas que no momento da colheita esta diferença não foi observada (PAREJA-SANCHEZ ET AL., 2017). O plantio direto e os demais sistemas onde se pratica o cultivo mínimo contribuem para a formação de macroagregados e a estabilidade do solo (ÁLVARO-FUENTES ET AL., 2009).

A densidade do solo é influenciada pelo manejo do solo, por sua estrutura preservada e pela cobertura do solo. Solos sob florestas apresentam menor densidade do solo

comparados com solos com culturas agrícolas como culturas anuais, citrus e pastagem (BLAINSK ET AL., 2008, Owuor et al., 2018). Agregados maiores frequentemente apresentam maior quantidade de macroporos que os agregados menores e, portanto, menor densidade do solo (BLANCO-CANQUI, 2005). Xia et al. (2019) comparando diferentes coberturas do solo como floresta, vegetação herbácea e um solo sem vegetação, verificou que as densidades foram de 1,28, 1,48 e 1,55 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, ilustrando a menor densidade do solo sob florestas.

A densidade do solo é afetada pelo cultivo do solo, sendo menor em solos cultivados onde o solo é revolvido e maior no plantio direto, onde a estrutura do solo é preservada, (PAREJA-SANCHEZ ET AL., 2017). Owuor et al. (2018) verificaram que na camada de 5-20 cm, diferentes usos do solo (floresta nativa, floresta plantada, culturas anuais, e pastagens) não influenciaram significativamente na densidade do solo. O pousio entre duas safras, deixar a palhada no solo após a colheita, o plantio de cobertura do solo, adição de esterco bovino antes da semeadura da cultura principal, são práticas que resultam na redução da densidade de agregados e da densidade do solo pelo incremento da matéria orgânica no solo (KEISLEING, 1994, BLANCO-CANQUI, 2005).

Em florestas, a menor densidade de agregados é explicada pela bioturbação que ocorre nestes solos pela ação de minhocas e insetos e que aumentam a porosidade do solo próximo da superfície, fato ilustrado por o experimento de Blanco-Canqui (2005). Este autor, em áreas de 15 anos de cultura, verificou que a densidade de agregados na camada de 0-10 cm em plantio direto, pastagem e floresta e obteve os valores 1,48, 1,27 e 0,99 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, confirmando a menor densidade de agregados em florestas.

A capacidade de infiltração do solo é um de seus principais atributos por permitir conhecer qual a máxima capacidade de entrada de água no solo e em que condições que isto ocorre (COSTA ET AL., 1999). Entre os fatores que influem no processo de infiltração de água no solo se destacam as condições da superfície do solo, o conteúdo inicial de água no perfil, o tempo de infiltração, a existência de camadas menos permeáveis ao longo do perfil, a topografia do terreno e as propriedades físicas do solo (ZIMMERMANN E ELSENBEER, 2009, LEITE ET AL., 2017,). No Quênia, Owuor et al. (2018) ao medir a infiltração de florestas nativas, florestas plantadas, agricultura e pastagem obteve a taxa média de infiltração de 76,1; 60,2; 40,5 e 13,8 cm h<sup>-1</sup> respectivamente.

Alguns solos apresentam o fenômeno conhecido como repelência, que impede que a água infiltre no solo. Este fenômeno ocorre devido à fraca atração entre as partículas do solo e a água e está relacionado com o conteúdo de carbono orgânico do solo, sendo um

problema bem conhecido e que ocorre em todo o mundo (GOEBELS ET AL., 2017). A argila possui a propriedade de amenizar o efeito de repelência causado pelo baixo teor de matéria orgânica do solo. Piyanuwana e Leelamanie (2020) verificaram que solos onde o teor de argila era acima de 10% a sua repelência era menor. A ocorrência de secas prolongadas e altas temperaturas aparentemente transformam solos até então não repelentes à água (molháveis) em solos parcialmente repelentes (GOEBELS ET AL., 2017).

A condutividade hidráulica do solo,  $K_{\theta}$ , possui grande variabilidade em pequenas e grandes amplitudes espaciais, podendo variar de em torno de  $10^{-1}$  até aproximadamente  $10^2 \text{ cm.dia}^{-1}$  (NIELSEN, BIGGAR E EHR, 1973), havendo estudo comparando diferentes usos do solo onde se identificou que os maiores índices de condutividade ocorreram com cobertura florestal (BORMANN E KLAASSEN, 2008). O  $K_{\theta}$  é largamente afetado por fatores externos como o uso do solo e o seu manejo no curto prazo, e por fatores intrínsecos como a formação do solo no longo prazo (DEB E SHUKLA, 2012). A cobertura do solo tem grande influência no  $K_{\theta}$  diferindo bastante entre um solo onde há a cultura da soja ( $381 \text{ mm.d}^{-1}$ ) e outro onde há milho ( $45 \text{ mm.d}^{-1}$ ), diferença explicada pela qualidade do resíduo da soja e do milho e a estimulação na fauna do solo após uma cultura leguminosa (VILAMIL ET AL., 2006). A condutividade hidráulica do solo tende a aumentar à medida que a regeneração da floresta também avança, como ilustrado em pesquisa realizada na Caatinga que comparou um pasto abandonado com 9 meses, e florestas em áreas abandonadas a 7, 35 e 55 anos em que o  $K_{\theta}$  medido foi de 31, 38,6, 31,8 e 65,8  $\text{mm h}^{-1}$  respectivamente. A variação da infiltrabilidade foi maior nas áreas de pastagens (100%) e menor nas florestas antigas (25%), fato explicado pela melhor estrutura do solo da floresta em estágio de sucessional mais avançado (LEITE ET AL., 2017, ZIMMERMANN E ELSSENBEER, 2009).

A recuperação das propriedades hidrológicas de solos degradados após serem abandonados é lenta, como foi verificado em um solo de Rondônia em que sete anos de sucessão secundária não foram suficientes para restabelecer os níveis de infiltração e o  $K_{\theta}$  da floresta original (ZIMMERMANN ET AL., 2010). Em uma floresta de Minas Gerais o  $K_{\theta}$  medido variou conforme a posição que o sol incidia na floresta, sendo  $110,6 \text{ mm h}^{-1}$  no lado leste, e por volta de um terço deste valor no lado oeste, diferença explicada pelo maior teor de C do solo no lado leste que é menos quente. O  $K_{\theta}$  da floresta também foi 78% mais alto quando comparado com áreas de pastagens do experimento (LOPES ET AL., 2020).

Estudos mais recentes têm abordado o uso de parâmetros mecânicos e dinâmicos do solo para medir ou avaliar o impacto antrópico ou a qualidade físico-mecânica do solo.

Um desses parâmetros é a Resistência Tênsil (RT) de agregados que descreve a força necessária para romper as ligações entre as partículas do solo em uma fratura superficial do solo, sendo a sua intensidade função do número e intensidade destas ligações (DEXTER, 1988). Este atributo mecânico do solo é o resultado da interação cumulativa do carbono orgânico do solo, tamanho e densidade dos agregados do solo, estrutura do solo e suas fissuras ou outras falhas, tamanho da amostra de solo e umidade solo (BLANCO-CANQUI ET AL., 2005). Pesquisa com a resistência tênsil verificou que esta dobrava de intensidade para cada 2,5% de elevação da umidade gravimétrica do solo (DEXTER, 1988).

Solos com altas concentrações de carbono orgânico possuem agregados mais frágeis e menor resistência tênsil (WATTS E DEXTER, 1988, VILAMIL ET AL. 2006). Estudo em solos cultivados por longos períodos, comparando cultivo convencional, plantio direto com e sem adição de esterco, pastagem e floresta, verificou que a menor RT foi a do solo sob floresta (63 kPa) em todas as profundidades analisadas (BLANCO-CANQUI ET AL. 2005).

Outro atributo que tem sido usado para medir a resistência mecânica do solo e associá-la com o impacto antrópico nos mais variados agrossistemas é a resistência do solo à penetração, RP. Trata-se de uma propriedade dinâmica, que tem sido proposta para simular as restrições impostas ao crescimento das raízes das plantas. Solos com elevada RP, mesmo com elevada umidade ( $\theta$  na capacidade de campo), são limitantes ao crescimento radicular (BLAINSK ET AL., 2008).

O manejo do solo, especialmente aquele que implica na interação de solo-rodado-ferramentas agrícolas, influencia na RP do solo. Por conta disso, a RP tem sido sugerida como indicadora do comportamento mecânico do solo. Em um estudo com plantio de milho por 20 anos onde se comparou plantio direto, cultivo reduzido e cultivo convencional, a RP média de cinco amostras retiradas da entrelinha foram 1,32; 1,06 e 1,11  $\text{kg cm}^{-3}$  respectivamente (PAREJA-SANCHEZ ET AL., 2017). Mohieddinne et al. (2019) pesquisando solos sob floresta, compactados por trânsito de máquinas, relatam que houve uma recuperação natural do solo que pode ser atingida em condições ótimas ao redor de 20 anos quando o pH do solo é neutro e favorável à ocorrência de minhocas e outros organismos do solo, e em até 70 anos em solos ácidos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização e caracterização da área de estudo

O Experimento foi conduzido no Parque Natural Municipal Corredores da Biodiversidade, PNMCBio. O parque foi criado pelo Decreto nº 19,424 de 17 de agosto de 2011. A época da implantação, o parque possuía 104 hectares, depois sua área foi reduzida para 60,03 ha de área, e alterada novamente para 62,4 ha (Sorocaba, 2014). Em 2020 o Decreto 25.912 de 25 de setembro de 2020, ampliou o parque em 90,6 ha deixando-o com a conformação que possui hoje. O PNMCBio, localizado na latitude 23° 23.5'S e Longitude 47° 28.5'O (Figura 1), foi criado em 2011 para proteger um fragmento florestal de Floresta Estacional Semidecidual da Mata Atlântica em estágio médio (Coelho, 2013) e que se conecta a corredores florestais das matas ciliares do córrego Campininha, que após atravessar o parque deságua no Rio Sorocaba (Sorocaba, 2014).

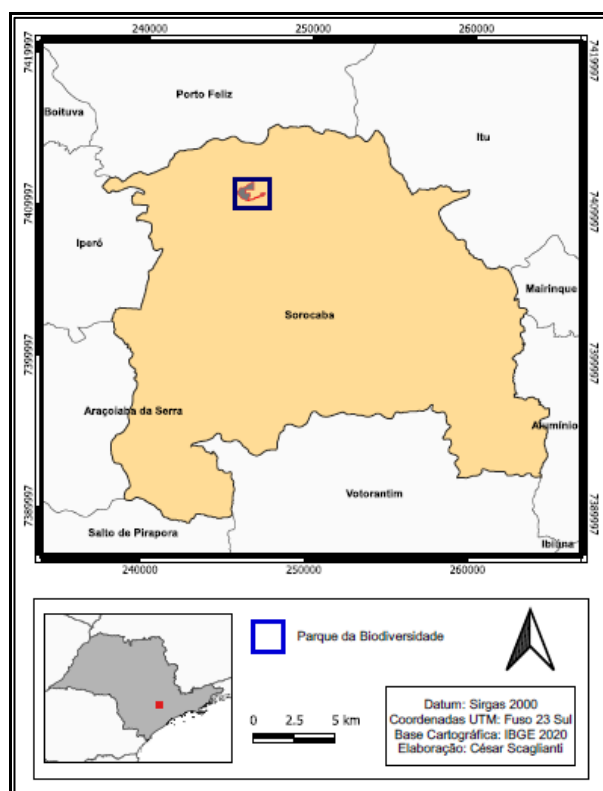


Figura 1- Localização do Parque da Biodiversidade (PNMCBIO), município de Sorocaba, SP.

O PNMCBio está inserido em uma região ecotonal entre a Mata Atlântica e o Cerrado, que caracteriza a região de Sorocaba (ALBUQUERQUE e RODRIGUES, 2000). É recoberto pelas fitofisionomias Floresta Estacional Semidecidual e por Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, que possuem espécies de Cerrado e da Floresta Ombrófila Densa da



Mata Atlântica. Quando o parque foi criado, a sua vegetação era formada por fragmentos de vegetação nativa, por plantios homogêneos de *Eucaliptus grandis* W.Hill, *Pinus* sp e por áreas com vegetação herbácea. - Em 2013, a vegetação do parque passou por um processo de restauração florestal, com a limpeza de plantas invasoras, sobretudo gramíneas, e recebeu plantios de enriquecimento, em que se planta principalmente espécies dos estádios finais da sucessão e o objetivo é aumentar a diversidade de espécies na restauração florestal e plantios de adensamento onde o objetivo preencher os espaços vazios com plantios de espécies principalmente pioneiras. , A restauração do PNMCBIO recebeu de cerca de 70.000 mudas de árvores (Sorocaba, 2015). Em 2017, a restauração florestal do parque passou por uma manutenção quando houve novamente a limpeza, e novos plantios de enriquecimento.

O clima do local é o Cwa, segundo a classificação de Köppen, e com precipitação média anual de 1.355 mm (Figura 2) concentrada no verão (INMET, 2019).

