

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**MARCUS VINICIUS NAKASATO**

**ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO  
SOLO 12 ANOS APÓS UMA RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

SÃO CARLOS – SP

2022

MARCUS VINICIUS NAKASATO

ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO 12  
ANOS APÓS UMA RESTAURAÇÃO FLORESTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais<sup>1</sup>.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa Lúcia Teixeira de Souza

Coorientador: Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi

SÃO CARLOS – SP

2022

---

<sup>1</sup> Apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Nakasato, Marcus Vinicius

Estrutura da vegetação e atributos químicos do solo 12 anos após uma restauração florestal / Marcus Vinicius Nakasato -- 2022.  
63f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Andréa Lúcia Teixeira de Souza  
Banca Examinadora: Fábio Giordano, Victor Satoru Saito  
Bibliografia

1. Restauração ecológica. 2. Matéria orgânica. 3. Serapilheira acumulada. I. Nakasato, Marcus Vinicius. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Marcus Vinicius Nakasato, realizada em 25/02/2022.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Andrea Lucia Teixeira de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi (EMBRAPA)

Prof. Dr. Victor Satoru Saito (UFSCar)

Prof. Dr. Fabio Giordano (UNISANTA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de São Carlos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAM) pela possibilidade de realização desse trabalho e pela estrutura e qualidade oferecidas pela instituição.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Central Elétrica Anhanguera, representado pelo Sr. José Geraldo Lopes Agapito, Rosalía Rocha Lopes Agapito e Flávio Lopes Agapito, por toda a ajuda, amizade e confiança nesses 14 anos de trabalho. Sem vocês nada disso teria acontecido. Agradeço também, Aníbal Sérgio da Silva, Hélio Jacinto de Oliveira, Ivan Ramos e Fabrício Gomes de Oliveira por todo o auxílio em campo, vocês fazem parte da minha família.

À minha orientadora Profa. Dra. Andréa Lúcia Teixeira de Souza, por todo o aprendizado, paciência e amizade, mesmo em tempos de pandemia. A professora conseguiu mesclar a orientação e conselhos que levarei para a vida toda! Estendo meus agradecimentos para o Prof. Dr. Marcel Okamoto Tanaka.

Ao meu co-orientador Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi por todo o conhecimento de solo passado para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luciano Elsinor Lopes, Prof. Dr. Francisco Antonio Dupas e Prof. Dr. Juliano Costa Gonçalves pela participação na banca de qualificação da aula pública; ao Prof. Dr. Victor Satoru Saito, Prof. Dr. Luciano Elsinor Lopes e Profa. Dra. Raquel Stucchi Boschi pela participação na banca de qualificação do trabalho escrito da dissertação. As sugestões, correções e discussões serviram para enriquecer a dissertação.

Ao Prof. Dr. Fábio Giordano e Prof. Dr. Victor Satoru Saito por terem aceitado o convite para participar da banca de defesa da dissertação e por todas as contribuições.

Ao Vinícius e funcionários do DCAm e PPGCAM pela ajuda e disponibilidade mesmo que à distância.

À Yasmin Carolina Lopes de Oliveira, Caroline Pardi Vicente, Rhauani Silva Costa por toda a ajuda no laboratório para triagem da serapilheira.

Aos meus amigos e amigas da turma de 2020 pela convivência via Google Meet, que tornou a caminhada mais leve e divertida.

A todos da minha família que sempre me apoiaram na minha jornada de vida. Dedico este trabalho aos meus pais Maria da Glória e Nelson (*in memoriam*). Espero sempre ser motivo de orgulho e retribuir tudo o que fizeram por mim!

## RESUMO

NAKASATO, M. V. – Estrutura da vegetação e atributos químicos do solo 12 anos após uma restauração florestal. 2022 – 63p: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – 2022.

Com o atual estado de degradação dos ecossistemas florestais resultante de atividades humanas, houve um aumento da escassez hídrica, das emissões de gases do efeito estufa e uma surpreendente redução da biodiversidade. Com a perda de serviços ecossistêmicos há um esforço crescente para a restauração de florestas em todo o mundo. Os esforços na restauração de florestas tropicais, porém, pode levar a uma grande imprevisibilidade com relação ao funcionamento dos ecossistemas e, a escolha de indicadores ecológicos de monitoramento que sejam mais adequados, tem sido prioridade. Com a instalação da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Anhanguera em 2007, na região nordeste do estado de São Paulo, foi conduzida uma restauração florestal, inserida dentro dos limites da Floresta Estacional Semidecidual. As ações de restauração envolveram o plantio de 156 mil mudas de 105 espécies vegetais nativas da região em uma área de 70 hectares. Este estudo avaliou simultaneamente a influência da distância do corpo d'água, e da umidade do solo, na quantidade de serapilheira acumulada e na matéria orgânica do solo, mediada pela estrutura da vegetação na área em restauração em conjunto com os remanescentes florestais (considerados como sítios de referência) e apenas na área em restauração. Avaliamos também se houve um aumento da quantidade de matéria orgânica no solo, depois de 12 anos das ações de restauração, e se a quantidade de matéria orgânica estaria relacionada com a fertilidade do solo. Foram coletados dados da estrutura da vegetação (densidade de indivíduos, área basal total de árvores, diâmetro médio, índice médio de volume do tronco e a estratificação), serapilheira e amostras de solo na profundidade de 0-20cm em parcelas de 100 m<sup>2</sup>. Os resultados mostraram que a variação na densidade de indivíduos foi devida a entrada de regenerantes e que decresceu com o aumento da distância do reservatório. A estrutura da floresta diferiu espacialmente na área em restauro em conjunto com os remanescentes florestais e, em ambos separadamente. Os locais mais próximos do reservatório formaram florestas mais densas e estratificadas, e a vegetação com maiores valores de área basal estavam distantes do reservatório. Locais mais úmidos e com a vegetação mais densa e estratificada, apresentaram maiores valores de serapilheira e de matéria orgânica no solo, apenas quando os remanescentes florestais foram incluídos. Além disto, a vegetação com maiores valores de área basal contribuiu, mesmo que fracamente, com maiores quantidades de

serapilheira acumulada. Houve uma forte relação entre a matéria orgânica e a fertilidade do solo e, à medida que a estrutura da vegetação se desenvolveu, houve um aumento na matéria orgânica mostrando uma recuperação parcial da fertilidade do solo. Assim, nosso estudo sugeriu que a trajetória e a velocidade da restauração de alguns aspectos desde ecossistema foram determinadas pela distância do corpo d'água e pela umidade do solo provocada pelo enchimento do reservatório. Além disto, as ações da implantação do restauro combinadas com o período de apenas 12 anos foram suficientes para detectarmos o efeito destas ações no acúmulo de serapilheira e num aumento substancial na quantidade de matéria orgânica no solo.

**Palavras chave:** fertilidade do solo; matéria orgânica; pequena central hidrelétrica; restauração ecológica; serapilheira acumulada.

## ABSTRACT

NAKASATO, M. V. – Vegetation structure and chemical soil attributes 12 years after a forest restoration. 2022 – 63p: Dissertation (Master) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Graduate Program in Environmental Sciences – 2022.

With the current state of forest ecosystems degradation due to human activities, there has been an increase in water scarcity, greenhouse gases emissions, and a surprising reduction in biodiversity. With the loss of ecosystem services, there is a growing effort to restore forests worldwide. However, the efforts in the restoration of tropical forests can result in unpredictability of ecosystems functioning, so that a priority is the selection of appropriate ecological monitoring indicators. With the installation of the Small Hydroelectric Power Plant Anhanguera in 2007, in the northeast region of São Paulo state, a forest restoration project was carried out in the limits of Seasonal Semideciduous Forest. A total of 156,000 seedlings from 105 native tree species from the region were planted in an area of 70 hectares. The present study evaluated simultaneously the influence of the distance from the waterbody and soil moisture on the amount of accumulated litter and soil organic matter, mediated by the vegetation structure in the restoration area and in forest remnants (considered as reference sites) nearby. We also evaluated if there was an increase in soil organic matter 12 years after the restoration project was implemented, and whether the amount of organic matter was related with soil fertility. We collected data from vegetation structure (tree density, total basal area, mean diameter, mean trunk volume index, and forest stratification), litter, and soil samples 0-20 cm deep in 100 m<sup>2</sup> plots. The results showed that the variation in tree density was due to the colonization of regenerating individuals, which decreased with increasing distance from the reservoir. Forest structure varied spatially when considering both the restored area and forest remnants, and when analyzing each separately. Plots nearer the reservoir had denser and more stratified forests, whereas more distant plots presented higher basal area values. More humid plots, with a denser and stratified vegetation, presented more litter and soil organic matter only when also considering the remnant forests in the analyses. Also, vegetation in plots with higher basal area weakly contributed with higher accumulated litter. There was a strong relationship between soil organic matter and fertility and, as vegetation structure developed, there was an increase in organic matter showing a partial recovery of soil fertility. Therefore, our study suggested that the trajectory and speed of restoration from some ecosystem aspects were determined by the distance from the waterbody and by soil moisture as influenced by the reservoir filling. Further,

we found that a period of only 12 years after the implementation of the restoration project was enough to detect differences in litter accumulation and a substantial increase in soil organic matter.

**Keywords:** soil fertility; organic matter; small hydroelectric power plant; ecological restoration; litter.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização da PCH Anhanguera. A área em branco corresponde à restauração florestal, e a área em amarelo corresponde aos remanescentes florestais (Fonte: *Google Earth*).  
.....18
- Figura 2.** Área de estudo às margens do reservatório da PCH Anhanguera e as áreas circunvizinhas com cultivo de cana-de-açúcar. ....20
- Figura 3.** Localização das 44 parcelas distribuídas por distância no entorno do reservatório da PCH Anhanguera, onde o contorno branco destaca as áreas restauradas e, os remanescentes florestais estão destacados com o contorno amarelo (Fonte: *Google Earth*). ....21
- Figura 4.** Trecho da floresta restaurada indicando a declividade da área de estudo, onde as parcelas estão distribuídas em um gradiente de distâncias do reservatório. ....21
- Figura 5.** (A) Desenho esquemático da disposição do gabarito para coleta dentro da parcela. (B) Coleta da serapilheira acumulada sobre o solo. ....22
- Figura 6.** Localização dos pontos de coleta de amostras de solo no entorno do reservatório antes do restauro (Fonte: *Google Earth*). ....23
- Figura 7.** (A) Desenho esquemático das nove amostras simples de coleta em cada parcela. (B) Coleta de amostras deformadas para análises físicas e químicas do solo. ....24
- Figura 8.** (A) Massa de solo úmido separadas por parcelas. (B) Amostras na estufa a 105°C. ....25
- Figura 9.** Densidade de indivíduos por parcela da área de estudo ao longo da distância do reservatório. O valor 0 metros indica a margem do reservatório com as áreas estudadas. Os quadrados azuis representam o número de indivíduos regenerantes na área em restauração, os triângulos verdes representam o somatório do número de indivíduos plantados e os regenerantes na área em restauração e, os círculos vermelhos indicam o somatório de todos os indivíduos com altura > 1,0 m nos remanescentes florestais usados como referência. ....29
- Figura 10.** Resultados das análises dos componentes principais das variáveis da estrutura da vegetação da área de restauro e remanescentes florestais. Os círculos vermelhos representam as parcelas do remanescente florestal, os círculos azuis representam as parcelas do restauro e, os valores acima das parcelas são as distâncias para o reservatório. Em que: Estr alt = estratificação em altura, Dens = densidade, A Basal = Área basal e I.V. Troncos = Índice de volume dos troncos. ....30
- Figura 11.** Resultados das análises dos componentes principais das variáveis da estrutura da vegetação somente na área de restauro. Os círculos azuis representam as parcelas do restauro e,

os valores acima das parcelas são as distâncias para o reservatório. Em que: Estr alt = estratificação em altura, Dens = densidade, A Basal = Área basal e I.V. Troncos = Índice de volume dos troncos. ....31

**Figura 12.** Modelo (A) de equação estrutural estimado para a área de restauro e remanescentes florestais ajustado entre a distância do reservatório e umidade do solo (variáveis exógenas) e a estrutura da vegetação, quantidade de serapilheira e matéria orgânica do solo (variáveis endógenas). Os coeficientes não-padronizados (coeficiente de regressão parcial) estão em negrito, seguidos pelo erro padrão em parênteses, e as estimativas padronizadas. As linhas verdes representam caminhos positivos, e as linhas vermelhas representam caminhos negativos. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas dos coeficientes. ....32