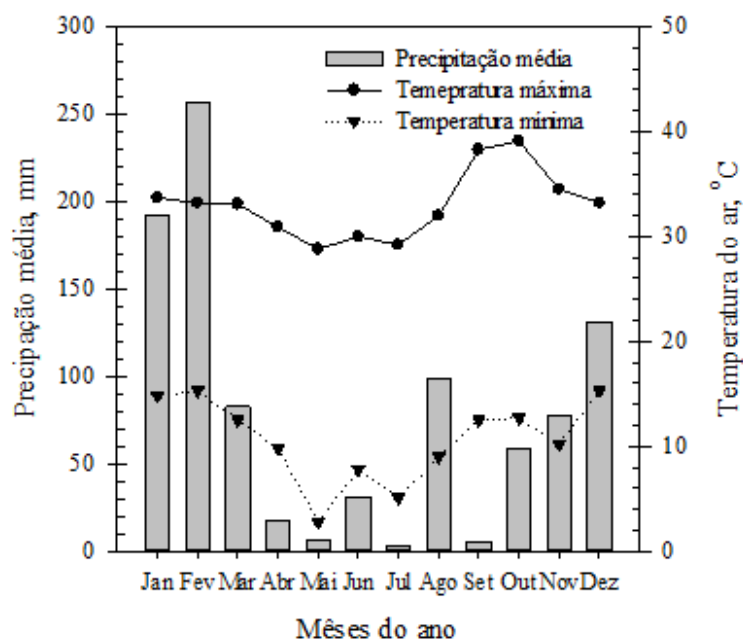


Figura 2- Precipitação média e temperaturas máximas e mínimas da área de estudo para os anos de 2019 e 2020, período de coletas dos dados.

A pedologia do parque é formada por uma associação de Latossolos Vermelhos (LV), com a ocorrência de Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso e muito argiloso e Latossolo Vermelho Distrófico típico textura média, solos com boa drenagem e profundos (EMBRAPA, 2018), cuja caracterização química e granulométrica é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização química e granulométrica das camadas 0-20 e 20-40 cm de um Latossolo Vermelho do, em função do tipo de cobertura florestal.

Atributos do solo	VH		BF		ECP		MTA	
	Camadas do solo, cm							
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0	9,0	3,0
K <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,7	0,4	0,9	0,9	1	0,7	1,3	2
Ca <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,9	4,1	4,2	1,5	3,6	2	61	8,4
Mg <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,9	1,4	3,4	1,8	4,1	1,8	14	5,3
Al <sup>3+</sup> (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8	11	10	13	36	43	2	21
H+Al (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	31	47	50	50	109	115	55	72
SB	9,5	5,9	8,5	4,2	8,7	4,5	76,3	15,7
CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	40,5	52,9	58,5	54,2	117,7	119,5	131,3	87,7
V (%)	23,46	11,15	14,53	7,75	7,39	3,77	58,11	17,9
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,38	3,2	0,08	0,08	0,18	0,05	1,25	0,25
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,0	1,0	1,0	1,2	0,8	0,4	1,6	0,8
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	3,8	28	42	46	14	82	6,8	30
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	1,4	3,6	3	0,8	2,8	1,6	5,4	0,8
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	154	60	52	32	15,6	4,8	82	46
S (mg dm <sup>-3</sup> )	1,1	11	11	9,2	5,9	8,5	1	3,1
Argila (%)	14	13	33	21	18	20	33	42
Silte (%) (Areia)	49	48	9	12	25	24	11	8
Areia (%) (Silte)	37	39	58	67	57	56	56	50
Classificação Textural (Embrapa, 2018)	Franca	Franca	Franca	Franca	Franca	Franca	Franca	Franco-argilosa

P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), Al (alumínio), H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup> (acidez potencial), SB (soma de bases), CTC (capacidade de troca catiônica), V% (saturação de bases), B (boro), Cu (cobre), Mn (manganês), Zn (zinco), Fe (ferro) e S (enxofre).

### 3.2. Arranjo experimental e cenários estudados

Com relação ao arranjo experimental, o estudo considerou as seguintes condições:

#### 3.2.1. Uso do solo e caracterização da cobertura vegetal:

Quatro cenários/estratégias foram avaliados, 1) *cobertura florestal nativa com 7 anos de idade em área originalmente coberta por Vegetação Herbácea (VH)*; 2) *cobertura florestal nativa com sete anos em área que originalmente possui florestamento de eucalipto (ECP)*; 3) *cobertura florestal nativa com 7 anos em área originalmente de bota fora (BF)* e 4) *área de remanescente florestal com idade estimada de 40 anos (RF)* que terá o papel de testemunha (área de referência). Em cada cenário, aleatoriamente foram delimitadas 03 (três) parcelas com área de 9 m<sup>2</sup>, onde as amostragens e, medições foram realizadas (Figura 3 e 4).

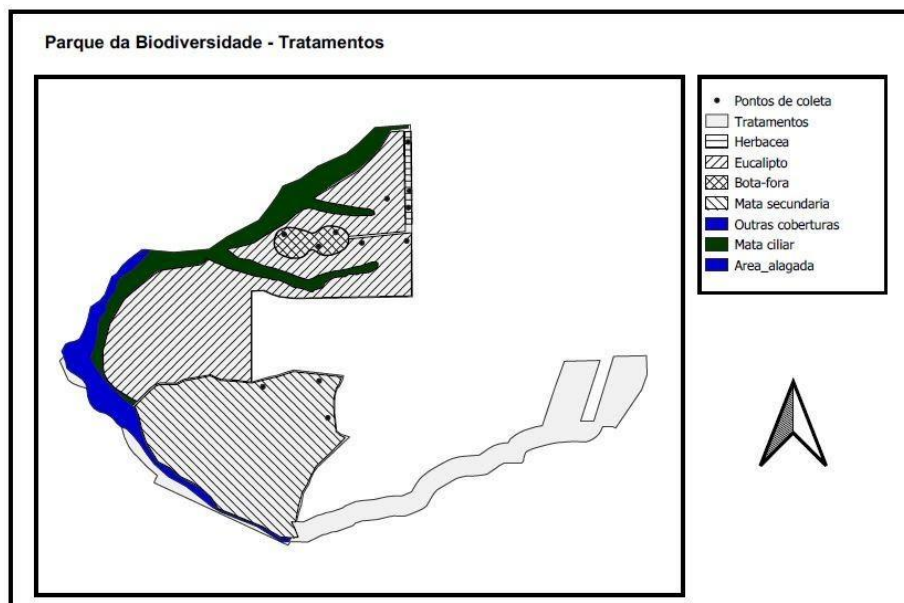


Figura 3 - Parque da Biodiversidade, os cenários da pesquisa e pontos de coleta.

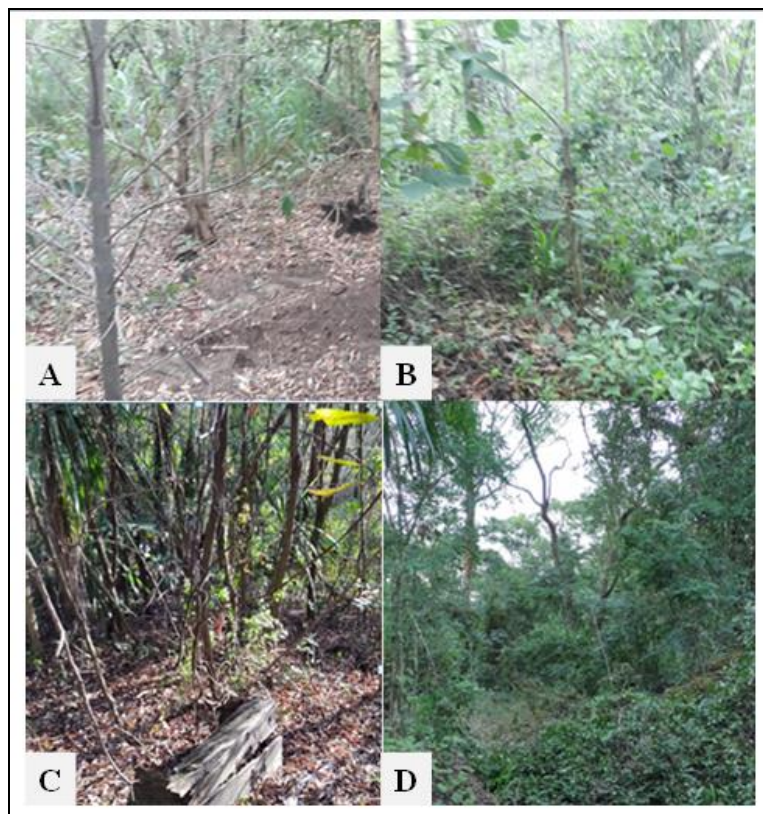


Figura 4 - Imagens dos diferentes tipos de cobertura: Vegetação Herbácea (A), Eucalipto (B), Bota-fora (C) e Floresta Estacional (D).

O cenário VH (vegetação herbácea) fica no limite do PNMCBio e o Parque Tecnológico na porção mais alta do parque e seu formato é estreito (20 metros) e longo, formando uma faixa que se estende ao longo da cerca que separa os dois parques. A posição da VH é entre um aceiro de um lado, e o ECP do outro e sua cobertura original era composta por plantas herbáceas, principalmente *Urochloa decumbens*.

O cenário ECP (eucalipto) é formado pelo remanescente de um antigo florestamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill com presença de sub-bosque e que já havia recebido cortes anteriores. Há 7 anos foi realizada a restauração florestal da área com o raleamento do florestamento original quando as árvores de eucalipto foram cortadas alternadamente nas linhas de plantio e realizado plantio de enriquecimento em toda a área. A mata ciliar que margeia a ECP a jusante entra no florestamento em dois trechos do terreno, mas durante a implantação do experimento estes canais se encontravam sem água.

O BF (bota-fora) é formado por solos provenientes de terraplanagens realizadas na construção do Parque Tecnológico ao lado do Parque da Biodiversidade e de diversos locais do município que foram depositados no local do bota-fora e nivelados de maneira a formar um platô encravado dentro da área de florestamento de eucalipto. A análise

visual do solo do BF mostra o não crescimento de vegetação herbácea, salvo algumas poucas manchas, o que se explica pela origem da maior parte do material ser de solos mais profundos e pobres em matéria orgânica. Foi verificada ainda no BF a presença de entulhos de concreto em alguns pontos amostrados, o que mostra que parte do solo é oriunda de áreas de demolição.

A área MTA (mata) é composta por uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio, com idade estimada de pelo menos 40 anos, onde foram identificados a ocorrência de 79 espécies, sendo 36 espécies Não Pioneiras, 32 espécies Pioneiras e 11 espécies sem categorização, sendo que 4 espécies se encontram em lista de extinção (Coelho, 2013).

**3.2.2. Camadas prospectadas:** As avaliações no perfil do solo se deram nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, sendo o material de solo coletado com trado holandês ou enxadão para amostras deformadas com aproximadamente 0,20 x 0,20 x 0,20 ou torrões menores, e amostras indeformadas utilizando-se de um amostrador de Uhland modificado com anéis com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figuras 5, 6 e 7). Minitrincheiras foram abertas, especialmente para amostragem indeformada na camada de 0,20 a 0,40 m.



Figura 5- Minitrincheira (esquerda), coleta se amostra de solo indeformada 0-20 cm (centro), coleta de amostra de solo indeformada 20-40 cm (direita).

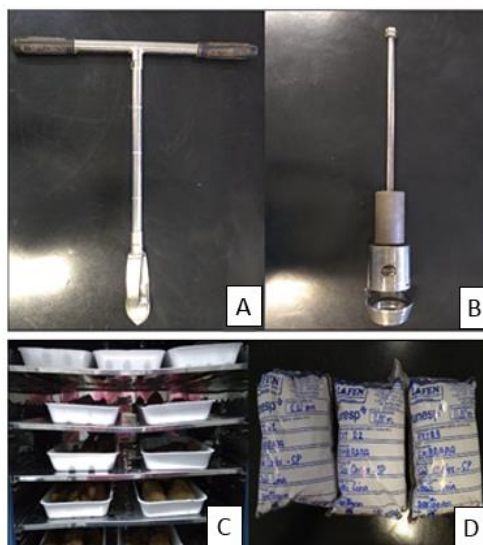


Figura 6 – A - Trado Holandês, B - Amostrador de solo Ulland, C - Amostradores de solo deformado D -Amostra de solo indeformado.



Figura 7: A – Minitrincheira onde foram retiradas as amostras deformadas e B - Amostras deformadas de solo.

**3.2.3. Teor de água no solo:** o efeito do teor de água no solo foi avaliado apenas para resistência tênsil dos agregados (RT), neste caso, foram considerados os seguintes teores de água:  $\theta_1$  - 6% e  $\theta_2$ - 20%. Para os ensaios do índice de cone (IC), o teor de água no solo foi monitorado, uma vez que a resistência do solo à penetração (RP) é fortemente influenciada por este atributo.

As campanhas de campo se deram nos anos de 2020 e 2021, buscando sempre as condições adequadas de amostragem (consistência friável), e acondicionamento de forma a preservar integridade e umidade das amostras indeformadas para os ensaios de laboratório. Foram realizados ensaios in situ para a resistência do solo ao cisalhamento (RC) e à penetração (índice de cone), bem como os testes de infiltração de água no solo para medir a sua condutividade hidráulica.

### 3.3. Indicadores físico-hídricos e mecânicos do solo avaliados

#### 3.3.1. Atributos físico-hídricos do solo

Atributos físico-hídricos do solo: Os atributos físicos avaliados foram àqueles relacionados à massa e volume dos constituintes do solo e a estabilidade de agregados: Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade de Partículas ( $D_p$ ), Porosidade total (TP), Microporosidade (MIC), Macroporosidade (MAC), teor de água no solo, Water Filled Pore Space - espaço poroso preenchido por água (WFPS), Argila Dispersa em Água (ADA), Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio de Partícula (DMP). O material de solo utilizado foi tanto na forma de monólito (amostra indeformada) quanto desestruturada (amostras deformadas), sendo a opção pela forma da amostra, em função do tipo de característica, propriedade ou ensaio (no campo ou no laboratório) do solo. Todos os procedimentos empregados na análise de cada atributo físico seguiram as metodologias propostas por Embrapa (2017) e foram realizados no Laboratório de Física e Mecânica do Solo e Laboratório de Fertilidade e Nutrição de Plantas, ambos da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Experimental de Registro.

A textura foi determinada pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se solução de NaOH como dispersante químico e agitação rápida de 6.000 rpm por 20 minutos. A argila dispersa em água (ADA) foi determinada, também pelo método da pipeta, sem o acréscimo da solução de NaOH, e possibilitou determinar índice de floculação (IF), utilizando a seguinte expressão (EMBRAPA, 1997):

$$IF = ((A - ADA) \cdot A^{-1}) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que IF é o índice de floculação (%); A é argila total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e ADA é a argila dispersa em água ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi determinada pelo método do anel volumétrico em amostras indeformadas de  $98,28 \text{ cm}^3$  (5 cm de diâmetro por 5 cm de altura). A densidade de partículas ( $D_p$ ) foi determinada pelo método do balão volumétrico, que tem como princípio quantificar o volume de álcool necessário para preencher a capacidade de um balão volumétrico de 50 mL, com solo seco em estufa (TFSE).

Foi calculado, também, a partir dos resultados do conteúdo de água no solo (umidade) e da densidade do solo o WFPS (espaço poroso saturado com água,) proposto por DAVIDSON et al. (2000), utilizando a Equação (2), de Paul e Clark (1996). O WFPS é um importante fator empregado na compreensão das relações entre a umidade do solo e os fluxos dos gases, especialmente as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ . Portanto, diretamente, espera-se que este

também possa auxiliar na avaliação da estrutura do solo e na sua relação com outros atributos físico-estruturais correlatos.

$$WFPS = \left( U_s * \frac{D_s}{P_t} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:  $U_s$  - umidade gravimétrica do solo (%);  $D_s$  - densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $P_t$  porosidade total é  $1 - (D_s/D_p)$  e  $D_p$  - densidade de partícula padronizada em  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ .

Para se determinar a porosidade total (PT) foi utilizado o método de Embrapa. (2017) em que se calcula o valor pela diferença de peso de amostras indeformadas saturadas no laboratório e secas em estufas a  $105^\circ \text{C}$  através da equação:

$$PT = \frac{[(a-b)-(c-d)]}{e} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que PT é a porosidade total, a é massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado, em kg, b é massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a  $105^\circ \text{C}$ , em kg, c é massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg, d é massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a  $105^\circ \text{C}$ , em kg e e é volume total da amostra, em  $\text{m}^3$  e que é considerado o mesmo volume do cilindro que contém a amostra indeformada.

A microporosidade foi obtida pelo método da mesa de tensão amostras de solo saturadas e de peso e volume conhecidos são colocadas na mesa de tensão e recebem uma tensão de 0,60 m de coluna d'água até se confirmar que foi atingido o ponto de equilíbrio por pesagem. O valor da microporosidade é obtida pelo cálculo:

$$MIC = \frac{(a-b)}{c} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que MIC é a microporosidade, em  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , a é a massa do solo seco mais a água retida, após o ponto de equilíbrio, a 60 cm de coluna de água, em g, b é a massa do solo seco a  $105^\circ \text{C}$ , em g, e c é o volume total da amostra, em  $\text{cm}^3$ , que é considerado o mesmo volume do cilindro que contém a amostra indeformada.

A Macroporosidade (MAC) é calculada pela equação:

$$MAC = PT - MIC \quad (\text{Eq. 5})$$



A estabilidade de agregados foi determinada por peneiramento em água, com um jogo de peneiras de aberturas de 4, 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,105 mm, sendo determinados os diâmetros médios geométricos (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. O DMP foi obtido segundo proposições de Castro Filho, Muzilli e Odanosch (1998), e o DMG, de acordo com Schaller & Stockinger (1953).

O índice de estabilidade de agregados (IE) que indica o nível de matéria orgânica requerido para manter a estrutura e foi obtido com base na expressão de Pieri (1992):

$$IE = (1,72 CO (A + S)^{-1}) 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde IE é o índice de estabilidade (%), A é o teor de argila (%), S é o teor de silte (%) e CO é o teor de carbono orgânico (%).

A condutividade hidráulica não saturada ( $K_{\theta}$ ) no solo foram obtidas utilizando o infiltrômetro de mini disk em ensaios de campo em cada ponto das áreas de cobertura estudadas, conforme item 3.2.1.(Figura 8), equipamento este que mede a condutividade não saturada em diferentes tensões e a infiltração de água. Este equipamento consiste de duas câmaras (superior e inferior) as quais devem estar cheias com água. A câmara superior é responsável por controlar a sucção, enquanto a câmara inferior contém o volume de água que infiltra no solo a uma taxa determinada pela sucção e pelas características encontradas no solo. Na parte inferior do infiltrômetro está o disco poroso de aço inoxidável que não permite que haja fluxo sem que haja sucção (METER GROUP, 2021).

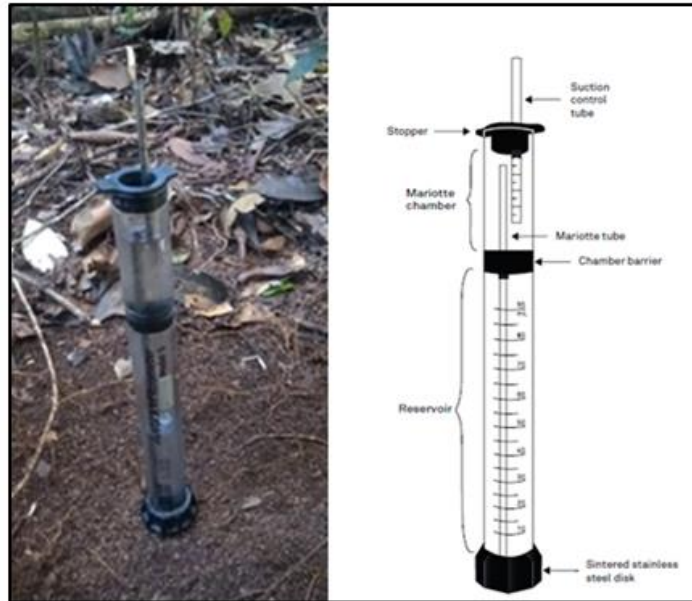


Figura 8: Infiltrômetro Mini Disk. A esquerda detalhe dos ensaios em uma das áreas do estudo. À direita, detalhes do equipamento, segundo o fabricante. (METER GROUP, 2021)

O fabricante assume que, como em meio insaturado os macroporos estão preenchidos com ar, o movimento da água é acomodado por poros menores. Neste sentido, a finalidade do tubo de sucção é eliminar o efeito dos macroporos. Isto é feito controlando a infiltração com uma pequena sucção, pois quando a água está sob tensão, ela não entra em macroporos, porém, infiltra no solo conforme as forças hidráulicas do solo que está sendo ensaiado. O início do ensaio se deu após ambas as câmaras serem completadas com água, e selecionada a sucção para o tipo de solo, neste estudo foi 2 cm. O volume infiltrado e variação da lâmina d'água foram registrados a cada 30 s. O  $K_0$  foi estimado de acordo com o método sugerido por Zang, (1997), o qual requer a medição da infiltração acumulada. A condutividade hidráulica foi então calculada pela (Equação 4):

$$K = C_1 \cdot A^{-1} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que  $C_1$  é a inclinação da curva da infiltração cumulativa em relação à raiz quadrada do tempo e  $A$  que neste estudo foi de 3,93, é um valor que relaciona os parâmetros de Van Genuchten para um determinado tipo de solo em função da taxa de sucção e ao raio do disco poroso. Maiores informações de como estimar  $A$ , assim como, os parâmetros de van Genuchten para as 12 classes de textura podem ser obtidos Carsel e Parrish (1988).

### 3.3.2. Atributos mecânicos do Solo:

A resistência do solo à penetração (RP) ou índice de cone (IC) foi obtido a partir de ensaios realizados com um medidor eletrônico de compactação do solo de esforço manual (Figura 9), denominado PenetroLOG da fabricante Falker. A prospecção foi feita até a profundidade de 0,4 m, especialmente, quando o grau de resistência mecânica da camada/horizonte do solo de cada cenário permitiu a prospecção. Estes ensaios são regulados pela norma ASAE s. 313.3. Os ensaios de RP foram realizados em replicatas de três, aleatoriamente, nas parcelas de cada cenário, totalizando nove ensaios por cenário.



Figura 9: Ensaio de resistência do solo à penetração (RP), realizado com o penetroLOG – medidor eletrônico de compactação do solo.

A resistência tênsil (RT) dos agregados apresenta-se como uma propriedade estrutural que pode afetar a qualidade física do solo (GUEDES FILHO ET AL., 2013; Esteban et al., 2020). Indiretamente a RT mostra como os atributos afetam a estrutura do solo e suas propriedades hidráulicas (EBRAHIM-ZADEH ET AL., 2017). Para a determinação da RT dos agregados, deve-se observar as rachaduras que iniciam na superfície de contato, entre o agregado e a placa de compressão, e propagam-se ao longo da direção do meridiano dos agregados, levando à ruptura agregada quando atingem a região equatorial (Figura 10).

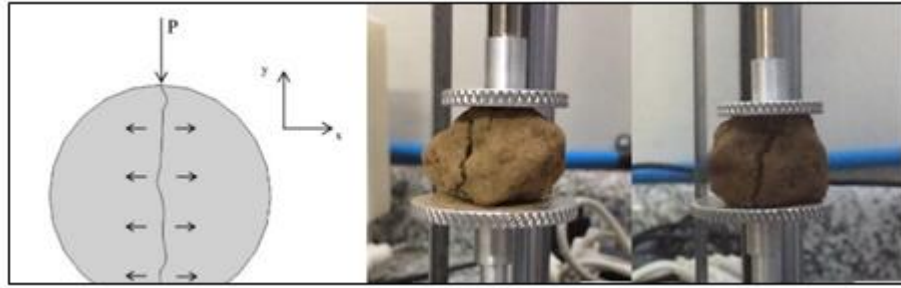


Figura 10: Esquema representativo da ruptura dos agregados, descrito por Dhattrak, 2016 (a esquerda); e agregados após ensaio de ruptura para a determinação da RT em consistência tenaz e friável, respectivamente (a esquerda) (Fonte: Silveira, 2020).

A RT foi calculada conforme equação descrita por Dexter & Kroesbergen, (1985):

$$RT = 0,576 (P/D^2) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que o valor de 0,576 representa o coeficiente de proporcionalidade, resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse têsnil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra têsnil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (mm). O diâmetro efetivo (D), para cada classe de agregado, foi calculado conforme Watts & Dexter (1998):

$$D = D_m [(M/(M\bar{x})^{1/3})] \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que, M é a massa do agregado individual (g);  $M\bar{x}$ , a massa média dos agregados na população (g); e  $D_m$ , o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos limites de cada classe de agregado, isto é:  $[(0,0+1,0)/2]=0,5$ . A medida da RT dos agregados de solo foi representada em kPa.

Antes de proceder com os ensaios de RT em laboratório, os agregados obtidos das distintas camadas e em função de cada tipo de cobertura florestal foram individualizados pelo método *Drop-Shatter Test*, proposto por Shepherd (2000), o qual preconiza a manipulação manual do solo e obtenção da quebra dos mesmos nos planos de clivagem natural. Este método determina que “torrões” caiam por três vezes de uma altura uniforme em um anteparo (folha plástica deitada colocada no chão) ou em uma bandeja plástica. Para otimizar o processo de separação dos agregados na classe de diâmetro desejada para esse estudo (0,0-1,0 cm) foi utilizado o procedimento sugerido por Silveira 2020), conforme apresentado na Figura 11.

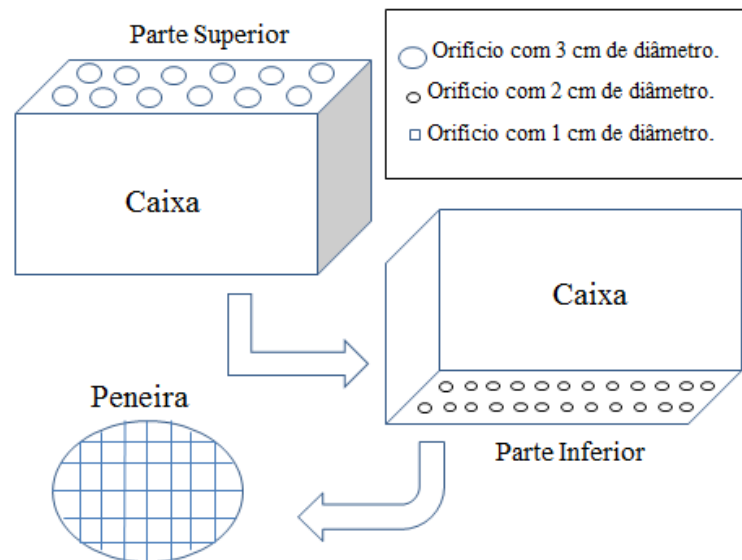


Figura 11: Dispositivo e procedimentos estabelecidos para a separação dos agregados do solo (Fonte: Silveira, 2020).

Admitindo-se três repetições e cinco replicatas necessárias para calcular a massa média dos agregados na população, isto é,  $(M\bar{x})$  por cenário, foram realizados 120 ensaios de RT. Cada amostra de agregado, foi submetida, individualmente, a um teste de tensão-ruptura em um Medidor (atuador) de Força Digital com Célula Interna (Figura 12), modelo IP-90DI, da Impac, conforme sugerido por Imhoff et al. (2002). Os valores das forças, em Newton, automaticamente salvos em aplicativo fornecido pelo fabricante do equipamento, foram utilizadas para os cálculos na Equação 7.