**Figura 13.** Modelo de equação estrutural (B) ajustado para a área de restauro. A distância do reservatório e a umidade do solo foram consideradas como variáveis exógenas e, a estrutura da vegetação, quantidade de serapilheira e matéria orgânica do solo como variáveis endógenas. Os coeficientes não-padronizados (coeficiente de regressão parcial) estão em negrito, seguidos pelo erro padrão em parênteses, e as estimativas padronizadas. As linhas verdes representam caminhos positivos, e as linhas vermelhas representam caminhos negativos. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas dos coeficientes. ....34

**Figura 14.** Resultados das análises dos componentes principais dos atributos químicos do solo das parcelas localizadas na área de restauro e remanescentes florestais. Os círculos vermelhos representam as parcelas do remanescente florestal, os círculos azuis representam as parcelas do restauro e, os valores acima das parcelas são as distâncias para o reservatório. Em que: K = potássio, P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, V = saturação da CTC por bases e N:P = razão nitrogênio e fósforo. ....36

**Figura 15.** Relação entre os escores do Solo 1 e a matéria orgânica do solo. Círculos azuis representam as parcelas localizadas no restauro, círculos vermelhos representam as parcelas dos remanescentes florestais. Em que: N = nitrogênio total, K = potássio, CTC = capacidade de troca catiônica e V = saturação da CTC por bases. ....37

**Figura 16.** Box-plot da matéria orgânica do solo, na área restaurada na ocasião da implantação do restauro e, 12 anos depois da restauração amostrados na área de restauro, e do solo amostrado nos remanescentes florestais. A linha laranja corresponde a uma coleta realizada antes do restauro em outubro de 2008 (26 g/dm<sup>3</sup>); o box azul representa as parcelas na área de restauro em outubro de 2020 e, o box vermelho representa o solo coletado das parcelas nos remanescentes florestais também em outubro de 2020. Os boxes mostram a mediana, primeiro e terceiro quartil são relatados e, losangos cheios representam outliers. ....38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
2.1. Caracterização da área de estudo.....	18
2.2. Delineamento amostral.....	20
2.2.1. Estrutura da vegetação e serapilheira .....	22
2.2.2. Amostragem do solo.....	23
2.3. Análise dos dados.....	25
3. RESULTADOS.....	28
3.1. Densidade dos regenerantes em função da distância do corpo d'água.....	28
3.2. Variação espacial da estrutura da vegetação em relação a distância do corpo d'água..	29
3.3. Efeitos diretos e indiretos da distância do reservatório e da umidade do solo na quantidade de serapilheira acumulada e matéria orgânica do solo .....	31
3.4. Relação entre a matéria orgânica e os atributos químicos do solo.....	35
4. DISCUSSÃO .....	39
5. CONCLUSÃO .....	44
6. REFERÊNCIAS.....	46
APÊNDICES.....	57

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento das atividades humanas tem resultado no aumento de escassez hídrica, das emissões de gases do efeito estufa e na redução da biodiversidade ao redor do mundo, com isso, há uma urgência em recuperar ecossistemas que foram destruídos ou degradados. Assim tem surgido várias iniciativas para intensificar a restauração desses ecossistemas como uma medida efetiva para restabelecer as suas funções (UN, 2019; ÁLVAREZ-YÉPIZ, 2020; PANDIT et al., 2020). Tais iniciativas necessitam urgente de informações que auxiliem os projetos de restauração nos próximos anos (HOLL, 2017; GUERRA et al., 2020).

A restauração ecológica pode levar a uma grande imprevisibilidade com relação ao funcionamento dos ecossistemas devido ao histórico do uso da terra, o contexto da paisagem e às condições ambientais específicas, com isso, a escolha de indicadores ecológicos de monitoramento que sejam mais adequados tem sido prioridade para detecção de recuperação das funções ecossistêmicas (SUGANUMA e DURIGAN, 2015; BRUDVIG et al., 2017). Uma das estratégias mais eficazes para a construção de modelos preditivos das trajetórias sucessionais é a comparação com sítios de referência, que se constituem de áreas com o mesmo tipo de ecossistema, mas relativamente preservados (ARONSON et al., 1995; BREWER e MENZEL, 2009; GANN et al., 2019).

Entre os indicadores ecológicos de monitoramento que visam verificar o sucesso da restauração estão aqueles relacionados a vegetação como estrutura, riqueza e diversidade de plantas (RUIZ-JAEN e AIDE, 2005; SUDING et al., 2015; SEDDON et al., 2019) e, menos frequentemente os indicadores relacionados ao solo (NOLAN et al., 2021), subestimando o ambiente subterrâneo e a importância ecológica do solo (KARDOL e WARDLE, 2010).

Os ecólogos da restauração, há muito tempo, reconheceram a forte influência do solo no restabelecimento das funções do ecossistema através da reintrodução de espécies vegetais nativas em áreas degradadas (JORDAN III et al., 1987). O solo atua como o principal meio de sobrevivência e crescimento das plantas; regula o fluxo de água nas paisagens terrestres; modifica a atmosfera; é a base para ciclagem de nutrientes e energia e; o habitat de inúmeras espécies (BRADY e WEIL, 2014; ADHIKARI e HARTEMINK, 2016). Além disto, os atributos químicos do solo influenciam fortemente as probabilidades de estabelecimento e o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a estrutura das florestas (PEÑA-CLAROS et al., 2012). O solo de locais que sofreram a supressão de sua vegetação natural, torna-se exposto a

estressores como a perda drástica de materiais orgânicos e nutrientes decorrentes da lixiviação e erosão provocando um aumento da acidificação e salinização (BRADY e WEIL, 2014; LAL, 2015). Com isso, a restauração de locais degradados depende da recuperação da fertilidade e estrutura do solo (NOGUEIRA JR. et al., 2011; SANTOS et al., 2021).

Um dos indicadores de qualidade do solo mais frequentemente avaliados é a quantidade de matéria orgânica, que em solos de florestas tropicais, está fortemente e positivamente relacionada à sua fertilidade, pois a matéria orgânica no solo aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC); o pH; as quantidades de macronutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio e de micronutrientes (RAIJ, 1991; BÜNEMANN et al., 2018). Além disto, a matéria orgânica está positivamente relacionada à retenção de água; melhoria de sua estrutura física e maior atividade microbiana do solo (RAIJ, 1991; BRADY e WEIL, 2014). Assim, a avaliação e o monitoramento da quantidade de matéria orgânica e de outros atributos químicos do solo, podem ser efetivos na detecção da recuperação de ecossistemas terrestres (BÜNEMANN et al., 2018). No entanto, a recuperação da qualidade do solo pode levar décadas ou séculos (KNELMAN et al., 2017) e, as informações sobre o estado de recuperação do solo e suas relações com a restauração vegetal de áreas degradadas ainda são escassas (HENEGHAN et al., 2008; NOLAN et al., 2021).

A serapilheira é composta de todo o material orgânico depositado na superfície do solo pela biota, ou seja, folhas, caules, ramos, flores, frutos, cascas, bem como, restos e excrementos de animais (FACELLI e PICKETT, 1991; SILVA et al., 2018). A quantidade e qualidade da serapilheira depositada no solo constitui uma das principais vias do aumento e manutenção da quantidade de matéria orgânica no solo nos ecossistemas florestais (GILMAN et al., 2003; SAYER et al., 2006; SILVER et al., 2014; ERFANI et al., 2017). A deposição de serapilheira pode proteger o solo da erosão, mantendo e melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas e, sua decomposição resulta na transferência de nutrientes da vegetação para o solo, através da entrada de matéria orgânica para a biota edáfica (LIU et al., 2017). Portanto, a serapilheira pode também ser usada como um parâmetro de monitoramento, para avaliar alguns processos ecológicos, pois a sua produção e deposição pode ser fortemente influenciada pela estrutura da vegetação (VIDAL et al., 2007; GESSNER et al., 2010). Por outro lado, o estabelecimento e estrutura de comunidades vegetais é frequentemente dependente do teor de umidade do solo (LEGATES et al., 2011).

A topografia e a distância de um corpo d'água são diretamente relacionadas a umidade do solo, a qual pode exercer grande influência na estrutura da floresta e na composição

florística, uma vez que o aumento da profundidade do lençol freático pode resultar no aumento do estresse hídrico (PALMQUIST et al., 2018). Além disto, a umidade do solo está relacionada a diversos processos como, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e produção de biomassa (LI et al., 2021). Portanto, a umidade do solo é um dos fatores mais importantes na variação das comunidades vegetais no sentido perpendicular ao corpo d'água (BENDIX, 1994; NAIMAN et al., 2005). Em locais próximos aos corpos d'água, a vegetação se caracteriza por ser mais densa e com maior riqueza, ao incluir espécies mais sensíveis à escassez hídrica, enquanto, mais distante do corpo d'água, a vegetação se caracteriza por apresentar adaptações para reduzir a perda de água, como perda de folhas durante a estação seca, sementes com baixo teor de água e, maior densidade de madeira para prevenir embolia induzida pela seca (VALE et al., 2015).

A criação de reservatórios de água visando a produção de energia hidrelétrica pode ter forte impacto no teor de umidade do solo e, conseqüentemente nas comunidades vegetais. O solo de sítios, que antes da criação do reservatório eram mais distantes do corpo d'água tornam-se mais úmidos, o que altera a sobrevivência e o crescimento de várias espécies vegetais e, favorece o estabelecimento de outras espécies que são característicos de solos mais úmidos (VALE et al., 2015). Um estudo conduzido numa floresta tropical sazonal em Minas Gerais mostrou que, 10 anos após a construção de um reservatório, houve um aumento de riqueza e abundância de espécies de plantas nos sítios mais próximos ao reservatório (0-10m), enquanto parcelas longe do reservatório (10-60m) não apresentaram mudanças (RAYMUNDO et al., 2019).

Com a instalação da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Anhanguera em 2007, no rio Sapucaí-Mirim, localizado na região nordeste do estado de São Paulo, foi conduzida uma restauração florestal, envolvendo o plantio de 156 mil mudas de 105 espécies vegetais nativas da região. Após 12 anos, a partir da implantação do restauro, esperamos que o crescimento das plantas nativas reintroduzidas e, o recrutamento de novos indivíduos vegetais resultasse num aumento da quantidade de serapilheira depositada no solo e, conseqüentemente, de matéria orgânica no solo (MOS). Nós registramos uma alta heterogeneidade espacial na estrutura da vegetação e na quantidade de MOS e de outros atributos químicos do solo nesta área. A distância do corpo d'água e diferenças na umidade do solo podem ter contribuído para esta heterogeneidade (NILSSON e SVEDMARK, 2002; NAIMAN et al., 2005). Além disso, quando incluimos áreas de remanescentes florestais, como sítios de referência, observamos um forte aumento na variação, tanto na estrutura da vegetação, como nos atributos químicos do

solo. Isto seria esperado, não apenas pelo aumento da área amostrada, mas também pela inclusão de fragmentos florestais conservados, os quais se caracterizam por terem uma complexa e antiga estrutura florestal, além de um solo mais preservado.