Figura 12: Equipamento e acessórios empregados nas análises de RT. (Fonte: Silveira 2020).

As avaliações de resistência do solo ao cisalhamento (RC) foram realizadas *in situ* (Figuras 13 e 14) pelo método tangencial apenas na camada 0-20 cm utilizando-se o equipamento denominado cisalhômetro, desenvolvido por Silva e Lanças (2006). O procedimento consistiu em cravar o prato cisalhante nº 2 (área total de 23,75 cm²

e área cisalhante de 11,9 cm<sup>2</sup>, definida pela porção de solo contida pelas aletas dispostas em 125° e submetê-lo ao torque necessário para cisalhar (cortar/romper) o solo por rotação. As medições foram feitas apenas na camada superficial pois é na superfície que ocorre a ação das gotas de chuva no solo e que favorece o deslizamento de encostas pela ação das forças de ruptura.



Figura 13: Detalhe do ensaio de RC realizado in situ, em área do estudo.

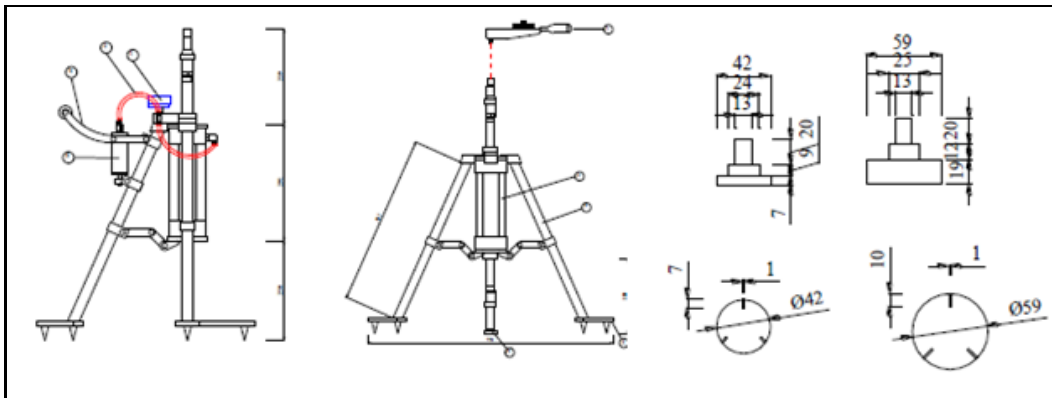


Figura 14: Detalhes e especificações técnicas do equipamento (Silva & Lanças, 2006).

Para construção das envoltórias de Coulomb, quatro níveis conhecidos de tensão normal ( $\sigma_{n1}$ ,  $\sigma_{n2}$ ,  $\sigma_{n3}$  e  $\sigma_{n4}$ ) foram aplicados: 49; 98; 196 e 294 KPa, os quais possibilitam quantificar em resposta ao esforço aplicado ao solo, tendo como resposta, quatro tensões de cisalhamento, isto é:  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  e  $\tau_4$ . A partir do conjunto de tensões normal e de cisalhamento ( $\sigma_n \phi_1$ ) foram construídas as envoltórias de resistência de Coulomb e ajustadas às respectivas equações, de acordo com o modelo a seguir:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que  $\tau$  é a tensão cisalhante (kPa),  $c$  é o intercepto de coesão (kPa),  $\sigma_n$  é a tensão normal (kPa) e  $\text{tg}\varphi$  é o coeficiente de atrito, cujo *arco tg* é o ângulo de atrito interno do solo. A partir da Eq.7, ajustadas para cada cenário/tipo de cobertura vegetal foram estimados os parâmetros de coesão aparente do solo ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno do solo.

### **3.4. Sistematização e análise dos dados**

A sistematização dos dados foi feita por planilhas eletrônicas desenvolvidas especificamente para o estudo. Preliminarmente, os dados foram avaliados por meio de análise estatística descritiva, sendo calculados a média e o coeficiente de variação. A hipótese de normalidade foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Os dados relativos a caracterização físico-hídrica foram submetidos à análise de variância e teste F, observando as particularidades de cada fonte de variação. A comparação entre as médias dos atributos investigados, quando o valor de F for significativo foi feita pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$  de probabilidade). A construção de gráficos e diagramas serão obtidos por meio da versão demonstrativa do aplicativo Sigma Plot 11.0 (Systat Software Inc).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A distribuição relativa das partículas granulométricas (textura) do solo apresentados na Tabela 1, mostrou que com exceção da camada 20-40 cm de MTA (franco-argilosa - argilo siltosa) a classe textural predominante é do tipo franca (Embrapa 2018). Apesar das variações granulométricas entre as condições estudadas, o que é esperado em áreas degradadas e sob processo de restauração, esses dados asseguram uma discussão menos contaminada dos indicadores físico-hídrico-mecânicos e químicos do solo com relação às fontes de variação, definidas para este estudo (tipo de cobertura e camada de solo). A partir da argila total (Tabela 1) e da argila dispersa em água, ADA (Tabela 2) são estimados o índice de floculação (IF). O ADA descreve a suscetibilidade do solo ao processo erosivo, em condições naturais (Miller e Baharuddin, 1986, Paradelo et al., 2013). Isto é, solos mais argilosos favorecem à agregação e, por conseguinte, maior floculação. Neste caso, o IF que apresenta comportamento antagônico ao ADA, pode auxiliar na avaliação da estrutura do solo.

Tabela 2: Valores médios de argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF), diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada.

Camada de solo (cm)	Tipos de cobertura			
	VH	BF	ECP	MTA
	ADA, %			
0-20	8,50bA	22,33aA	9,50bA	14,00bA
20-40	7,83cbA	5,17cB	12,50bA	23,83aB
	IF, %			
0-20	38,16abA	31,92bA	46,81abA	58,48aA
20-40	36,88bA	74,52aB	35,26bA	43,35bA
	DMG, mm			
0-20	2,26aA	0,40bA	0,98abA	2,85aA
20-40	0,14bB	0,02bB	0,03bB	2,15aA
	DMP, mm			
0-20	4,30aA	2,30bA	3,30abA	4,31aA
20-40	1,32bB	0,27bB	0,24bB	3,90aA

VH – vegetação herbácea; BF – bota-fora; ECP – eucalipto; MTA – mata. Valores médios para n = 3. Letras minúsculas comparam horizontalmente as coberturas florestais na mesma profundidade e as maiúsculas comparam verticalmente as camadas de 0-20 e 20-40 cm na mesma cobertura florestal. Diferenças estatisticamente significante estão demonstradas por letras diferentes ( $p < 0.05$ ) pelo teste Tukey.

Os dados de ADA e IF não mostram um padrão de comportamento quando se compara as camadas de solo. Isto é, a camada 0-20 cm, devido a uma expectativa da presença de maior conteúdo orgânico, não necessariamente apresentou menor ADA e maior IF, conforme mostram os dados para o tipo de cobertura BF, em que foram determinados os valores médios de 31,92 e 74,52 %, para IF, nas camadas 0-20 e 20-40 cm, respectivamente. Em MTA, a camada 0-20 apresentou maiores valores de IF em relação à camada 20-40 cm e aos demais tipos de coberturas tipos.

Os resultados de os atributos químicos apresentados na Tabela 3 refletem, em parte, o impacto do tipo de cobertura sobre a qualidade e a funcionalidade estrutural do Latossolo Vermelho, principalmente quando são comparadas às camadas. Tanto para C total e MOS, atributos que se correlacionam positivamente, os valores observados para todos os tipos de cobertura florestal na camada 0-20 cm são estatisticamente superiores à camada de 20-40 cm, sendo que as maiores diferenças são observadas em MTA e BF, isto é 2,5 e 2,0 vezes, respectivamente.



Tabela 3: Carbono total (C total), matéria orgânica do solo (MOS), nitrogênio total (N total) e potencial hidrogeniônico (pH) de um Latossolo Vermelho, em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada.

Camada de solo (cm)	Tipos de cobertura			
	VH	BF	ECP	MTA
	<i>C total, g kg<sup>-1</sup></i>			
0-20	8,36cA	11,64bA	4,08dA	27,25aA
20-40	7,80bB	5,73cB	3,49dB	18,92aB
	<i>MOS, g kg<sup>-1</sup></i>			
0-20	14,40cA	20,07bA	7,03dA	46,97aA
20-40	13,45bB	9,87cB	6,02dB	18,92aB
	<i>N total, g kg<sup>-1</sup></i>			
0-20	1,08abA	1,43abA	0,80bA	2,77aA
20-40	1,01aA	0,91aA	0,70aA	1,45aA
	<i>pH</i>			
0-20	4,24aA	4,27aA	4,22aA	4,71aA
20-40	4,20aA	3,83aA	3,87aA	3,81aB

VH – vegetação herbácea; BF – bota-fora; ECP – eucalipto; MTA – mata. Valores médios para n = 3. Letras minúsculas comparam horizontalmente as coberturas florestais na mesma profundidade e as maiúsculas comparam verticalmente as profundidades de 0-20 e 20-40 cm na mesma cobertura florestal. Diferenças estatisticamente significante estão demonstradas por letras diferentes ( $p < 0.05$ ) pelo teste Tukey.

Ao comparar o efeito do tipo de cobertura dentro de cada camada de solo sobre os atributos químicos, com exceção de pH, são percebidas diferenças significativas (Tabela 3). Em MTA, na camada 0-20 cm foi observado o teor de 46,97 g.kg<sup>-1</sup> para MOS, enquanto em ECP o teor encontrado foi de 7,03 g.kg<sup>-1</sup>, valor muito baixo quando comparado, também, aos valores medidos em BF e VH.

Na camada 20-40 cm, a resposta da MOS para os tipos de cobertura é a mesma observada na camada 0-20 cm. Esses resultados, entretanto, de acordo com sugestão de Craul (1999), com exceção do observado em MTA estão muito abaixo da faixa ótima de matéria orgânica esperada no solo (Figura 15). Quanto ao C total, observa-se comportamento semelhante ao observado para MOS e uma evidente (VH e ECP) redução significativa em profundidade. Com relação ao N total, não houve diferença entre as camadas de solo e o maior impacto significativo foi observado também em MTA (2,77 g.kg<sup>-1</sup>), seguido de BF (1,43 g kg<sup>-1</sup>) e VH (1,08 g kg<sup>-1</sup>), os quais, não diferem estatisticamente.

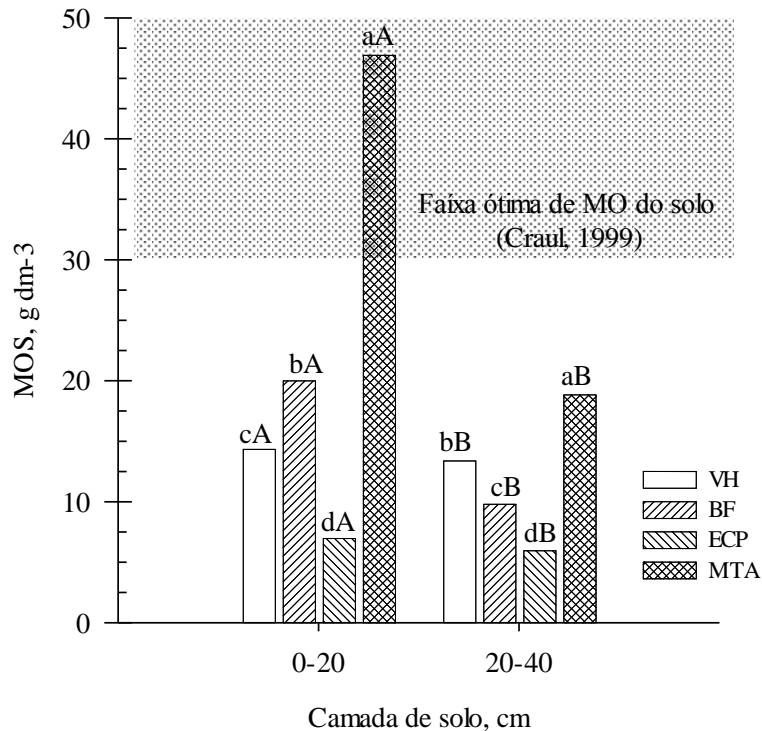


Figura 15 Matéria orgânica no solo (MOS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada

A presença maior de MOS e, por conseguinte, C total, N total e valores médios de pH na camada 0-20 cm, de maneira geral, tem refletido na melhoria da qualidade do solo desta camada, independentemente do tipo de cobertura e, a exemplo dos atributos químicos, também são percebidas alterações positivas e significativas sobre aqueles atributos dependentes da relação massa e volume do solo, assim como, dependentes da tensão-de ruptura do solo, apresentados e discutidos até aqui.

Os atributos que descrevem o comportamento da relação de massa e volume dos constituintes do solo obtidos para cada tipo de cobertura nas camadas de solo de 0-20 a 20-40 cm estão apresentados na Tabela 4. A densidade do solo ( $D_s$ ) variou de 1,47 a 1,66 g.cm<sup>-3</sup>, não apresentando diferenças estatísticas independentemente do efeito do tipo de cobertura e ou camada de solo. Contudo, os valores médios são considerados muito elevados, principalmente para o ambiente florestal, que são mais próximos dos valores obtidos por Guimarães et al. (2014) em estudo em uma floresta secundária, onde a  $D_s$  média na camada 0-20 cm foi de 1,09 g.cm<sup>-3</sup> e na camada 20-40cm de 1,05 g.cm<sup>-3</sup>.