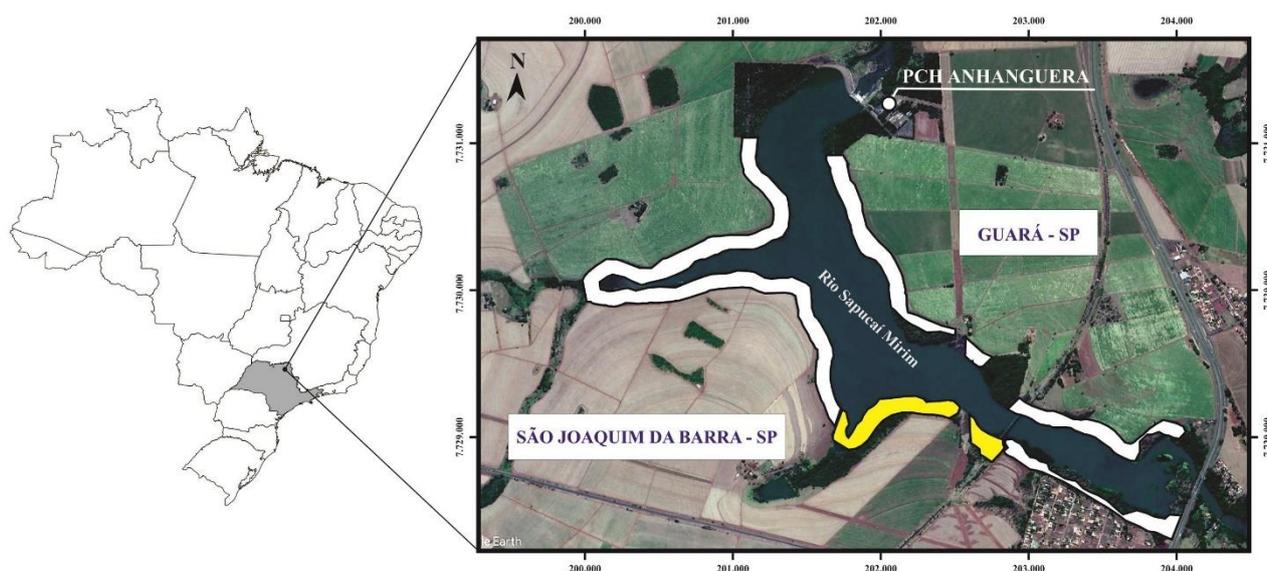
Assim, este estudo avaliou simultaneamente a influência da distância do corpo d'água e da umidade do solo na quantidade de serapilheira acumulada no solo e da matéria orgânica do solo, mediada pela estrutura da vegetação na área em restauração em conjunto com os remanescentes florestais (Modelo A). Inicialmente questionamos (1) se as áreas mais próximas ao corpo d'água promovem maior quantidade de regenerantes, contribuindo para aumentar a variação na estrutura da vegetação na área em restauração em conjunto com os remanescentes florestais; (2) avaliamos a variação espacial da estrutura da vegetação (densidade, estratificação em altura, área basal e índice de volume do tronco) nestas áreas (Modelo A) através da Análise de Componentes Principais. A partir dos resultados avaliamos (3) as relações diretas e indiretas, via estrutura da vegetação, entre a distância do corpo d'água, e da umidade do solo, com a quantidade de serapilheira acumulada e de matéria orgânica do solo. Questionamos também (4) se estas relações poderiam ser detectadas considerando apenas a área em restauro, cuja floresta está se desenvolvendo há 12 anos (Modelo B). Além disto, como uma maior quantidade de matéria orgânica no solo resulta em uma maior capacidade de troca catiônica e teores de outros nutrientes minerais, avaliamos se (5) uma maior quantidade de matéria orgânica estaria relacionada com a fertilidade do solo, e (6) se durante o processo de restauração, houve uma recuperação da matéria orgânica quando comparado com os remanescentes florestais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada às margens do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Anhanguera, pertencente à Central Elétrica Anhanguera S.A. (CELAN), na região nordeste do estado de São Paulo, no Rio Sapucaí Mirim entre os municípios de Guará – SP e São Joaquim da Barra – SP, entre os paralelos 20°29’S e 20°31’S e meridianos 47°52’O e 47°50’O. Em toda a faixa de 100 metros no entorno do reservatório foram reintroduzidas aproximadamente 156 mil mudas de espécies nativas desta região (Figura 1).

Os remanescentes florestais, que funcionaram como sítios de referência, também estão localizados no entorno do reservatório, com exposição aos mesmos impactos antrópicos e variações ambientais locais, com uma área total de 12,52 hectares.



**Figura 1.** Localização da PCH Anhanguera. A área em branco corresponde à restauração florestal, e a área em amarelo corresponde aos remanescentes florestais (Fonte: *Google Earth*).

As cotas de altitude na área de estudo (restauração florestal e remanescente florestal) oscilam entre 522 e 540 metros, com uma declividade entre 8 a 10°. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região estudada é *Cwa* – clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente, com temperaturas médias superiores a 22°C no mês mais

quente, e temperaturas menores que 18°C no mês mais frio (ALVARES et al., 2013). A precipitação média varia entre 1.300 e 1.600 mm por ano, sendo que no mês mais seco a precipitação de chuva é inferior a 30 mm (NUNES et al., 2009).

A área de estudo está localizada na Bacia do Paraná, pertencentes à Formação Serra Geral, da Idade Jurássico-Cretácea, com rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza e negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos finos a médios, apresentando estratificação cruzada tangencial (BISTRICHI et al., 1981). O relevo é caracterizado por interflúvios com área superior a 4 km<sup>2</sup>, topos extensos e aplainados e, vertentes com perfis retilíneos a convexos. O solo presente na área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico/Eutroférrico típico A, moderado com textura argilosa a muito argilosa, relevo suave ondulado e ondulado (ROSSI, 2017).

A vegetação original está inserida dentro dos limites da Floresta Estacional Semidecídua (FES) (VELOSO et al., 1991). A vegetação original foi suprimida e, entre as décadas de 50 e 70, esta área era usada para plantio de culturas semi-perenes, como grãos em geral além de pastagens. A partir da década de 80, houve uma substituição pelo cultivo de cana-de-açúcar.

A PCH Anhanguera é uma usina do tipo a “fio d’água” que tem como característica um pequeno reservatório, que opera praticamente em níveis constantes, aproveitando a força da correnteza dos rios para gerar energia, sem precisar estocar água, ou seja, a margem do reservatório não sofre flutuações ao longo do ano.

Com a construção da barragem da PCH Anhanguera, foi implantado um projeto de restauração florestal, com interesse em recuperar o ecossistema florestal. A implantação ocorreu em dezembro de 2008, quando foram plantadas homogeneamente 105 espécies vegetais, sendo 101 arbóreas e quatro arbustivas, numa faixa de 100 metros de largura no entorno do reservatório, envolvendo uma área de aproximadamente 70 hectares (Figura 2).

O preparo prévio às ações de restauração florestal incluiu o isolamento da área, e a permanência da palhada da cana-de-açúcar após sua colheita. A supressão mecânica e química da vegetação foi conduzida apenas onde ocorriam gramíneas exóticas. Além disto, foi feita a calagem nas covas, com 130 gramas de calcário dolomítico e, adubação com fertilizante químico, com 100g de NPK (10:30:10) por cova. Uma cobertura extra com palhada de cana oriunda de outros locais foi depositada na superfície do solo seis meses após o plantio de mudas para reter a umidade, diminuir a incidência solar direta e danos ao solo provocados pelo escoamento superficial. Adubações extras de cobertura, 50g de NPK (20:10:20), foram

conduzidas duas vezes em 2009, duas vezes em 2010 e uma vez em 2011. A reposição de mudas mortas foi conduzida dois anos após a implantação

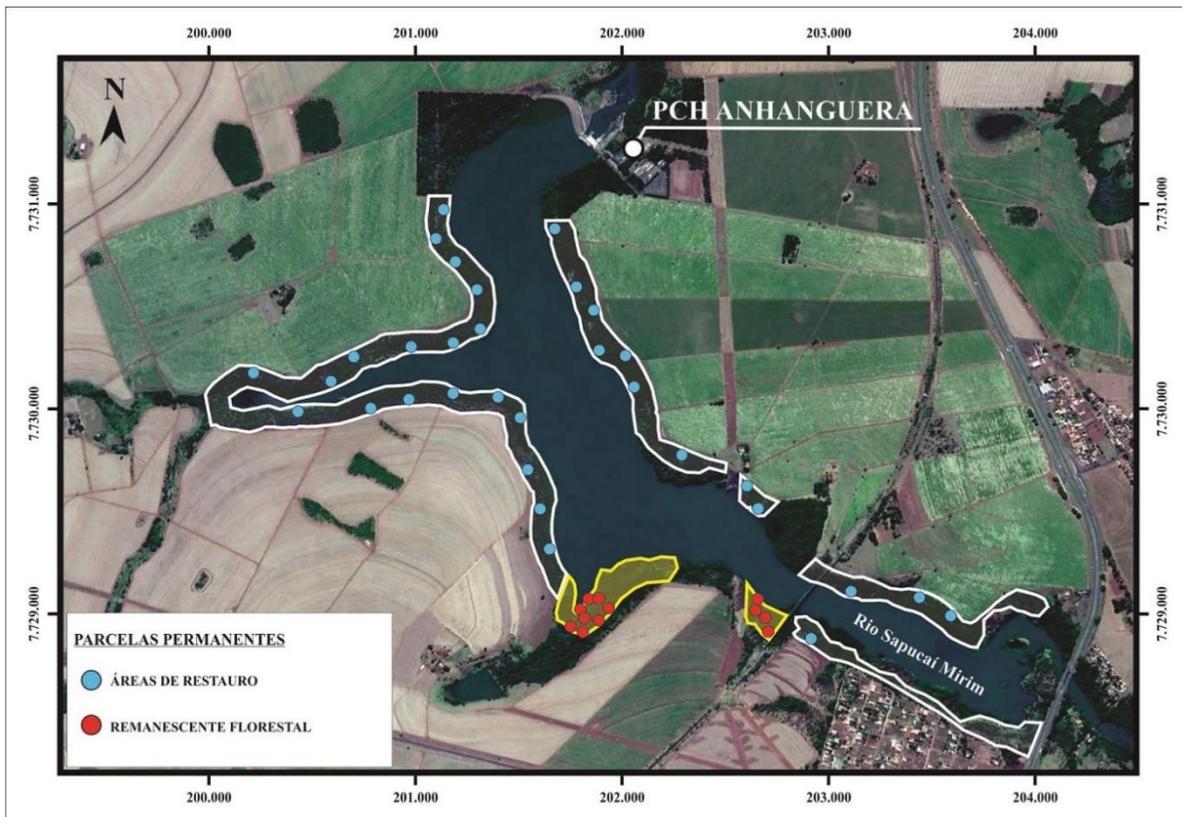


**Figura 2.** Área de estudo às margens do reservatório da PCH Anhanguera e as áreas circunvizinhas com cultivo de cana-de-açúcar.

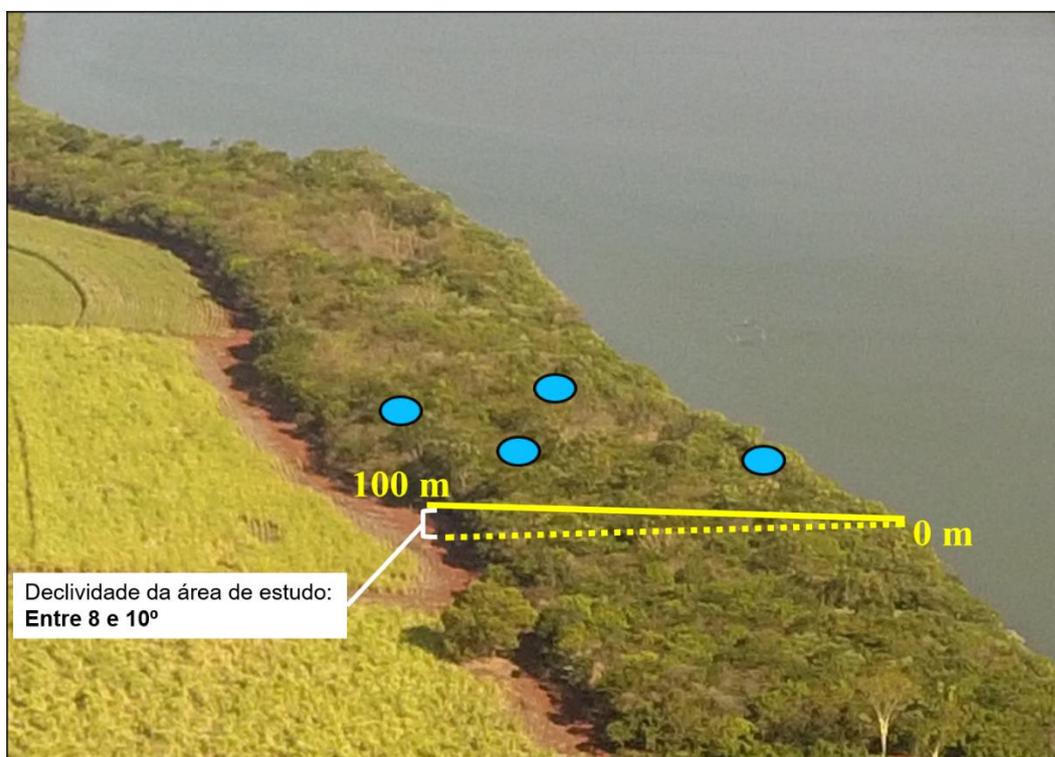
## 2. 2. Delineamento amostral

Na área de estudo, marcamos 44 parcelas e medimos a distância do centro de cada parcela à margem do reservatório, sendo 32 parcelas no interior do restauro e 12 parcelas, de  $10 \times 10$  metros, no interior de dois remanescentes florestais (Figura 3). Consideramos duas situações, sendo que na primeira (Modelo A) consideramos as parcelas localizadas no interior do restauro em conjunto com os remanescentes florestais, e na segunda consideramos apenas as parcelas localizadas no interior do restauro (Modelo B).

Para avaliar a influência da umidade do solo, causada pela proximidade do reservatório na trajetória da restauração, as parcelas foram distribuídas a diferentes distâncias da margem do reservatório, em uma amplitude de 6 a 97 metros (Apêndice A) (Figura 4).



**Figura 3.** Localização das 44 parcelas distribuídas por distância no entorno do reservatório da PCH Anhanguera, onde o contorno branco destaca as áreas restauradas e, os remanescentes florestais estão destacados com contorno amarelo (Fonte: *Google Earth*).



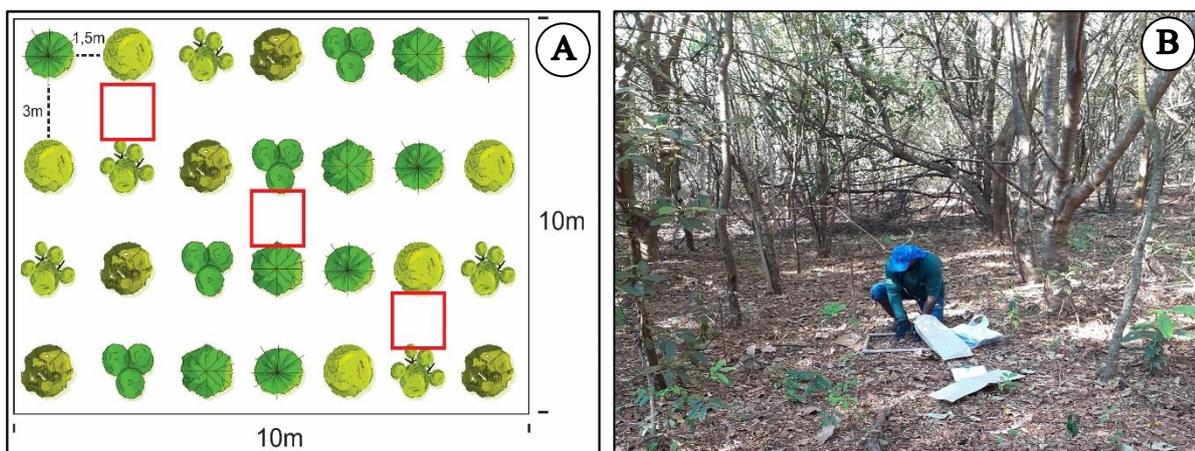
**Figura 4.** Trecho da floresta restaurada indicando a declividade da área de estudo, onde as parcelas estão distribuídas em um gradiente de distâncias do reservatório.

### 2. 2. 1. Estrutura da vegetação e serapilheira

Entre julho e agosto de 2020 (12 anos após o plantio inicial), foram medidas a altura total e diâmetro à altura do solo (DAS) de todas as árvores dentro de cada parcela. As medidas de altura foram estabelecidas com a utilização de uma trena eletrônica (Leica Disto<sup>TM</sup> A3), e as medidas do DAS foram feitas com o auxílio de um paquímetro e/ou uma fita métrica. O DAS foi medido até uma altura de 30 cm do solo evitando bases muito espessas ou expansões radiculares das árvores.

Todos os indivíduos que estavam fora do alinhamento do plantio inicial e/ou fora da lista de espécies plantadas foram consideradas regenerantes, com critério de inclusão de altura mínima de 1,0 metro. Para cada parcela estimamos a densidade (número de indivíduos por unidade de área), a estratificação em altura (baseado no coeficiente de variação da altura de todos os indivíduos), a área basal total (através do somatório da área basal de todos os indivíduos lenhosos) calculado através da analogia com a circunferência, usando o DAS e o Índice médio de Volume do Tronco (IVT) (calculado através da multiplicação do DAS<sup>2</sup> pela altura da árvore). O IVT foi usado por ser fortemente correlacionado ( $r^2 = 0,982$ ) com a biomassa da planta acima do solo (KOHYAMA, 1987; KOHYAMA e HOTTA, 1990; BALTZER e THOMAS, 2007).

A coleta de serapilheira acumulada foi conduzida nas parcelas do restauro e nos remanescentes florestais em setembro de 2020. Foram coletadas três amostras por parcela, onde foi utilizado um gabarito de PVC de 0,50 m x 0,50 m (0,25 m<sup>2</sup>), totalizando 132 amostras (Figura 5).

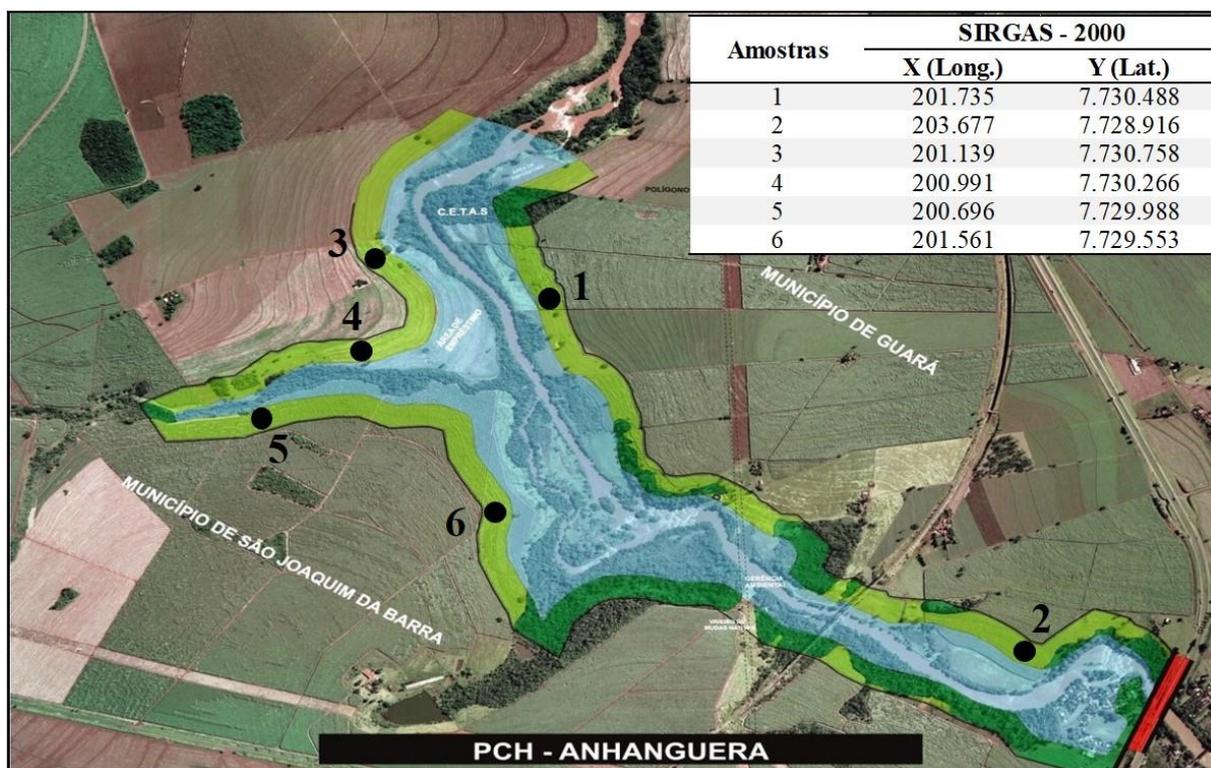


**Figura 5.** (A) Desenho esquemático da disposição do gabarito para coleta dentro da parcela. (B) Coleta da serapilheira acumulada sobre o solo.

A serapilheira coletada foi acondicionada em sacos de papel identificados e secas em temperatura ambiente (aproximadamente 38°C durante o dia) até estabilização de sua massa, que durou oito dias. O peso médio de serapilheira acumulada no solo foi estimado por parcela.

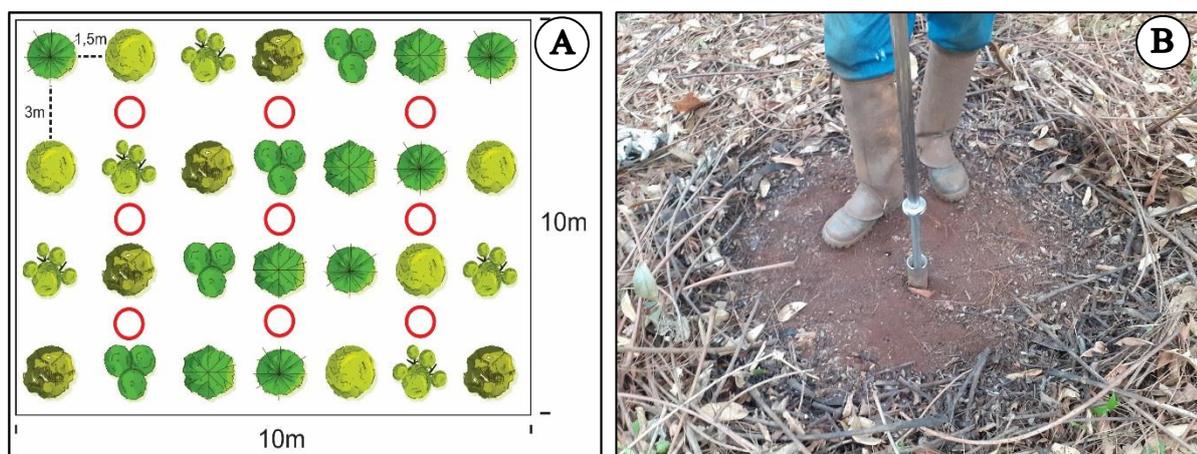
### 2. 2. 2. Amostragem do solo

Antes da implantação do restauro, em outubro de 2008, uma avaliação prévia dos atributos químicos do solo foi conduzida na área através de uma coleta de solo composta por seis subamostras na profundidade de 0 – 20 cm, distribuídas aleatoriamente por toda a área que seria restaurada (Figura 6).



**Figura 6.** Localização dos pontos de coleta de amostras de solo no entorno do reservatório antes do restauro (Fonte: *Google Earth*).

Em outubro de 2020, novas coletas de amostras de solo foram conduzidas em todas as parcelas, para avaliarmos as propriedades químicas do solo 12 anos após o plantio. As amostras de solo de cada parcela foram compostas por nove subamostras com o auxílio do trado de caneco na profundidade de 0 – 20 cm (Figura 7). As subamostras foram colocadas em uma bandeja de inox e completamente misturadas para homogeneização, e a partir dessa mistura foi retirada uma única amostra composta de 500 gramas e enviadas para o Laboratório de Solos da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), para a quantificação dos atributos químicos do solo.



**Figura 7.** (A) Desenho esquemático das nove amostras simples de coleta em cada parcela. (B) Coleta de amostras deformadas para análises físicas e químicas do solo.

As análises químicas foram realizadas de acordo com as metodologias propostas por Embrapa (1997) e Rajj et al. (2001). Para a determinação dos teores de fósforo disponível (P), potássio (K), cálcio (Ca), e magnésio (Mg), foi utilizado o método de resina trocadora de ânions; para a matéria orgânica (MO), o método de Walkley-Black; para o potencial hidrogeniônico (pH), a solução de  $\text{CaCl}_2$  a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ; para a acidez potencial (H + Al), a solução tamponada de acetato de cálcio a pH 7; e para o nitrogênio total (N) o método de Kieldahl. A capacidade de troca catiônica (CTC) foi estimada através do somatório de bases K, Ca, Mg, com a acidez potencial (H + Al). A saturação de bases do solo (V%) foi estimada através da razão entre a soma de bases multiplicadas por 100 e o CTC. A razão entre nitrogênio –fósforo (N:P) também foram estimadas.

Das amostras simples misturadas na bandeja de inox, foram separados 100 gramas para a determinação do teor de umidade do solo por parcela. Essas amostras foram imediatamente armazenadas individualmente em sacos plásticos vedados e identificados, colocados em uma

caixa térmica com gelo em gel e, transportadas para uma câmara fria. Para a determinação da umidade do solo foi usado o método termogravimétrico, conforme Embrapa (1997), que consiste em pesar a massa de solo úmido ( $M_u$ ) e em seguida secá-la em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, e após, determinar sua massa seca ( $M_s$ ) (Figura 8). A partir da equação (1):

$$U(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

onde:

$U$  = Umidade do solo, %;  $M_u$  = Massa de solo úmido (g);  $M_s$  = Massa de solo seco (g)



**Figura 8.** (A) Massa de solo úmido separadas por parcelas. (B) Amostras na estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ .

### 2. 3. Análise dos dados

Para avaliar o efeito da distância do curso d'água na abundância de regenerantes, usamos um modelo de regressão não linear (SEBER e WILD, 2003). O modelo exponencial de primeira ordem foi ajustado:  $y = y_0 + Ae^{-x/t}$ , onde  $A$  é o acréscimo à assíntota ( $y_0$ ) que resulta no intercepto,  $t$  é o raio da curvatura e  $x$  é a distância do corpo d'água. O modelo foi ajustado por iteração usando o algoritmo Levenberg – Marquardt conduzido no software OriginPro 2018 (MAY e STEVENSON, 2009).