Tabela 4: Valores médios de densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), porosidade total (PT), microporosidade (MIC), macroporosidade (MAC) e water filled pore space/ espaço poroso saturado por água (WFPS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada.

Camada de solo (cm)	Tipos de cobertura			
	VH	BF	ECP	MTA
<b>Ds, g cm<sup>-3</sup></b>				
0-20	1,57aA	1,62 aA	1,52 aA	1,56 aA
20-40	1,66 aA	1,59 aA	1,47 aA	1,49 aA
<b>Dp, g cm<sup>-3</sup></b>				
0-20	2,41aA	2,57aA	2,50aA	2,33aA
20-40	2,52aA	2,52aA	2,54aA	2,47aA
<b>PT, g kg<sup>-1</sup></b>				
0-20	0,35aA	0,35aA	0,41aA	0,33aA
20-40	0,31bA	0,36abA	0,43aA	0,36abA
<b>MIC, g kg<sup>-1</sup></b>				
0-20	0,12aA	0,14aA	0,17aA	0,15aA
20-40	0,10aA	0,11aA	0,18aA	0,16aA
<b>MAC, g.Kg<sup>-1</sup></b>				
0-20	0,23aA	0,21abA	0,24aA	0,18bA
20-40	0,21abA	0,25aB	0,25aA	0,20bA
<b>WFPS %</b>				
0-20	73,11aA	82,33aA	86,52aA	97,11aA
20-40	63,58abA	54,25bB	80,03abA	93,50aA

VH – vegetação herbácea; BF – bota-fora; ECP – eucalipto; MTA – mata. Valores médios para n = 3. Letras minúsculas comparam horizontalmente as coberturas florestais na mesma profundidade e as maiúsculas comparam horizontalmente as profundidades de 0-20 e 20-40 cm na mesma cobertura florestal. Diferenças estatisticamente significante estão demonstradas por letras diferentes (p<0.05) pelo teste Tukey.

Ao considerar a classificação de Reynolds (2007) apresentada na Figura 16, nota-se que para todos os tipos de cobertura, mesmo em MTA (1,49 e 1,56 g cm<sup>-3</sup> para as camadas 0-20 e 20-40 cm, respectivamente) estão na faixa III (valores > 1,2 g cm<sup>-3</sup>), a qual indica restrição para o desenvolvimento do sistema radicular e reduzida aeração no solo. Apesar desta situação de restrição, conforme retratam os valores de PT (Tabela 4), observações de campo mostram que MTA se estabeleceu e as árvores aparentam ter um bom desenvolvimento. Provavelmente, um preparo do solo adequado capaz de aliviar a história de tensão de manejos e, ou usos anteriores durante o processo de restauração, poderia ter melhorado as condições adversas à estrutura do solo.

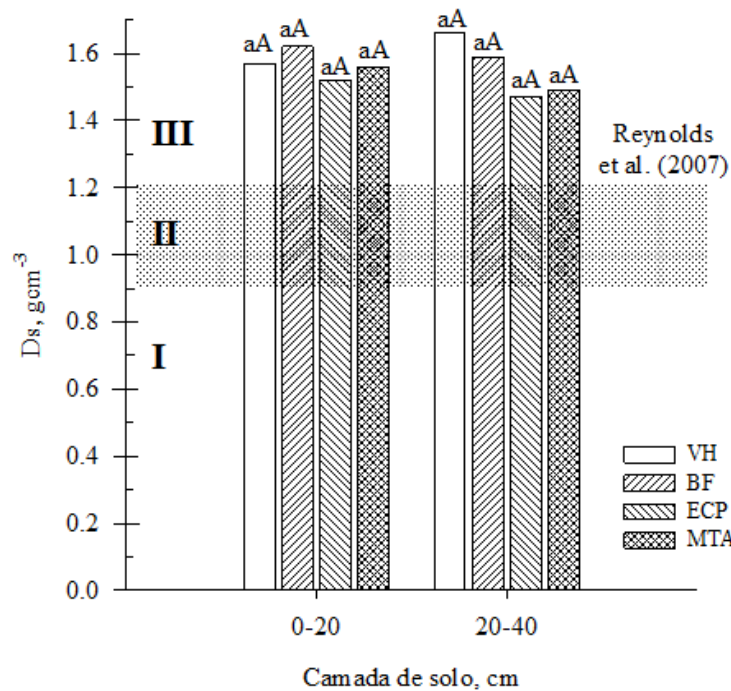


Figura 16: Densidade do solo de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada.

Os valores de  $D_p$  variaram de 2,33 a 2,57  $\text{g cm}^{-3}$  e também, não diferenciaram estatisticamente entre os tipos de cobertura e camada de solo, mas refletem os valores esperados para solos minerais e não solos que estão sob o “ambiente de floresta”, no qual a matéria orgânica tende a se correlacionar negativamente com esta característica de solo e onde se espera valores menores como 0,99  $\text{g cm}^{-3}$  verificado por Blanco-Canqui (2005).

A porosidade total (PT), dependente da relação  $D_s$  e  $D_p$  refletiu o mesmo comportamento. Os valores são baixos, mesmo em MTA, e não diferiram estatisticamente entre tipos de cobertura e camada de solo, contudo nota-se uma tendência de aumento dos vazios do solo em ECP, alcançando o valor de 0,43  $\text{g cm}^{-3}$  na camada 20-40 cm (Tabela 3), enquanto a  $D_s$  atinge o menor valor registrado no estudo, em linha com outros estudos que verificaram a relação negativa entre  $D_s$  e PT (SILVEIRA JÚNIOR ET AL, 2011, CINTRA, 1997).

O estudo em questão não aborda o fluxo de gases, mas os resultados de WFPS, por associação, demonstram o nível de anoxia do solo nos diferentes tipos de cobertura florestal, assim como, a importância de se compreender melhor a função estrutural do solo e os seus reflexos sobre o conteúdo de água e os processos físicos, químicos e biológicos associados.

A resposta indireta à difusibilidade de gás ou anoxia pode ser vista na comparação entre camadas (Tabela 4), quando se relaciona microporosidade, conforme relata

Eickenscheidt e Brumme (2013) e teor de argila com WFPS (BUTTERBACH-BAHL Et Al. 2013). Neste caso, MTA com predomínio de solos de característica argilosa, as maiores emissões (> WFPS), provavelmente, tenderiam a ser registradas apenas depois de algumas horas ou dias, após a ocorrência de chuva, quando o solo estaria mais seco.

A distribuição relativa do tamanho de poros (Tabela 4) revela que o impacto do tipo de uso e camada de solo, ainda que discreto se deu na macroporosidade (MAC), onde na camada 0-20 cm MTA, com menor distribuição relativa ( $0,18 \text{ g.kg}^{-1}$ ) diferencia-se de ECP ( $0,24 \text{ g kg}^{-1}$ ), cuja cobertura florestal promoveu maior proporção de MAC, variação que ocorre quando se compara a porosidade promovida por diferentes coberturas florestais (XIA ET AL., 2019). É possível que o sistema radicular do ECP, dada às suas características possam ter influenciado positivamente a MIC e MAC e por consequência a PT.

Os valores de WFPS (Tabela 4) para a camada de 0-20 cm variaram de 73,11 (VH) a 97,11 (MTA), mas não diferiram estatisticamente. Na camada de 20-40 cm os valores variaram de 54,25 (BF) a 93,50 (MTA) e apresentaram diferenças estatísticas entre os tipos de cobertura, em que MTA, apesar do maior valor médio é semelhante a ECP e VH, mas todos são superiores estaticamente a BF. O impacto das coberturas de solo em relação ao WFPS na camada 0-20 provavelmente promoveu a sequência  $\text{MTA} > \text{ECP} > \text{BF} > \text{VH}$  e na camada 20-40 cm a sequência  $\text{MTA} > \text{ECP} > \text{VH} > \text{BF}$ , em linha com o estudo de Lopes et al. (2020). Quando se compara as camadas, embora os valores observados em 0-20 cm sejam superiores aos observados em 20-40 cm, o efeito significativo da profundidade ocorreu apenas em BF (82,33% vs 54,25 %), reiterando mais uma vez, conforme já observado para Ds e PT, a capacidade de maior/melhor restauração da função estrutural na camada superficial do Latossolo Vermelho. Todavia, o regime hídrico ao que o solo está exposto e a habilidade dele armazenar ou dar fluxo são determinantes na interpretação deste atributo.

Do ponto de vista do fluxo de gases, o conteúdo de água no solo se correlaciona diretamente com WFPS e este com as perdas de  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera. Estudos mostram que o WFPS regula os processos do ciclo do nitrogênio (Figura 17). Quando WFPS está abaixo de 60%, o principal processo de formação de  $\text{N}_2\text{O}$  é a nitrificação, entre 60-80% a desnitrificação é o principal processo e quando o WFPS ultrapassa 80% há formação de  $\text{N}_2$ , e neste caso ocorre o retorno para atmosfera, fechando o ciclo do nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera. O estudo em questão não aborda o fluxo de gases, mas os resultados de WFPS, por associação, demonstram a importância de se compreender melhor a função estrutural do solo e os seus reflexos sobre o conteúdo de água e os processos físicos, químicos e biológicos associados.

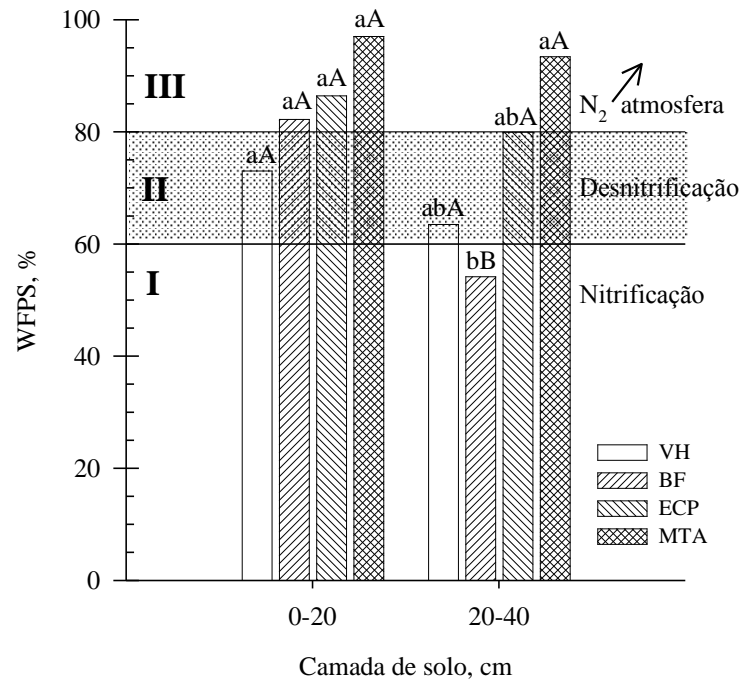


Figura 17: Espaço poroso saturado por água (WFPS) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada (I: processo de nitrificação. II: processo de desnitrificação. III: retorno de N<sub>2</sub> para atmosfera).

Considerando, portanto, as condições em que foram conduzidas as avaliações para estimativa de WFPS, há evidências de que apenas em BF, a via de formação do N<sub>2</sub>O, provavelmente, seria à nitrificação e em ambas as camadas de VH, seria a desnitrificação enquanto em MTA e ECP haveria a formação de N<sub>2</sub>, com retorno direto para atmosfera (Tabela 4 e a Figura 17). De acordo com a literatura (MOREIRA E SIQUEIRA, 2006; SIGNOR ET AL., 2014), há relatos de que tanto as reações de nitrificação quanto as de desnitrificação são afetadas por atributos do solo, como aeração, temperatura, umidade, reação do solo, fertilizantes, matéria orgânica disponível, relação carbono/nitrogênio (C/N) e a presença de fatores tóxicos aos microrganismos.

Os resultados e comportamento observados entre os tipos de cobertura florestal e camadas de solos são também percebidos nos índices de estabilidade de agregados do solo (Tabela 2), os quais além do efeito das partículas granulométricas, são diretamente afetados pelo material orgânico do solo e o processo de agregação (SIX ET AL., 2000). Apesar dos baixos índices (DMG e DMP), de maneira geral, o impacto positivo do tipo de cobertura pode ser visto em ambas as camadas, conforme apresentado a seguir para a camada 0-20 cm (MTA ≥ VH > ECP > BF) e 20-40 cm (MT > VH ≥ ECP > BF), com o maior teor de MO da MTA tanto em 0-20 cm (46,97 g.kg<sup>-1</sup>), como em 20-40 cm (18,92 g.kg<sup>-1</sup>) se refletindo em maior tamanho dos agregados (BLANCO-CANQUI ET AL. 2005). Ao se comparar camadas, além das diferenças significativas é impactante os baixíssimos valores de DMG e DMP

observados em 20-40 cm, nos tipos de uso VH, BF e ECP, evidenciando a fragilidade da estrutura desse solo em profundidade e que apesar do tempo de implantação de cada tipo de cobertura florestal, o manejo não tem se mostrado eficiente e, ou adequado e que os preceitos da restauração florestal podem não ter sido respeitados.

Na Figura 18 estão apresentados os resultados para o índice de estabilidade estrutural (IE) proposto por Pieri (1992).