Nós conduzimos a análise de componentes principais (ACP) para avaliar a relação entre a distância do corpo d'água na estrutura da floresta em ambas as situações, incluindo as parcelas do restauro em conjunto com as parcelas dos fragmentos florestais, e na situação em que consideramos apenas as parcelas do interior do restauro. As variáveis densidade de indivíduos (Dens.), área basal (A Basal), estratificação em altura (Estr. alt.) e o índice de volume dos troncos (I.V. Troncos) foram usadas como parâmetros da estrutura da vegetação. Os eixos gerados pelas duas ACP foram usados na construção dos Modelos A e B

Conduzimos também a ACP para avaliar a variação espacial dos atributos químicos do solo, considerando as parcelas localizadas na área em restauração em conjunto com as parcelas dos remanescentes florestais, usando os valores de potássio (K), fósforo (P), nitrogênio total (N), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação da CTC por bases (V) e a razão Nitrogênio e Fósforo (N:P). Como pH, cálcio, magnésio e soma de bases foram fortemente correlacionadas com CTC e V ( $r > 0,900$ ), retiramos estes atributos da análise. Apenas os eixos com autovalores maiores que um foram considerados como significativos (KAISER, 1958).

A quantidade de matéria orgânica da área em restauro e dos remanescentes florestais em relação a área antes do plantio (2008), que era usada integralmente como cultivo de cana-de-açúcar, foi avaliada pelo teste Z e, entre o restauro e remanescentes florestais avaliado através da ANOVA simples. Para que as análises fossem balanceadas usamos apenas 12 parcelas sorteadas entre as 32 parcelas localizadas dentro do restauro (LEGENDRE e LEGENDRE, 2012).

A normalidade dos dados foi previamente checada através do teste Shapiro-Wilk, e as variáveis densidade de indivíduos, potássio e a razão N:P foram normalizados através da transformação em logaritmo natural, e os valores de nitrogênio total, fósforo, CTC e saturação de bases foram transformados pelo método de Box-Cox (LEGENDRE e LEGENDRE, 2012). Estas análises foram conduzidas usando o OriginPro 2018 (MAY e STEVENSON, 2009).

Para avaliar os efeitos diretos da distância do reservatório e da umidade do solo na produção de serapilheira e matéria orgânica do solo e os efeitos indiretos, via estrutura da vegetação, utilizamos o modelo de equações estruturais (MEE) (*path analysis*) que avalia simultaneamente os efeitos de diferentes fatores, podendo ser correlacionados ou não nas variáveis respostas (HAIR et al., 2005). As variáveis de distância do reservatório (Distância) e da umidade do solo (Umidade) foram consideradas como variáveis exógenas. Como em ambas as análises a ACP reduziu as variáveis da estrutura da vegetação em dois eixos, usamos os escores dos eixos, denominados aqui de Veg 1 e Veg 2 (ver Resultados), além das quantidades

de matéria orgânica e serapilheira como variáveis endógenas. Os valores de serapilheira e matéria orgânica do solo foram transformados pelo método de Box-Cox.

O Modelo de Equações Estruturais (MEE) proposto para os Modelos A e B foi:

$$\text{Veg 1} = \beta_1 \text{ Distância} + \beta_2 \text{ Umidade} + \varepsilon$$

$$\text{Veg 2} = \beta_1 \text{ Distância} + \beta_2 \text{ Umidade} + \varepsilon$$

$$\text{Serapilheira} = \beta_1 \text{ Distância} + \beta_2 \text{ Umidade} + \beta_3 \text{ Veg1} + \beta_4 \text{ Veg2} + \varepsilon$$

$$\text{Matéria orgânica} = \beta_1 \text{ Distância} + \beta_2 \text{ Umidade} + \beta_3 \text{ Veg1} + \beta_4 \text{ Veg2} + \varepsilon$$

em que:

$\beta$  = coeficiente de regressão parcial de cada variável

$\varepsilon$  = erro residual

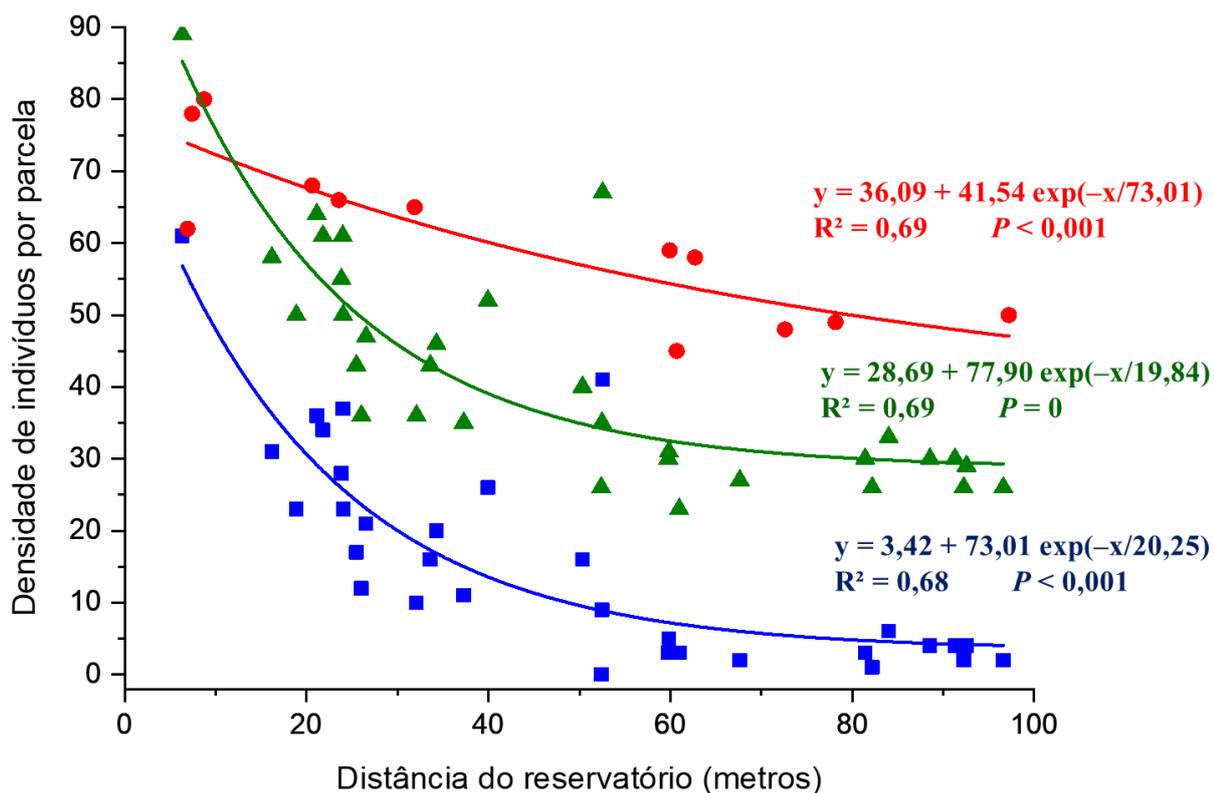
O ajuste entre os MEE propostos e as observações foi checado através do teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), considerando a significância para valores de  $P > 0,05$ ; o *CFI (Comparative Fit Index)*  $> 0,95$ , que é a razão entre o ajustamento do modelo em estudo e o ajustamento do pior modelo possível; o *RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)*  $< 0,05$ , que considera o erro de aproximação na população de dados e intervalo de confiança  $< 0,08$  (HOOPER et al., 2008). As modelagens de equações estruturais foram conduzidas no ambiente R 3.6.3, usando o pacote *Lavaan* (ROSSEEL, 2012). Quando as relações entre as variáveis exógenas e endógenas foram significativas tanto pela via direta quanto pela via indireta nós estimamos o efeito líquido através do somatório dos coeficientes não padronizados dos efeitos diretos e o produto das estimativas não padronizadas dos efeitos indiretos.

Para avaliar a relação entre os dois primeiros eixos gerados pela ACP dos atributos químicos do solo, e a matéria orgânica, ajustamos modelos de regressões lineares. Conduzimos esta análise utilizando o software OriginPro 2018 (MAY e STEVENSON, 2009). Os resíduos foram checados graficamente para verificar se existia tendências ao longo da estimativa (LEGENDRE e LEGENDRE, 2012).

### 3. RESULTADOS

#### 3. 1. Densidade dos regenerantes em função da distância do corpo d'água

No total, 2063 árvores e/ou arbustos foram mensurados, e registramos 73 espécies nos remanescentes florestais e, 81 espécies na área em restauração (Apêndice B). Na área de restauro registramos 1335 indivíduos, sendo que 38,28% foram considerados como regenerantes. A densidade de indivíduos decresceu com o aumento da distância do reservatório, quando foram considerados todos os indivíduos nas áreas dos remanescentes florestais e na área de restauro e, quando foi considerado apenas os regenerantes da área de restauro (Figura 9). A variação da densidade de árvores explicada pela distância foi de 69% nos remanescentes florestais e no restauro e, 68% quando foram considerados apenas a densidade de regenerantes no restauro (Figura 9). O raio de curvatura ( $t= 73,01$ ) estimado pelo modelo de regressão ajustado para as parcelas localizadas nos remanescentes florestais foi maior quando comparado com a área de restauro e quando consideramos apenas os regenerantes da área de restauro, sugerindo que a taxa de decaimento do número de indivíduos com o aumento da distância foi menor nos remanescentes florestais. Quando consideramos a densidade de todos os indivíduos, a assíntota ( $y_0$ ) estimada para as áreas de remanescentes florestais foi ligeiramente maior do que a assíntota estimada para a área de restauro. Isto sugere que o número de indivíduos por unidade de área nos remanescentes florestais tendeu a ser maior do que o restauro, independentemente do efeito da proximidade do reservatório. A assíntota do modelo de regressão ajustado na área de restauro, quando consideramos apenas os regenerantes foi de 3,42, indicando o número de regenerantes por 100 m<sup>2</sup> que seria esperado para a área de restauro na ausência do efeito da proximidade do reservatório apenas 12 anos pós-plantio.

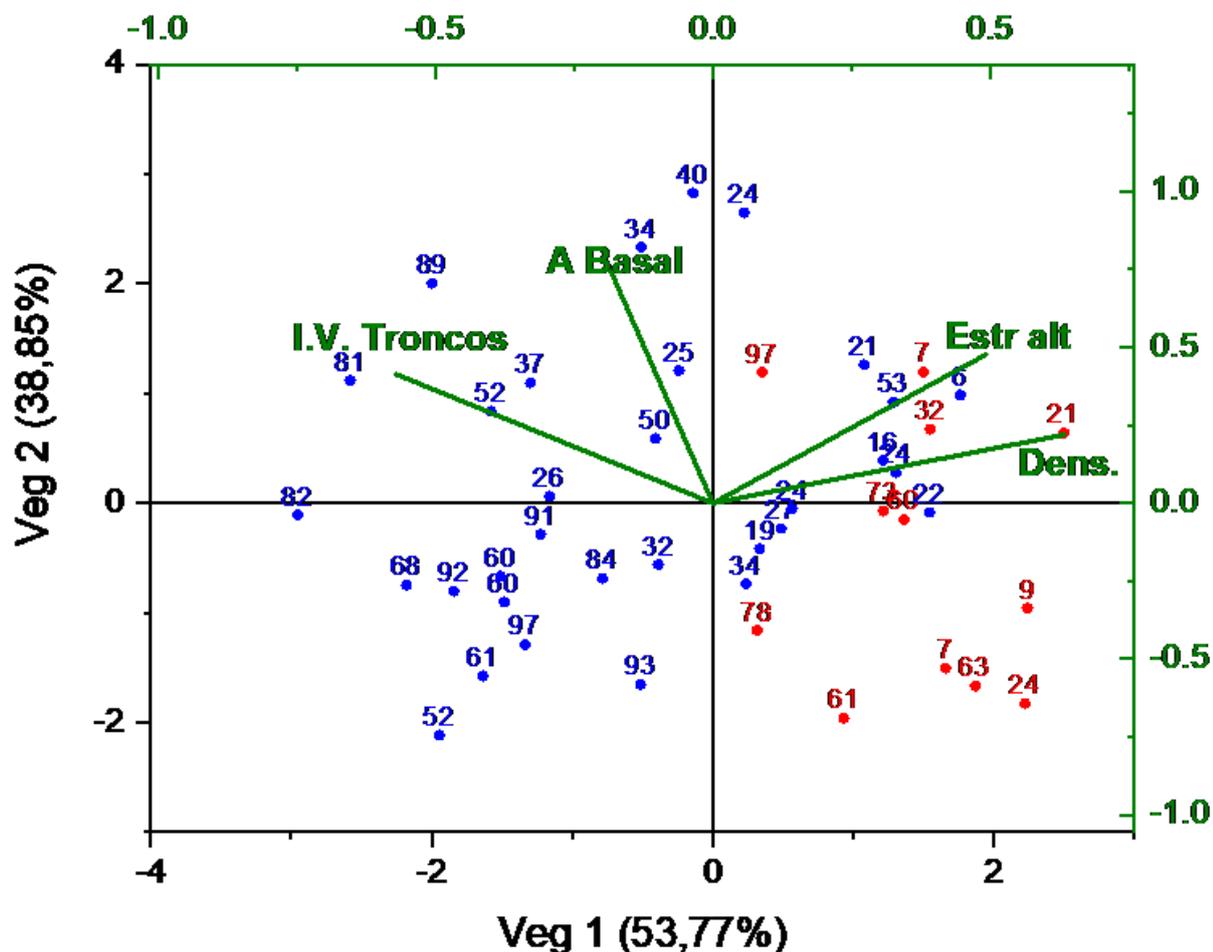


**Figura 9.** Densidade de indivíduos por parcela da área de estudo ao longo da distância do reservatório. A valor 0 metros indica a margem do reservatório com as áreas estudadas. Os **quadrados azuis** representam o número de indivíduos regenerantes na área em restauração, os **triângulos verdes** representam o somatório do número de indivíduos plantados e os regenerantes na área em restauração e, os **círculos vermelhos** indicam o somatório de todos os indivíduos com altura > 1,0 m nos remanescentes florestais usados como referência.

### 3. 2. Variação espacial da estrutura da vegetação em relação a distância do corpo d'água

Os dois primeiros eixos da ACP da estrutura da floresta da área em restauro em conjunto com os remanescentes florestais, explicaram 92,62% da variação total dos dados (Figura 10). O primeiro eixo (autovalor = 2,15) foi correlacionado positivamente com a densidade ( $r = 0,928$ ) e com estratificação em altura ( $r = 0,720$ ), e negativamente correlacionado com o índice de volume do tronco ( $r = -0,836$ ). Todas as parcelas dos remanescentes florestais e 34% das parcelas na área de restauro apresentaram maiores valores de densidade e de estratificação em altura, mas, menores valores de Índice de Volume do Tronco. As parcelas com maiores valores médios do Índice de Volume do Tronco e menores valores de estratificação e densidade de árvores estavam localizadas, em sua maioria, distantes do reservatório (Figura 10). O segundo

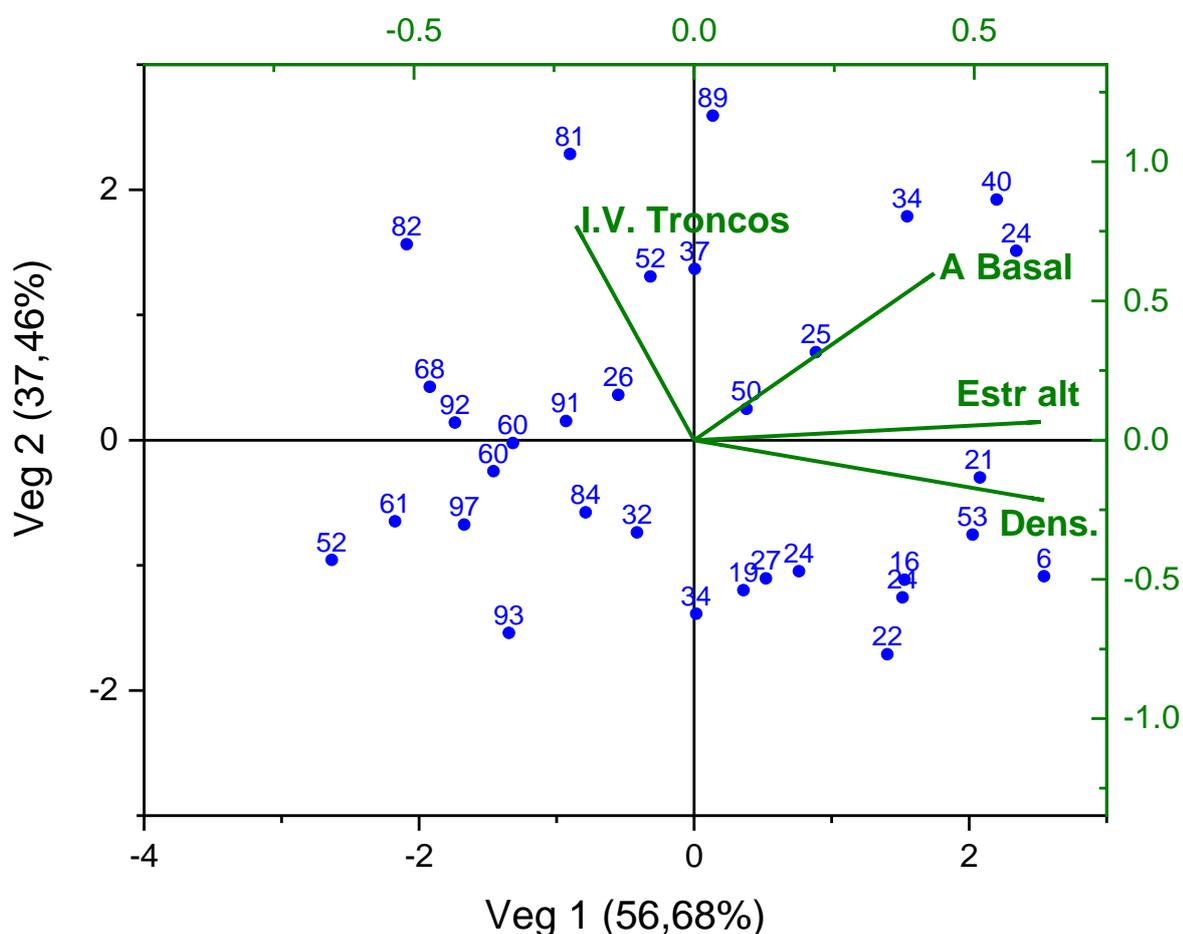
eixo (autovalor = 1,55) foi correlacionado positivamente com a área basal ( $r = 0,929$ ), o que sugere que a maioria das parcelas localizadas no interior dos remanescentes florestais apresentaram menores valores de área basal (Figura 10). Os atributos da estrutura da vegetação estão descritos no Apêndice C.



**Figura 10.** Resultados das análises dos componentes principais das variáveis da estrutura da vegetação da área de restauro e remanescentes florestais. Os círculos vermelhos representam as parcelas do remanescente florestal, os círculos azuis representam as parcelas do restauro e, os valores acima das parcelas são as distâncias para o reservatório. Em que: Estr alt = estratificação em altura, Dens = densidade, A Basal = Área basal e I.V. Troncos = Índice de volume dos troncos.

A ACP da estrutura da floresta na área de restauro, explicou 94,14% da variação dos dados nos dois primeiros eixos (Figura 11). O primeiro eixo (autovalor = 2,27) explicou 56,7% da variação e foi correlacionada com a densidade ( $r = 0,940$ ) e com a estratificação em altura ( $r$

= 0,931), o segundo eixo (autovalor = 1,50) explicou 37,46% da variação e foi correlacionado com o Índice de Volume do Tronco ( $r = 0,941$ ) e a área basal ( $r = 0,733$ ) (Figura 11).

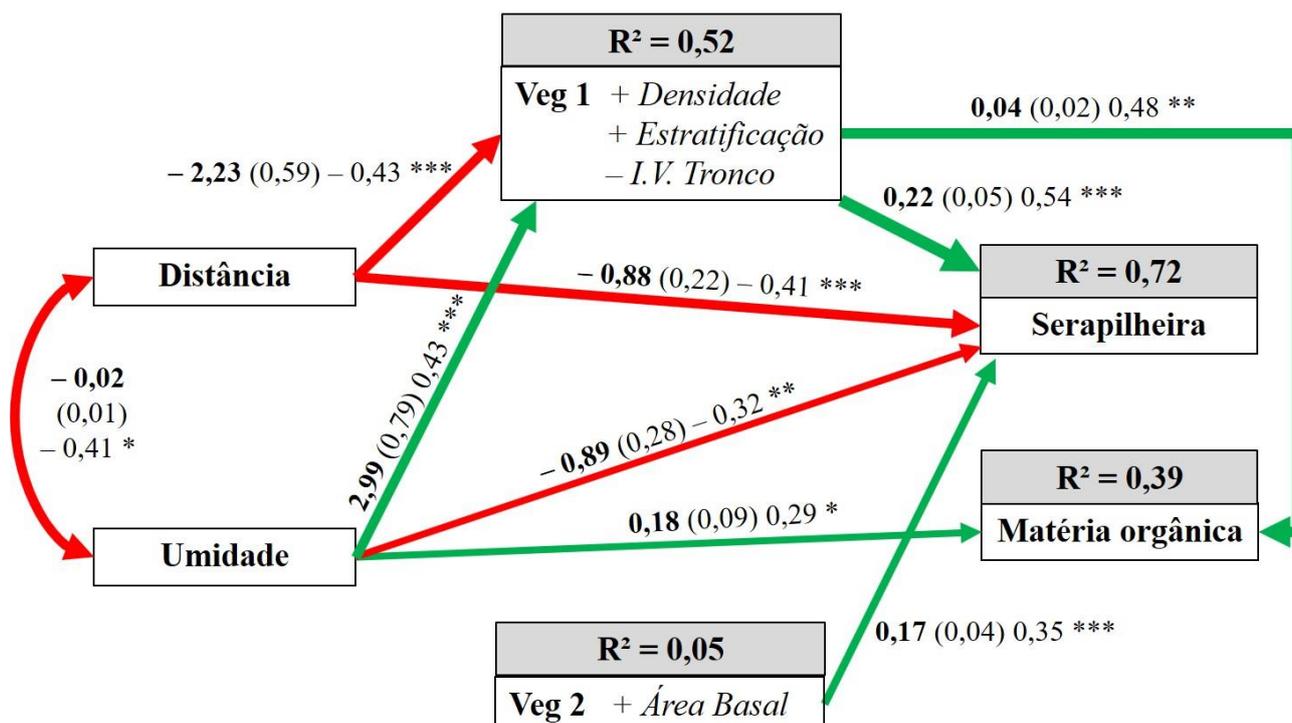


**Figura 11.** Resultados das análises dos componentes principais das variáveis da estrutura da vegetação somente na área de restauro. Os círculos azuis representam as parcelas do restauro e, os valores acima das parcelas são as distâncias para o reservatório. Em que: Estr alt = estratificação em altura, Dens = densidade, A Basal = Área basal e I.V. Troncos = Índice de volume dos troncos.

### 3. 3. Efeitos diretos e indiretos da distância do reservatório e da umidade do solo na quantidade de serapilheira acumulada e matéria orgânica do solo

O modelo A de equações estruturais (área de restauro e remanescentes florestais) se ajustou aos dados observados ( $\chi^2 = 1,900$ ;  $gl = 1$ ;  $P = 0,168$ ;  $CFI = 0,99$ ;  $RMSEA = 0,143$ ), e relacionou as variáveis exógenas (distância do reservatório e umidade do solo) com as variáveis endógenas (estrutura da vegetação, matéria orgânica e quantidade de serapilheira). O modelo

explicou 72% da variação de serapilheira acumulada e 39% da MOS (Figura 12). O modelo também explicou cerca de 52% da variação dos escores do eixo Veg 1 (correlacionado positivamente com densidade e estratificação e negativamente com índice de volume do tronco), mas apenas 5% da variação dos escores do eixo Veg 2 (correlacionado positivamente com área basal).