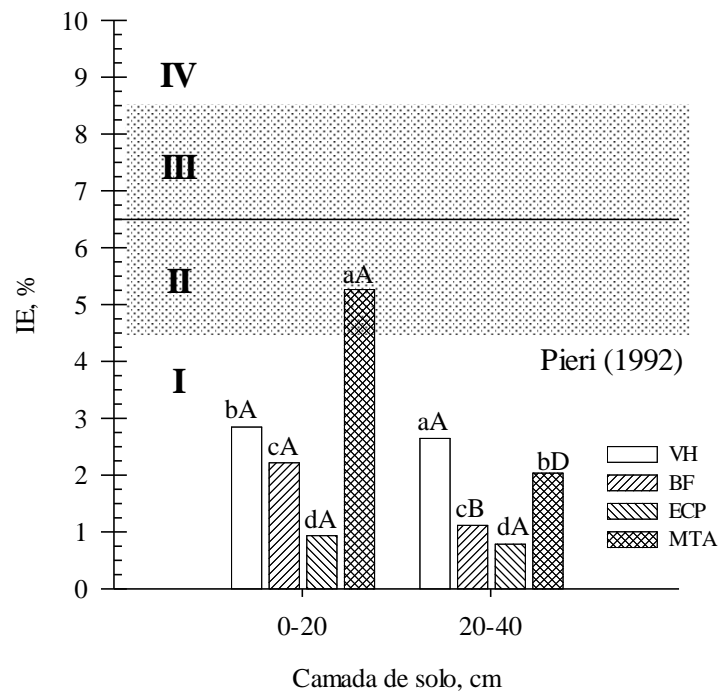


Figura 18: Índice de estabilidade estrutural (IE) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada. (I) Solo estruturalmente degradado, (II) Solo com alto risco de degradação estrutural, (III) Solo com baixo risco de degradação estrutural e (IV) Solo estruturalmente estável.

A região I indica um solo estruturalmente degradado devido à sua intensa perda de matéria orgânica, a região II indica alto risco de degradação estrutural devido à quantidade insuficiente de matéria orgânica, a região III baixo risco de degradação estrutural e a região IV indica quantidade suficiente de matéria orgânica para manter o solo estruturalmente estável. Portanto o IE é um indicador do nível de matéria orgânica requerido no solo para manter a sua estrutura, sendo o seu valor diretamente influenciado pelo carbono orgânico do solo (ou matéria orgânica).

Observando a Figura 18, nota-se que o IE variou significativamente entre os tipos de cobertura vegetal e camada de solo. De uma maneira geral, com exceção de MTA, os demais tipos de cobertura, independentemente da camada prospectada apresentaram valores < 4,2%, indicando que o solo está estruturalmente degradado devido à sua intensa perda de matéria

orgânica. Em MTA, por outro lado, percebe-se que o valor de IE está na região II ( $4,2 > IE > 6,2\%$ ), indicando alto risco de degradação estrutural devido à quantidade insuficiente de matéria orgânica. Esses resultados podem ser justificados pelos baixíssimos valores de C total e MOS, conforme mostrados na Tabela 5 e Figura 19, mas também pelos baixos teores de argila e a própria variação granulométrica (apesar do domínio da classe textural Franca), observada entre as amostras das diferentes camadas e tipos de cobertura (Tabela 1). Silva et al. (2022) e Iori et al. (2014), estudando o impacto do uso do solo em áreas de proteção permanente da sub-bacia do Rio Ribeira de Iguape, mostram a importância da estimativa destes atributos, com vistas ao uso sustentável destes pedoambientes.

Ainda com base na Figura 20, podem ser estabelecidas para cada camada prospectada as seguintes sequências de impacto positivo do tipo de cobertura sobre o IE: 0-20 cm: MTA>VH>BF>ECP e 20-40 cm: VH>MTA>BF>ECP. Chama atenção os baixos índices de ECP e BF, em torno de 1%, principalmente na camada de 20-40cm, que podem ser explicados pelo baixo teor de CO e de argila do solo (VILAMIL ET AL,2006).

Os valores médios de umidade ( $\theta$ ), condutividade hidráulica ( $K_{\theta}$ ), índice de cone (IC) e resistência tênsil de agregados (RT) para os conteúdos de água  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , estão apresentados na Tabela 5.



Tabela 5: Valores médios do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ), condutividade hidráulica ( $K_{\theta}$ ), índice de cone (IC) e Resistência Tênsil de agregados (RT) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada.

Camada de solo, cm	Tipos de cobertura			
	VH	BF	ECP	MTA
	$\theta, g\ kg^{-1}$			
0-20	0,25aA	0,29aA	0,35aA	0,32aA
20-40	0,20aA	0,19aB	0,34bA	0,34bA
	$K_{\theta}, mm\ h^{-1}$			
0-20	162,70bA	36,43 cA	101,62bA	358,09aA
20-40	244,88aB	25,79cA	42,45cB	136,31bB
	IC, kPa			
0-20	3170,86aA	2402,09aA	2722,07aA	2814,48aA
20-40	5592,79abB	3392,89bA	4364,14abA	6090,22aB
	RT01, kPa			
0-20	364,98aA	448,62aA	569,38aA	740,35aA
20-40	552,62bA	559,93bA	757,37bA	1447,73aB
	RT02, kPa			
0-20	100,95aA	87,21aA	77,13aA	104,79aA
20-40	77,00cA	144,85abB	94,47bcA	189,18aB

VH – vegetação herbácea; BF – bota-fora; ECP – eucalipto; MTA – mata. Valores médios para  $n = 3$ . Letras minúsculas comparam horizontalmente as coberturas florestais na mesma profundidade e as maiúsculas comparam as profundidades de 0-20 e 20-40 cm, na mesma cobertura florestal. Diferenças estatisticamente significativas estão demonstradas por letras diferentes ( $p < 0.05$ ) pelo teste Tukey.

A condutividade hidráulica ( $K_{\theta}$ ) foi modificada significativamente pelo tipo de cobertura florestal e camada prospectada apresentando na camada 0-20 cm de MTA o maior valor de  $K_{\theta}$  (358,09 mm.h<sup>-1</sup>), o que deve ser explicado por se tratar de uma floresta mais antiga e com o solo mais estruturado (LEITE ET AL., 2017) seguida por VH e ECP, os quais não diferiram estatisticamente e pelo BF com o menor  $K_{\theta}$ , que diferiu dos demais tratamentos. O maior valor do  $K_{\theta}$  na camada 0-20 cm em MTA também pode ser explicado pelo maior teor de C total (27,25 g.kg<sup>-1</sup>) do seu solo entre todas coberturas (LOPES ET AL., 2020). Na camada 20-40cm o maior valor de  $K_{\theta}$  foi observado em VH, seguido por MTA, e depois pelo ECP e BF que não diferiram estatisticamente. O baixo valor do  $K_{\theta}$  em BF (36,43 mm.h<sup>-1</sup>) não se explica pelo valor de seu Ctotal no solo (11,64 g.kg<sup>-1</sup>), razoavelmente maior do que o C total de VH e ECP, mas pelo fato de ser um solo de aterro que começou a se estruturar recentemente ao contrário de VH e ECP que são formados por solos com cobertura vegetal há mais tempo em linha com estudo de Leite et al. (2017). Ainda nesta camada houve grande variação da condutividade hidráulica com VH apresentando a maior  $K_{\theta}$  (244,88 mm.h<sup>-1</sup>), seguido por MTA (136,31 mm.h<sup>-1</sup>), apesar do C total do VH (7,80 g kg<sup>-1</sup>) ser muito menor que o de MTA (18,92 g kg<sup>-1</sup>). Esta grande variabilidade no valor da condutividade

hidráulica foi verificada por Nielsen et al. (1973) que ocorre mesmo em áreas homogêneas seja em pequenas ou longas distâncias.

Ao considerar a classificação de Freire et al. (2003), apresentada na Figura 19, a condutividade hidráulica saturada variou de moderadamente lenta (V) a muito rápida (I), estando as maiores taxas de infiltração na camada superficial e associada às áreas sob a cobertura de MTA e VH.

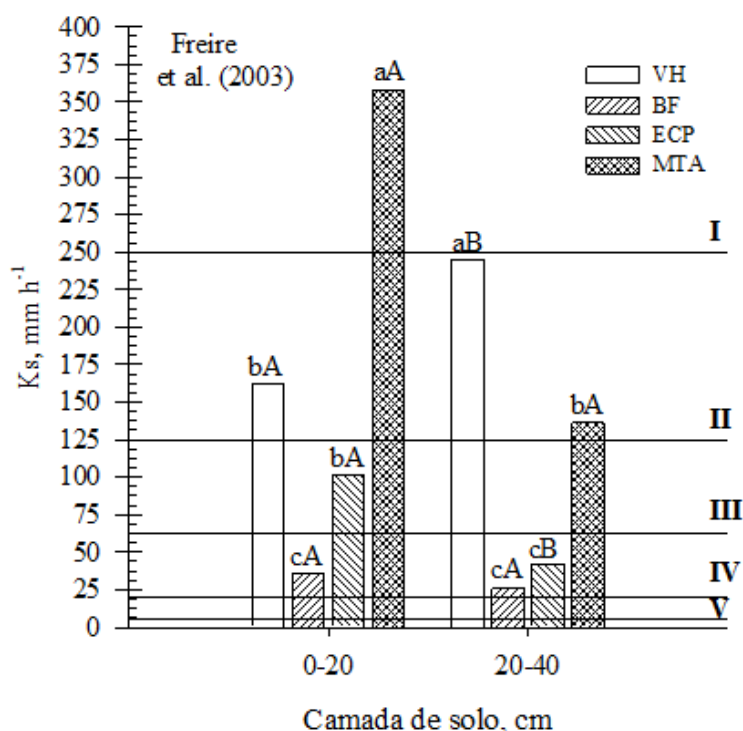


Figura 19: Valores médios de Ks e respectiva classificação, adaptado de Ferreira (1999), de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura e florestal e camada de solo prospectada. I (muito rápida): >250; II (rápida): 250-125; III (moderadamente rápida).

Com relação ao índice de cone, IC (Tabela 5), não foi verificada diferença estatística para os resultados médios da camada 0-20 cm. É interessante destacar que apesar de resultados semelhantes para este atributo entre os diferentes tipos de cobertura florestal, o maior valor absoluto de IC (3.170,86 kPa) observado em VH também foi onde houve o menor conteúdo de água no solo (0,25 kg.kg<sup>-1</sup>), comportamento já esperado por a resistência à penetração ser inversamente proporcional à umidade do solo. Outra possível explicação é a quantidade de fragmentos grosseiros no solo em VH, que elevam a resistência a penetração pela maior estrutura esquelética que dão ao solo, conforme relatado por Manuwa (2012) e por Jones e Arp (2019).

Na camada 20-40 cm o maior valor de IC foi observado em MTA (6.090,22 kPa) mas não diferiu estatisticamente de ECP e VH. Por outro lado, foi BF que promoveu o menor

valor de IC (3.392,89 kPa). A explicação para estes resultados pode estar associada teor de argila de MTA (41,83%) que é muito maior que a do VH (12,83%), do BF (21,33%) e que ECP (19,50%), conforme relatado por Jones e Arp (2019), já que conteúdo de água no solo, neste caso, contraria os resultados de IC obtidos para os respectivos tratamentos, além da ocorrência de fragmentos grosseiros no solo.

A interpretação para os dados de IC são mais consistentes quando se opta pelo perfil de penetrometria, conforme mostrado na Figura 20. Nota-se que na camada mais superficial (0–10 cm) o tipo de cobertura não afetou significativamente a resistência mecânica do solo à penetração (RP), passando de fato a ocorrer a partir dos 20 cm de e prevalecendo até os 40 cm de profundidade. De acordo com os perfis de penetrometria obtidos para cada tipo de cobertura florestal, percebe-se que o solo em MTA exibe uma maior resistência, sendo seguido por VH, ECP e BF.

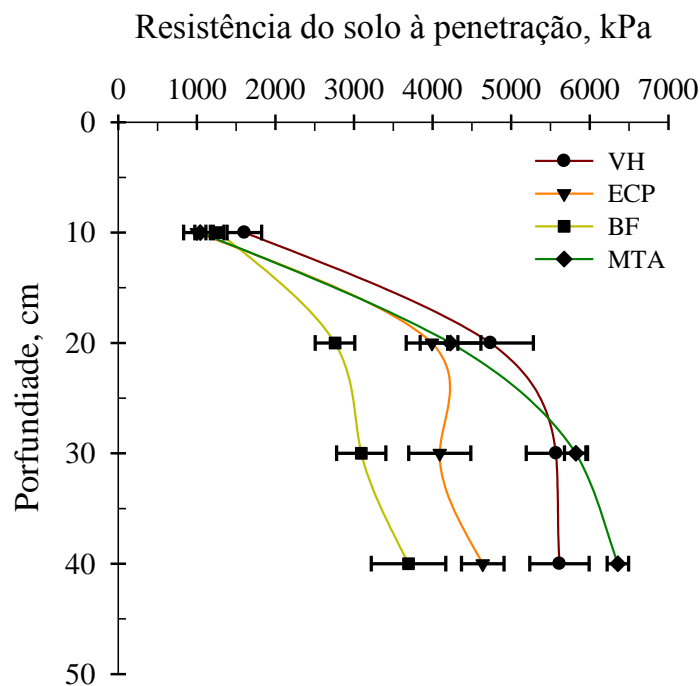


Figura 20: Perfil de Resistência do solo à Penetração de um Latossolo Vermelho para cada tipo de cobertura florestal e camada de solo prospectada.

É importante ressaltar que por não se tratar de áreas agrícolas e, portanto, sem um histórico de tensão advindo de tráfego ou trabalhabilidade do solo, esses resultados refletem uma estruturação e adensamento decorrente do processo e histórico de restauração de cada um dos cenários avaliados. Em BF os baixos vales observados provavelmente são consequência dos baixos valores de DMP e DMG devido ao baixo aporte de material

orgânico e/ou ausência de um sistema radicular mais estabelecido e que se reflete na pouca estruturação em profundidade.

A resistência tênsil (RT), de maneira geral, é reduzida com o aumento do conteúdo de água ( $\theta$ ) no solo (Tabela 5). Neste caso, prioriza-se a comparação dos efeitos dos tipos de cobertura dentro e entre as camadas de solo. Assim, quando os agregados da camada 0-20 cm foram submetidos a  $\theta_1$ , conteúdo de água que reflete uma condição tenaz deste Latossolo Vermelho, nota-se a ausência de diferença significativa entre os tipos de coberturas. Apesar dos resultados de RT entre as diferentes coberturas serem semelhantes chama a atenção o maior valor observado deste atributo na camada 0-20 cm de MTA, (740,35 kPa), pode ser relacionado ao impacto positivo deste tipo de cobertura sobre a estrutura do solo da camada 0-20 cm (WATTS e DEXTER, 1988). Este impacto é reiterado na camada 20-40 cm, onde MTA confere um valor médio de 1.447,73 kPa, sendo superior e diferindo estatisticamente dos demais tipos de uso (ECP < BF e VH). Ao comparar as camadas de solo dentro de cada tipo de uso, apenas MTA diferiu estatisticamente, cujo aumento relativo de RT na camada 20-40 cm foi de 49%. O aumento da RT nesta camada, provavelmente, é decorrente não apenas da menor participação do material orgânico, como observado por Vilamil et al. (2006), mas da contribuição e arranjo do sistema radicular, assim como da composição granulométrica (Tabela 1).

Quando foi aumentado o conteúdo de água no solo ( $\theta_2$ ) e se submeteu o solo a uma condição mais friável, nota-se redução de RT dos agregados, independentemente da camada e tipo de cobertura, reiterando o que foi preconizado Kemper e Rosenau (1984) que quando mantido constantes os demais atributos físicos (fatores internos) do solo, é a água que governa o comportamento mecânico do solo. Ao comparar os tipos de cobertura dentro e entre camadas de solo, além da redução de RT, percebe-se mudança no comportamento de RT entre os tipos de cobertura, essencialmente na camada 20-40 cm e reiterando o impacto de MTA sobre a RT dos agregados desta camada (BLANCO-CANQUI ET AL. 2005).

Na Figura 21 e Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados do impacto do tipo de cobertura florestal sobre a resistência à ruptura do solo da camada 0-20 cm do Latossolo Vermelho. Sabe-se que em ambientes naturais e ou preservados, no caso de florestas, as tensões normais e tangenciais (que levam a ruptura do solo) geralmente, são decorrentes do contato das gotas de chuva com o solo ou da massa do próprio solo que em períodos de chuvas são favorecidos os deslizamentos de barrancos e encostas. Assim, quanto menor for a proteção e cobertura do solo, ele estará mais suscetível à ruptura (cisalhamento) que irá variar com as características como a sua granulometria, e propriedades, como conteúdo de

água, Ds, PT, MOS, entre outros. São estes atributos (características ou propriedades) que definem o comportamento da estrutura do solo (maior coesão ou arrançamento interno das partículas), principalmente na capa superficial do solo, razão pela qual neste estudo foi priorizado a estimativa da RC na camada 0-20 cm.

As envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento (RC) para cada tipo de cobertura estão apresentadas na Figura 21. Elas descrevem a resistência do solo à ruptura em função dos carregamentos e ou esforços a que o solo é solicitado. Visualmente, nota-se a seguinte sequência de maior RC para os tipos de cobertura avaliados: BF>ECP>VH>MTA. Isto denota que a partir dos efeitos conjugados da coesão aparente do solo ( $c$ ) e do ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ), o solo em BF oferece uma maior resistência à ruptura, enquanto o solo em MTA, uma menor resistência. Naturalmente, fatores internos do solo como a textura, conteúdo de água no solo e a matéria orgânica influenciam a RC, conforme verificado por Zhang (1984). De toda forma, os resultados sinalizam a importância de que solos de ambientes florestais ou em processo de restauração, devem ter a sua cobertura (nativa ou não) preservada.

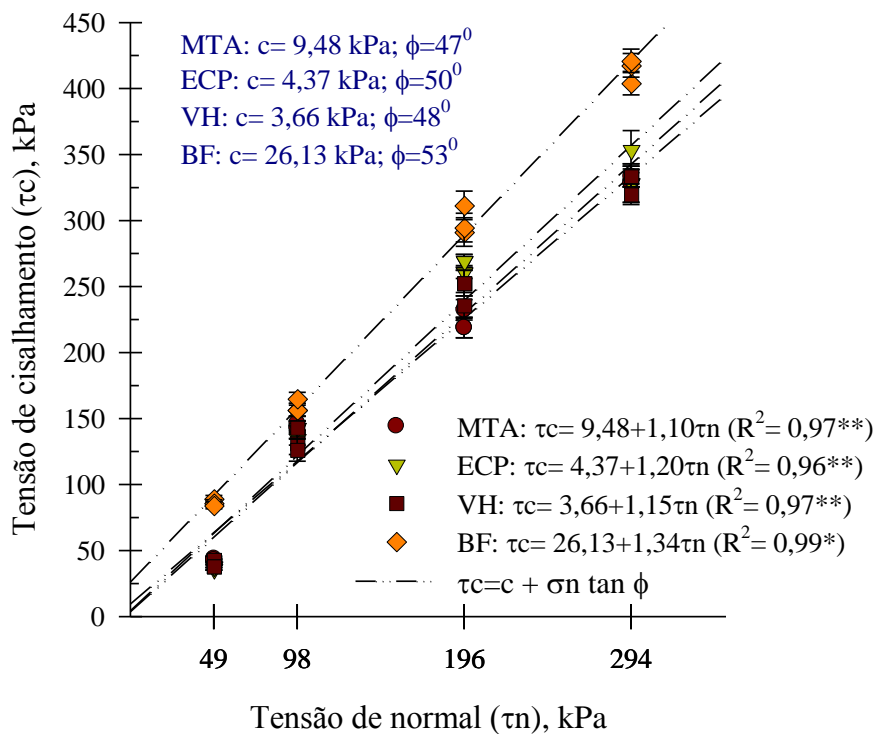


Figura 21: Envoltórias de RC e respectivos valores de coesão aparente (kPa) e ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) da camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho, para diferentes tipos de cobertura florestal.

A partir das envoltórias obtidas para cada tipo de cobertura foram estimados os parâmetros dinâmicos do solo (Tabela 6), o que permitiu estabelecer a seguinte sequência de impacto sobre a coesão aparente do solo ( $c$ ): BF>MTA>ECP>VH e o ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ): BF>ECP>VH>MTA. Com valores de 53<sup>0</sup> e 26,16 kPa, para  $\phi$  e  $c$ , respectivamente, o tipo de cobertura BF reitera a performance da envoltória, sendo o mesmo observado para os demais tipos de cobertura. A coesão aparente ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno do solo respondem aos impactos dos tipos de cobertura vegetal, os quais são também função da constituição granulométrica e de outros atributos físicos e químicos já relatados anteriormente. Esses parâmetros refletem o arranjo e o processo de agregação do solo intra e interagregados do solo conforme estudo de Braida et al. (2007). De toda forma é importante realçar os baixos valores de coesão, que a exemplo dos resultados observados para IE, DMG e DMP corroboram a baixa estabilidade estrutural desse solo, independentemente do tipo de cobertura.

Tabela 6: Equações ajustadas para as envoltórias de Coulomb e os respectivos valores de coesão aparente (kPa) e ângulo de atrito interno do solo ( $\Phi$ ) de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal na camada 0-20 cm.

Cobertura vegetal	Parâmetro do modelo:				
	Intercepto (a)	Coef. angular (b)	R <sup>2</sup>	Coesão do solo (c)	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
VH	3,66	1,15	0,97	3,66	48
BF	26,13	1,34	0,99	<u>26,13</u>	<u>53</u>
ECP	4,37	1,20	0,96	<u>4,37</u>	<u>50</u>
MTA	9,48	1,10	0,97	9,48	47
<i>MTA+ECP+VH</i>	<i>5,84</i>	<i>1,15</i>	<i>0,96</i>	<i>5,84</i>	<i>49</i>

Buscando comparar e separar os modelos (envoltórias) e, portanto, a performance de cada equação ajustada e seus respectivos parâmetros dinâmicos ( $c$  e  $\phi$ ) que descrevem o comportamento da RC dos diferentes tipos de uso, foi empregado o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989), que testa a homogeneidade das variâncias (Tabela 6). Esta análise estatística permite inferir que a envoltória e seus respectivos parâmetros dinâmicos ( $c$  e  $\phi$ ) obtidos para o tipo de cobertura BF diferem estatisticamente de MTA, ECP e VH e que, portanto, a RC deve ser descrita e estimada por equações distintas, conforme são apresentadas na Tabela 6 e Figura 21.

De acordo com o procedimento de Snedecor & Cochran (1989), as demais comparações (MTA vs ECP; MTA vs VH; ECP vs VH) apresentaram homogeneidade em suas variâncias (Tabela 6 e 7) e, portanto, é recomendado a junção de todos os dados ( $n= 36$ )

para que seja ajustado um único modelo (MTA+ECP+VH), o qual deve ser utilizado para estimar a performance de RC.

Tabela 7: Teste de significância, segundo Snedecor & Cochran (1989), entre as envoltórias de Coulomb e seus respectivos parâmetros, obtidos para de um Latossolo Vermelho em função do tipo de cobertura florestal na camada 0-20 cm.

Sistemas integrados	Parâmetro do modelo:		
	F1(1)	Intercepto (a)	Coef. angular (b)
BF vs MTA	**	**	*
BF vs ECP	ns	**	ns
BF vs VH	ns	*	**
MTA vs ECP	ns	ns	ns
MTA vs VH	ns	ns	ns
ECP vs VH	ns	ns	ns

F<sub>1</sub>: testa a homogeneidade das variâncias; \*: significativo (p<0,05); \*\*: significativo (p<0,01) e ns: não significativo.

## 5. CONCLUSÕES

a) O estudo dos atributos físico-hídrico-mecânicos, quando associados à qualidade química do solo se mostrou importante estratégia na avaliação e comparação do impacto de diferentes coberturas florestais sobre a funcionamento estrutural do solo.

b) A sensibilidade de resposta aos impactos das diferentes coberturas florestais e, ou camadas variou com o tipo de atributo e o processo em que ele está associado, devendo aqueles dependentes da relação de massa e volume dos constituintes do solo, assim como da ruptura do solo, ser priorizados em estudos da qualidade física e mecânica do solo.

c) O conteúdo de matéria orgânica (MOS) observado nos diferentes tipos de cobertura, apesar de os valores encontrados estarem muito abaixo daqueles esperados para ambientes florestais, refletiram nas alterações dos atributos físico-hídrico-mecânicos do solo.

d) A mata (MTA), em decorrência dos maiores teores de MOS, favoreceu um impacto positivo sobre a funcionalidade estrutural do solo em detrimento do observado em BF (bota fora). Contudo, os indicadores de qualidade do solo prospectados nesta pesquisa revelam que com exceção de MTA, as estratégias de recuperação do parque ainda não proveram as melhorias esperadas dentro de um processo de restauração florestal ou ecológica, no que diz respeito à qualidade física do solo.

## 6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, G.B.; RODRIGUES, R.R. A vegetação no Morro do Araçoiaba, Floresta Nacional de Ipanema. *Scientia Florestalis*. Iperó (SP). N. 58, p. 145-159, 2000.

ÁLVARO-FUENTES, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C., LÓPEZ, M.V., PAUSTIAN, K., DENEFF, K., STEWART, C.E., ARRÚE, J.L. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects of management in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, p. 1519–1529, 2009.

ANDRADE, A.G.; TAVARES, S.R.L; COUTINHO, H.L.C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 24, n. 220, p. 55-63, 2003.

ARAKI, N.H.T.; MINUCCI, M.F.S. Restauração ecológica no estado de São Paulo, Brasil: orientações, diretrizes e critérios. In: SILVA, H.C. (Org.) **Engenharia Ambiental e Sanitária: Interfaces do Conhecimento**. Ponta Grossa, PR, 2019, Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/arquivos/ebooks/engenharia-ambiental-e-sanitaria-interfaces-do-conhecimento>> . Acesso em 12/02/2021.

ARQUIVO NACIONAL (Brasil). Fundo: Administração da Floresta da Tijuca (TA). Inventário de documentos textuais / Equipe de Documentos do poder Executivo e Legislativo; Sátiro Ferreira Nunes. 2a ed. rev. - Rio de Janeiro: o Arquivo, 2012. 108 p. Disponível em: <<http://dibrarq.arquivonacional.gov.br/downloads/administracao-da-floresta-da-tijuca-2.pdf>> . Acesso em 05/11/2020.

BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resources Research*, Vol. 18, n. 5, p. 1311-1325, 1982.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*. Viçosa-MG. V. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M. & IZAURRALDE, R.C. Mechanical Properties and Organic Carbon of Soil Aggregates in The Northern Appalachians. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 69, p. 1472-1481, 2005.

BRANCALION, P.H.S. Restauração Florestal: Conceito e Motivação. In: BRANCALION, P.H.S.; GANDOLFI, S.; RIBEIRO, R.R. *Restauração Florestal*. São Paulo. Oficina de Texto. 2015. cap. 1.



BUTTERBACH-BAHL, K.; BAGGS, E.M.; DANNENMANN, M.; KIESE, R.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? \*Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Science\*, v. 368, p. 1- 3, 2013.