\*\*\* P < 0,001; \*\* P < 0,01; \* P < 0,05

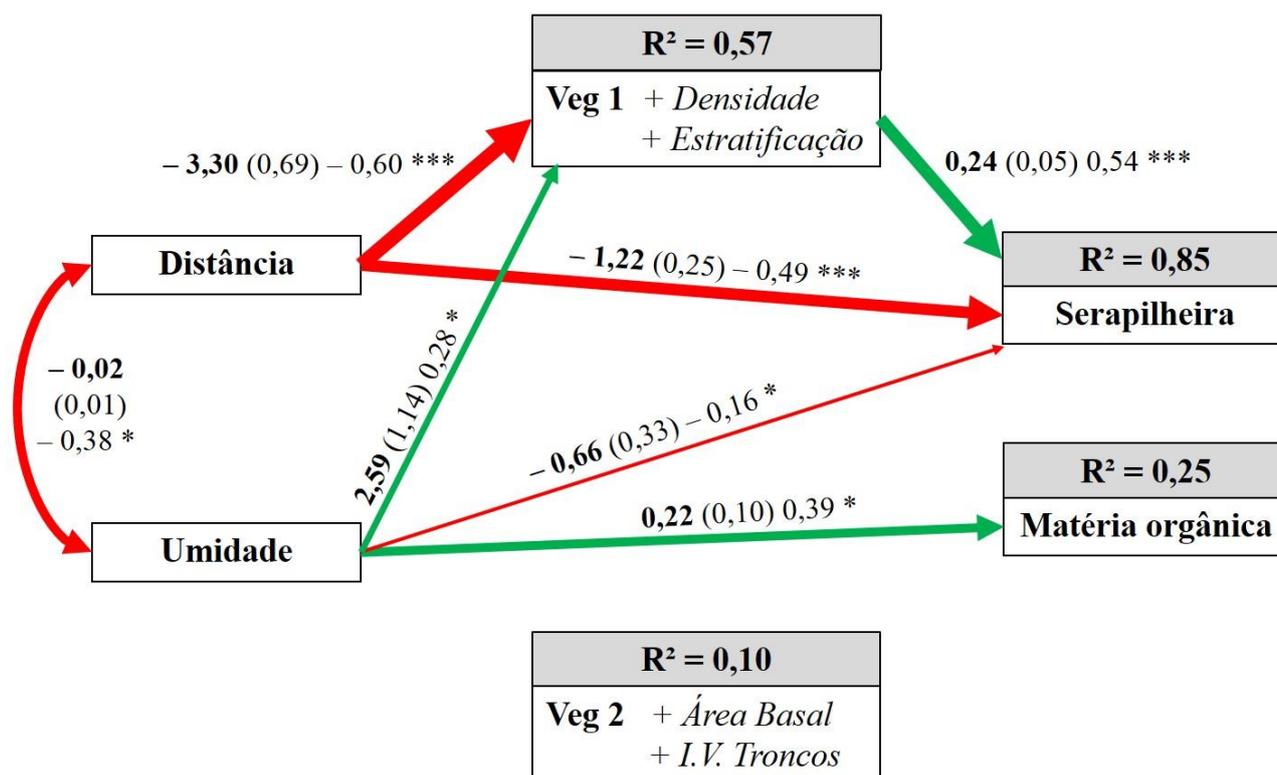
**Figura 12.** Modelo (A) de equação estrutural estimado para a área de restauro e remanescentes florestais ajustado entre a distância do reservatório e umidade do solo (variáveis exógenas) e a estrutura da vegetação, quantidade de serapilheira e matéria orgânica do solo (variáveis endógenas). Os coeficientes não-padronizados (coeficiente de regressão parcial) estão em negrito, seguidos pelo erro padrão em parênteses, e as estimativas padronizadas. As linhas verdes representam caminhos positivos, e as linhas vermelhas representam caminhos negativos. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas dos coeficientes.

O Modelo A mostrou um efeito direto e negativo da distância do reservatório e da umidade do solo na quantidade de serapilheira (Figura 12). Neste modelo, a quantidade de serapilheira foi positivamente influenciada por Veg 1, indicando que as parcelas mais próximas do reservatório também eram mais densas e estratificadas quando comparadas com as parcelas

mais distantes. Mesmo detectando uma relação positiva entre Veg 1 com a quantidade de serapilheira, o efeito líquido (Coef = - 1,37) da distância do reservatório foi negativo. Assim as parcelas mais distantes acumularam uma menor quantidade de serapilheira na superfície do solo, quando comparadas com as parcelas mais próximas do reservatório. A umidade do solo influenciou diretamente e negativamente a quantidade de serapilheira e positivamente o Veg 1 (Figura 12). Veg 1 influenciou positivamente a quantidade de serapilheira mostrando que parcelas mais densas e estratificadas com menores índices de volume do tronco tenderam a produzir uma maior quantidade de serapilheira. Apesar disto, o efeito líquido da umidade do solo na quantidade de serapilheira foi negativo (Coef = - 0,23), ou seja, parcelas com maior quantidade de umidade no solo acumularam uma menor quantidade de serapilheira. Além disso, o Veg 2 (diretamente correlacionado com área basal) influenciou positivamente a quantidade de serapilheira, ou seja, parcelas com maiores valores de área basal tenderam a produzir maior quantidade de serapilheira (Figura 12).

A umidade do solo influenciou positivamente a matéria orgânica do solo através do efeito direto e indiretamente via os parâmetros da estrutura da floresta associados ao Veg 1 resultando em um efeito líquido de 0,30 (Figura 12). Isto sugere fortemente que, parcelas mais úmidas, mais densas e estratificadas apresentaram maiores valores de matéria orgânica do solo. Por outro lado, a distância, independentemente da umidade, influenciou negativamente o Veg 1, que por sua vez, influenciou positivamente a matéria orgânica, resultando em um efeito líquido fracamente negativo (Coef = - 0,09) (Figura 12). Assim, as parcelas mais distantes do reservatório tenderam a apresentar menores valores de matéria orgânica no solo.

O Modelo B de equações estruturais (apenas a área de restauro) se ajustou aos dados observados ( $\chi^2 = 1,954$ ;  $gl = 1$ ;  $P = 0,162$ ;  $CFI = 0,99$ ;  $RMSEA = 0,173$ ). O Modelo explicou cerca de 85% da variação da quantidade de serapilheira acumulada e 25% da variação da MOS pelas variáveis exógenas e pela estrutura da vegetação (Figura 13). O modelo também explicou cerca de 57% da variação dos escores do eixo Veg 1 (correlacionado positivamente com densidade e estratificação), mas apenas 10% da variação dos escores do eixo Veg 2 (correlacionado positivamente com área basal e índice de volume do tronco).



\*\*\*  $P < 0,001$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*  $P < 0,05$

**Figura 13.** Modelo de equação estrutural (B) ajustado para a área de restauro. A distância do reservatório e a umidade do solo foram consideradas como variáveis exógenas e, a estrutura da vegetação, quantidade de serapilheira e matéria orgânica do solo como variáveis endógenas. Os coeficientes não-padronizados (coeficiente de regressão parcial) estão em negrito, seguidos pelo erro padrão em parênteses, e as estimativas padronizadas. As linhas verdes representam caminhos positivos, e as linhas vermelhas representam caminhos negativos. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas dos coeficientes.

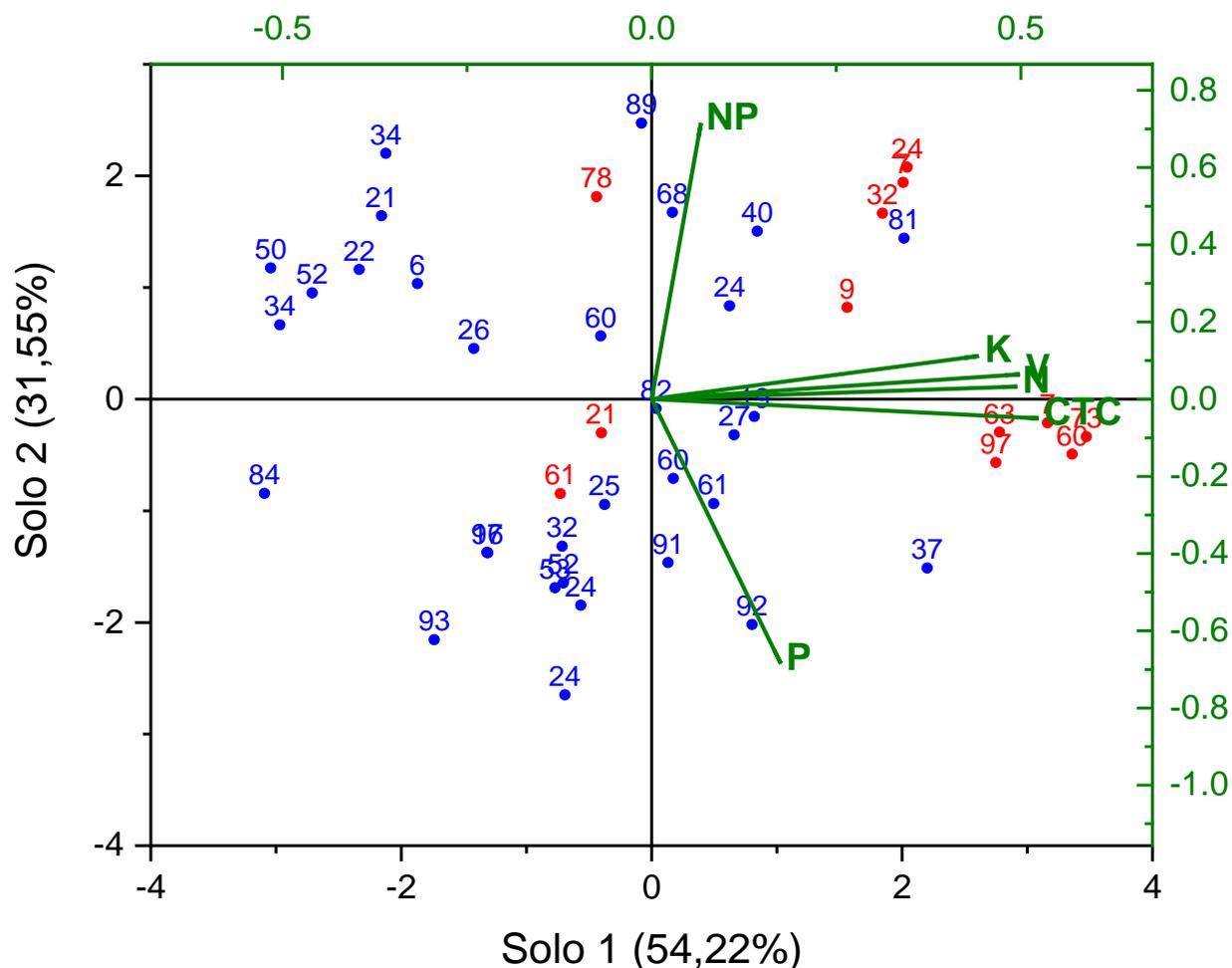
Igualmente ao Modelo A, no Modelo B a quantidade de serapilheira também foi fortemente influenciada pela distância do reservatório, mas também foi influenciada diretamente e negativamente pela umidade do solo. A distância foi negativamente relacionada aos parâmetros da estrutura da floresta associados com o primeiro eixo da ACP (Figura 13), sugerindo que as parcelas mais próximas eram mais densas e estratificadas quando comparadas com as parcelas mais distantes do reservatório. Apesar de detectarmos uma relação positiva entre este eixo da ACP com a quantidade de serapilheira, o efeito líquido (Coef =  $-2,01$ ) da distância do reservatório foi negativo, sendo que 61% do efeito líquido foi direto e negativo (Figura 13). Assim, as parcelas mais distantes produziram uma menor quantidade de serapilheira, quando comparadas com as parcelas mais próximas do reservatório. A umidade do solo influenciou diretamente e negativamente a quantidade de serapilheira, mas influenciou

positivamente a estratificação e densidade de árvores. Apesar disto, o efeito líquido da umidade do solo na quantidade de serapilheira (Coef = - 0,04) foi fracamente negativo. Assim, parcelas com maior quantidade de umidade no solo tenderam a produzir uma menor quantidade de serapilheira.

A quantidade de matéria orgânica no solo (MOS) foi influenciada apenas pelo teor de umidade. Esta relação foi positiva sugerindo que as parcelas mais úmidas tinham maiores quantidades de matéria orgânica (Figura 13). Os parâmetros da estrutura da vegetação associados com Veg 2 não foram relacionados nem com a distância do reservatório, nem com o teor de umidade do solo. Estes parâmetros também não influenciaram a quantidade de serapilheira nem de MOS. Os efeitos de Veg 1 na matéria orgânica do solo e, Veg 2 na serapilheira acumulada não ocorreu quando consideramos apenas a área de restauro (Modelo B), mostrando a complexidade dos efeitos quando é inserido as parcelas dos remanescentes florestais.