CALEGARI, L.; MARTINS, S.V.; GLERIANI, J.M.; SILVA, E.; BUSATO, L.C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. Revista Árvore, Viçosa - MG, v. 34, n. 5, p. 871-880, 2010.

CARSEL, R.F.; PARRISH R.S. Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. Water Resources Research. v. 24, n. 5, p. 755-769. 1988.

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

CÉSAR, R.G.; MORENO, V.S.; COLETTA, G.D.; CHAZDON, R.L.; FERRAZ, S.F.B.; DE ALMEIDA, D.R.A.; BRANCALION, P.H.S. Early ecological outcomes of natural regeneration and tree plantations for restoring agricultural landscapes. Ecological Applications. 2017. Disponível em: <<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/eap.1653>>. Acesso em 17/09/2020.

CHAZDON, R. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. Science, v.320, p.1458-1460, 2008.

CRAUL, P.J. Urban soils: applications and practices. John wiley & sons, 1999.

DA COSTA, E.L.; DA SILVA, A.M.; COLOMBO, A.; DE ABREU, A.R. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, p.131-134. 1999.

DA SILVA, R.B.; PIERO, I.; TAVARES, R.; SOUZA, Z.M.; LIMA, C.C.; SILVA, F.A.M.; BENTO, M.S. Do water dynamics and land use in riparian areas change the spatial pattern of physical-mechanical properties of a Cambisol Precision Agriculture. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/230312>>. Acesso em 02/03/2020.

DAVIDSON, E. A., KELLER, M., ERICKSON, H. E., VERCHOT, L. V., & VELDKAMP. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. BioScience, v. 50, n. 8, p. 667-680, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0667:TACMOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TACMOS]2.0.CO;2)>. Acesso em 07/02/2022.

DAY, P.R. Particle Fractionation and Particle-Size Analysis. In: Black, C.A. (ed.) Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Wisconsin, USA. p. 545-567. 1965.

DEB, S.K.; SHUKLA, M.K. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. American Journal of Environmental Science. v. 8, n. 5, p. 489-502, 2012.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research. v. 11, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A.R. & KROESBERGEN, B. Methodology for Determination of Tensile Strength of Soil Aggregates. J. Agric. Eng. Res. v. 31, n. 2, p. 139-147, 1985.

DHATRAK, A. I. Tensile Strength of Soil. Government College of Engineering, Amravati. 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Saurabh-Deshpande-12/publication/301285334\\_Tensile\\_Strength\\_of\\_Soil/links/570f533508aee76b9dae0bbb/Tensile-Strength-of-Soil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Saurabh-Deshpande-12/publication/301285334_Tensile_Strength_of_Soil/links/570f533508aee76b9dae0bbb/Tensile-Strength-of-Soil.pdf)>. Acessado em 12/11/2021.

EBRAHIM-ZADEH, G.; BAYAT, H.; SINEGANI, A.A.S.; ABYANEH, H. Z.; VERECKEN, H. Investigating the correlation between soil tensile strength curve and soil water retention curve via modeling. Soil and Tillage Research, v. 167, p. 9-29, 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997, 212p.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. – 3a ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>>. Acesso em 30/06/2021.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Santos, 5.ed. rev. e ampl. Brasília, DF, Embrapa, 2018, 353 p.

ESTEBAN, D.A.A.; SOUZA, Z.M.; DA SILVA, R.B.; LIMA, E.S.; LOVERA, L.H.; OLIVEIRA, I.N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. Geoderma, v. 362, 2020, 114097. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>>. Acessado em 14/09/2021.

FERNANDO L.D.C. Disponibilidade de água no solo para porta-enxertos de Citrus em ecossistemas de tabuleiro costeiro. Piracicaba, Tese (Doutorado em Agronomia). ESALQ, USP, 1977.

GERMANN, P.; BEVEN, K. Water flow in soil macropores in an experimental approach. *European Journal of Soil Science*, v. 32, n. 1, p. 1-13. 1982.

GROMBONE-GUARANTINI, M.T.; RODRIGUES, R.R. Seed bank and seed rain in a seasonal semi-deciduous forest in south-eastern Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, v.18, p.759-774, 2002.

GUEDES FILHO, O.; DA SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no tillage. *Geoderma*. V. 204 - 205, p. 94–101. 2013.

HOLL, K.D.; AIDE, T.M. When and where to actively restore ecosystems. *Forest Ecology and Management*. v. 261, p1.558-1.563, 2011.

HOLL, K.D.; ZAHAWI, R. A. Factors explaining variability in woody above-ground biomass accumulation in restored tropical forest. *Forest Ecology and Management*. V, 319, p. 36-43, 2014.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 66, p. 1656-1661, 2002.

Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil. Brasília, DF, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 09/11/19.

IORI, P.; DA SILVA, R.B.; AJAYI, A.E.; SILVA S.A.M.; DE FREITAS JUNIOR, M.; SOUZA, Z.M. What drives decline productivity in ageing tea plantation-soil physical properties or soil nutrient status. *Agricultural Science*, v. 2, n. 1, p. 22-36, 2014.

JONES, M.F.; ARP, P. Analyzing and Projecting Soil Moisture and Cone Penetrability Variations in Forest Soils. *Open Journal of Forestry*. v. 9, p. 109-142, 2019.

KAGUEYAMA, P.Y.; CASTRO, C.F.A.. Sucessão secundária, estrutura genética e plantações de espécies arbóreas nativas. *IPEF*. n. 41/42, p. 83-93, 1989.

KEISLING, T. C.; SCOTT, H. D.; WADDLE, B. A.; WILLIAMS, W.; FRANS, R. E. Winter cover crops influence on cotton yield and selected soil properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v. 25, n. 19-20, p. 3087-3100. 1994.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Soil Cohesion as Affected by Time and Water Content. *Soil Science Society of America Journal*. v. 48, n. 5, p.1001-1006, 1984.

KHALEDIAN, Y.; KIANI, F.; EBRAHIMI, S.; BREVIK, E.C.; AITKENHEAD-PETERSON, J. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. *Land Degrad. Develop.* v. 28. p. 128-141. 2016.

LEITE, A.M.; DE SOUZA, E.S.; DOS SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, R.; CANTALICE, J.R.; WILCOX, B.P.; CANTALICE, J.R.; WILCOX, B.P. The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology.* v. 11, n. 3, e.1910. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/eco.1910>>. Acessado em 12/08/2021.

LOPES, V.S.; CARDOSO, I.M.; FERNANDES, O.R.; ROCHA, G.C.; SIMAS, F.N.B.; MOURA, W.M.; SANTANA, F.C.; VELOSO, G.C.; DA LUZ, J.M.R. The establishment of a secondary forest in a degraded pasture to improve hydraulic properties of the soil. *Soil & Tillage Research.* v. 198, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104538>>. Acessado em 16/08/21.

MANUWA, S.I; OLAIYA, O.C. Evaluation of Shear Strength and Cone Penetration Resistance Behavior of Tropical Silt Loam Soil under Uni-Axial Compression. *Open Journal of Soil Science*, V. 2. p. 95-99. 2012.

METER GROUP. Mini Disk Infiltrometer Manual. Pullman, WA, 2020.

MILLER, W. P.; BAHARUDDIN, M. K. Relationship of soil dispersibility to infiltration and erosion of southeastern soils. *Soil Science*, v. 142, n. 4, p. 235-240, 1986.

MOHIEDDINNEA, H.; BRASSEURA, B.; SPICHERA, F.; GALLET-MORONA, E.; BURIDANTA, J.; KOBASSIB, A.; HORENA, H. Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management.* v. 449, 2019. 117.472

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2ª. ed. Lavras, UFLA, 2006.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, I. W.; ERH, K. T. Spatial Variability of Field-Measured Soil-Water Properties. *Hilgardia.* v. 42, n. 7, p. 215-260, 1973.

NOURI, A.; LEEA, J.; YINB, X.; TYLERC, D.D.; SAXTOND A.M. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. *Geoderma.* v. 337, p. 998–1008, 2019.

OWUOR, S.O.; BAHL, K.B.; JACOBS, A.C.G.; MERBOLD, S.L.; RUFINO, M.C.; PELSTER, D.E.; PINÉS, E.D.; BREUER, L. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the highlands of Kenya. *Soil and Tillage Research*. v. 176, p. 36-44, 2018.

PARADELO, R.; VAN OORT, F.; CHENU, C. Water-dispersible clay in bare fallow soils after 80 years of continuous fertilizer addition. *Geoderma*. v. 200-201, p. 40–44, 2013.

PAREJA-SANCHEZ, E.; PLAZA-BONILLA, D.; RAMOS, M.C.; LAMPURLANÉS, J.; ÁLVARO-FUENTES, J; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroecosystem transformed into irrigation. *Soil and Tillage Research*, 174, p. 221–230. 2017.

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. *Soil microbiology and biochemistry*. 2nd ed., California, Academic Press, 1996.

PIERI, C.J.M.G. *Fertility of soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. SPRINGER-VERLAG. Berlin, 1992.

PIYARUWAN, H.I.G.S.; LEELAMANIE, D.A.L. Existence of water repellency and its relation to structural stability of soils in a tropical Eucalyptus plantation forest. *Geoderma*. v. 380. 2020. 114679.

Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Yang, X.M.; Fox, C.A.; Tan, C.S.; Zhang, T.Q. Land management effects on the near-surface physical. *Soil & Tillage Research*. v. 96. p. 316–330, 2007.

RODRIGUES, R.R.; BRANCALION, P.H.S.; ISERNHAGEN, I. (org.). *Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal*. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, 2009a.

RODRIGUES, R.R.; LIMA, R.A.F.; GANDOLFI, S.; NAVE A.G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. v. 142, n. 6, p. 0–1251. 2009b.

SANTANA, M.B. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos. *R. Bras. Ci. Solo*, v.30, p. 1-12, 2006.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Instituto Florestal. *Inventário Florestal*. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2020. 40 p.

SER - SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. PRINCÍPIOS E PADRÕES INTERNACIONAIS PARA A PRÁTICA DA RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA. 2019. Disponível em: <[https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/publications/portugue\\_ser\\_standards.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/publications/portugue_ser_standards.pdf)>. Acessado em 18/04/2021.

SIGNOR, D.; PISSIONI, L. L. M.; CERRI, C. E. P. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. *Bragantia*. V. 73, n. 2, p. 113-122, 2014.

SILVEIRA JUNIOR, S.D.; DA SILVA, A.P.; FIGUEIREDO, G.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B. Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 35, p. 87-95. 2011.

SIX, J., ELLIOTT, E.T., PAUSTIAN, K., Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* v. 32, p. 2099-2103. 2000.

SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical Methods, Eighth Edition*. Iowa State University Press. p. 491. 1989.

SOROCABA. Secretaria do Meio Ambiente. Plano Diretor Ambiental. Sorocaba: Walm, v. 1, 2011. 245p. Disponível em <[https://meioambiente.sorocaba.sp.gov.br/gestao\\_ambiental/wp-content/uploads/sites/4/2015/12/pda-finalvoli.pdf](https://meioambiente.sorocaba.sp.gov.br/gestao_ambiental/wp-content/uploads/sites/4/2015/12/pda-finalvoli.pdf),> Acesso em 30/06/2021.

SOROCABA. Secretaria do Meio Ambiente. Plano de Manejo do Parque Natural Municipal Corredores da Biodiversidade. Biométrica. Sorocaba: Secretaria do Meio Ambiente, 2012. Encarte 2, 387 p. Disponível em: <[https://meioambiente.sorocaba.sp.gov.br/gestao\\_ambiental/wp-content/uploads/sites/4/2015/12/encarte-2-planejamento.pdf](https://meioambiente.sorocaba.sp.gov.br/gestao_ambiental/wp-content/uploads/sites/4/2015/12/encarte-2-planejamento.pdf)>. Acesso em 30/06/2021.

SOROCABA. Secretaria do Meio Ambiente. Plano Municipal de Mata Atlântica. Sorocaba: Secretaria do Meio Ambiente, 2014. 153 p. Disponível em: <<https://meioambiente.sorocaba.sp.gov.br/gestaoambiental/wp-content/uploads/sites/4/2015/12/plano-municipal-de-mata-atlanticarev14vidal.pdf>> acesso em 30/06/2021.

TOLEDO, R.M.; SANTOS, R.F.; BAETEN, L.; PERRING, M.P.; VERHEYEN, K. Soil properties and neighboring forest cover affect aboveground biomass and functional composition during tropical forest restoration. *Applied Vegetation Science*. V. 21, n. 2, p. 179-189, 2018.

VILAMIL, M.B.; BOLLERO, G.A.; DARMODY, R.G.; SIMMONS, F.W.; BULLOCK, D.G. No-till corn/soybean systems including winter cover crops. *Soil Science Society of America Journal*. v. 70, p. 1936-1944. 2006.

WATTS, C.W.; DEXTER A.R. Soil Friability: Theory, Measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science*. v. 49, n. 1, p. 73–84, 1998.

XIA, J.; REN, J.; ZHANG, S.; WANG, Y.; FANG, Y. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China. *Geoderma*. v. 349, p. 25–35. 2019.

ZANG, R. Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 61. p. 1024-1030. 1997.

ZIMMERMANN B.; ELSENBEER H. The near-surface hydrological consequences of disturbance and recovery: A simulation study. *Journal of Hydrology*. v. 364: p. 115–127, 2009.

ZIMMERMANN, B.; PAPRITZ, A.; ELSENBEER, H. Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest–pasture–forest transitions. *Geoderma*. v. 159, p. 209–215. 2010.