### **3. 4. Relação entre a matéria orgânica e os atributos químicos do solo**

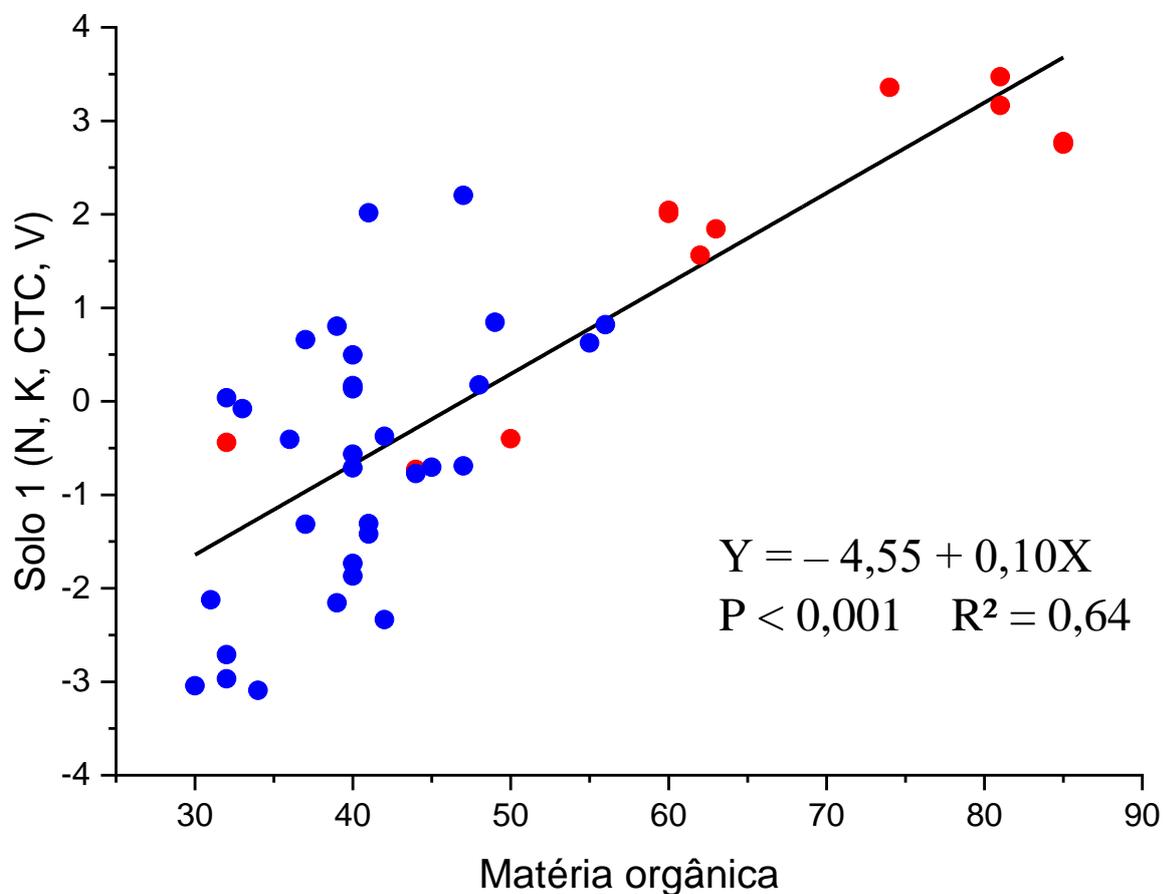
A ACP que avaliou os atributos químicos do solo (na área de restauro em conjunto com os fragmentos florestais) explicaram 85,77% da variação total dos dados (Figura 14). O primeiro eixo (autovalor = 3,25) foi correlacionado positivamente com a CTC ( $r = 0,945$ ), V ( $r = 0,899$ ), nitrogênio ( $r = 0,893$ ) e potássio ( $r = 0,800$ ). As parcelas dos remanescentes florestais tenderam a apresentar maiores concentrações destes atributos do solo quando comparadas com o solo das parcelas localizadas na área de restauro (Figura 14). O segundo eixo (autovalor = 1,89) foi correlacionado positivamente com a razão nitrogênio e fósforo ( $r = 0,983$ ) e negativamente com o fósforo ( $r = - 0,942$ ), o que sugere que os altos valores da razão N:P estão mais associados aos menores valores do fósforo do que a altos valores de nitrogênio. Os atributos químicos do solo estão descritos no Apêndice C.



**Figura 14.** Resultados das análises dos componentes principais dos atributos químicos do solo das parcelas localizadas na área de restauro e remanescentes florestais. Os círculos vermelhos representam as parcelas do remanescente florestal, os círculos azuis representam as parcelas do restauro e, os valores acima das parcelas são as distâncias de cada parcela à margem do reservatório. Em que: K = potássio, P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, V = saturação da CTC por bases e N:P = razão nitrogênio e fósforo.

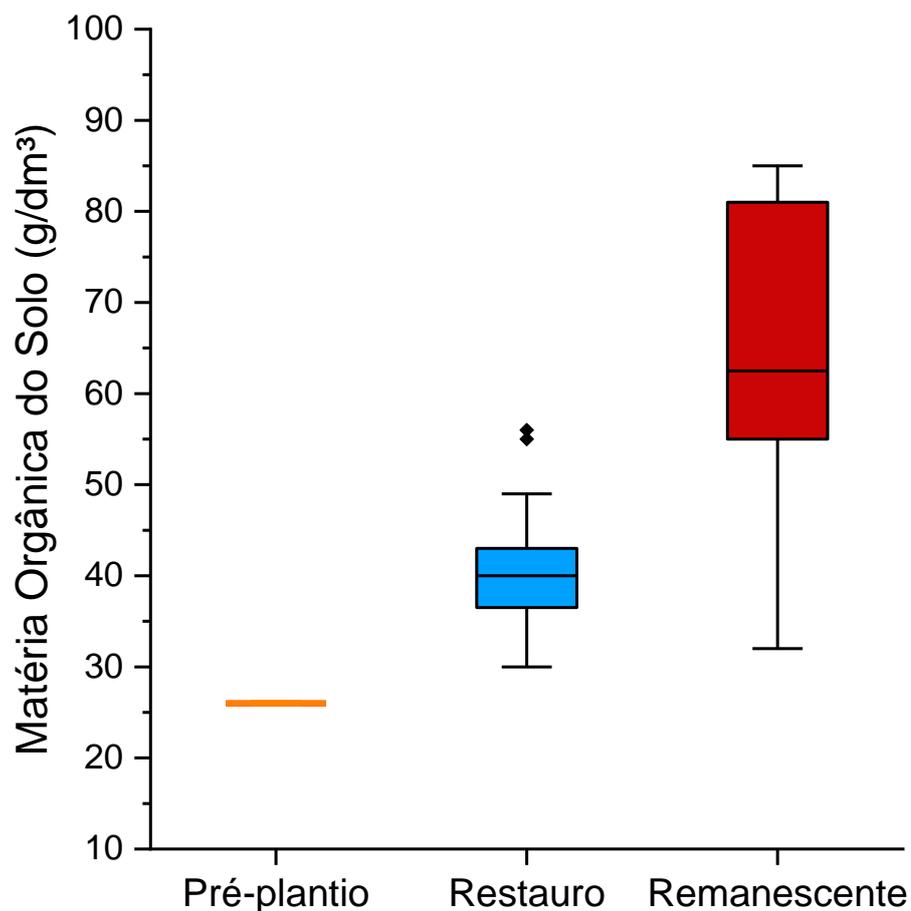
O primeiro eixo da ACP dos atributos químicos do solo foi positivamente relacionado com a MOS e, este modelo explicou 64% da variação dos dados (Figura 15). A maioria das parcelas localizadas nos remanescentes florestais foram as que apresentaram maiores quantidades de MOS. As altas correlações positiva entre Solo 1 e teores de nitrogênio, CTC, saturação de bases e potássio sugerem que a quantidade de matéria orgânica no solo influenciou fortemente e positivamente estes atributos no solo. Por outro lado, a matéria orgânica no solo

não influenciou os atributos químicos associados ao segundo eixo da ACP (fósforo e razão nitrogênio e fósforo) ( $F_{1,42} = 0,087$ ;  $P = 0,770$ ).



**Figura 15.** Relação entre os escores do Solo 1 e a matéria orgânica do solo. Círculos azuis representam as parcelas localizadas no restauro, círculos vermelhos representam as parcelas dos remanescentes florestais. Em que: N = nitrogênio total, K = potássio, CTC = capacidade de troca catiônica e V = saturação da CTC por bases.

A quantidade de matéria orgânica do solo foi significativamente maior na área restaurada após 12 anos quando comparada com a quantidade de matéria orgânica no solo na ocasião do pré-plantio ( $MOs = 26 \text{ g/dm}^3$ ) nesta mesma área ( $Z = 8,449$ ;  $P < 0,001$ ) (Figura 16). A matéria orgânica das áreas em restauro também diferiu dos sítios de referência ( $F_{1,22} = 25,608$ ;  $P < 0,001$ ) (Figura 16).



**Figura 16.** Box-plot da matéria orgânica do solo na área restaurada na ocasião da implantação do restauro e, 12 anos depois da restauração amostrados na área de restauro, e do solo amostrado nos remanescentes florestais. A linha laranja corresponde a uma coleta realizada antes do restauro em outubro de 2008 (26 g/dm<sup>3</sup>); o box azul apresenta as parcelas na área de restauro em outubro de 2020 após a implantação e, o box vermelho representa o solo coletado das parcelas nos remanescentes florestais também em outubro de 2020. Os boxes mostram a mediana, primeiro e terceiro quartil e, losangos cheios representam outliers.

#### 4. DISCUSSÃO

As florestas tropicais estão entre os ecossistemas de maior diversidade de todo o planeta, variando na composição de espécies, estrutura e produtividade, resultante do tipo de solo, clima e condições biogeográficas. Conforme essas florestas ficam mais maduras, maior será a interação entre espécies e mais complexo esse ecossistema será em termos estruturais e de funcionamento (CHAZDON, 2014). Neste contexto, sua restauração deve recriar um ecossistema de alta diversidade, autossustentável e resiliente, regulado por processos naturais como entrada constante de serapilheira e acúmulo de matéria orgânica, o que depende de uma alta complexidade na estrutura florestal e do restabelecimento dos atributos químicos e físicos do solo. No entanto, a recuperação destas características pode levar décadas ou mesmo séculos. Vários estudos avaliaram a recuperação de atributos químicos do solo em regiões tropicais, com idades entre 10 e 52 anos, e mostraram que estes ecossistemas não alcançaram valores registrados nos sítios de referência (MACEDO et al., 2008; AMAZONAS et al., 2011; NOGUEIRA JR et al., 2011; WANG et al., 2017).

Após 12 anos de restauração florestal, nosso estudo mostrou que a densidade de árvores foi maior nas parcelas próximas ao corpo d'água tanto nos sítios de referência como na área em restauração, sugerindo que a distância do reservatório influenciou fortemente o número de indivíduos, e, portanto, a estrutura da floresta. A taxa de decaimento da densidade dos indivíduos com o aumento da distância do reservatório foi menos acentuada nos remanescentes florestais quando comparadas às áreas de restauro (Figura 9), ou seja, o efeito da distância foi muito mais intenso nas áreas em restauração. Na área do restauro, as mudanças na densidade de árvores em função da distância do reservatório foram resultado apenas do número de regenerantes, portanto, de indivíduos que foram recrutados ao longo dos últimos 12 anos. Isto não deve ter ocorrido nos sítios de referência, onde o recrutamento constante de novos indivíduos é muito mais antigo. Apesar disto, nossos resultados mostraram que a densidade de indivíduos diminui com o aumento da distância do reservatório e, o modelo explicou 69% da variação dos dados (Figura 9), o que sugere fortemente que a dinâmica da floresta, expressa através do recrutamento e sobrevivência de indivíduos jovens, nos remanescentes também foi impactada com o enchimento do reservatório.

Vários fatores determinam a variação na distribuição espacial em uma comunidade de plantas. Estes fatores podem surgir de muitos processos bióticos e abióticos como recrutamento de novos indivíduos, que pode ser determinado pela limitação ou facilitação da dispersão de

sementes, heterogeneidade topográfica, disponibilidade de recursos, clima e distúrbios naturais e antrópicos (CONDIT et al., 2000). O efeito da distância de corpos d'água, por causa da declividade, é normalmente correlacionado com a umidade do solo e a sua influência na estrutura de florestas foi documentada para uma ampla variedade de comunidades de florestas tropicais (BALDECK et al., 2013). No nosso estudo, a distância também foi correlacionada com a umidade do solo devido a topografia das áreas. No entanto, os modelos estruturais mostraram a influência de ambos os fatores na estrutura da vegetação, mas até onde temos conhecimento, nossos resultados mostraram pela primeira vez a influência destes dois fatores de forma independente.

Nas áreas de restauro, bem como, nos sítios de referência, detectamos um efeito da distância do reservatório independentemente do teor de umidade no solo na densidade de indivíduos. Nos locais mais próximos do reservatório registramos uma maior densidade de indivíduos (Figura 9), o que pode estar relacionado a diferenças na quantidade de sementes na superfície do solo ao longo da distância do reservatório. Uma maior quantidade de sementes nos locais mais próximos do corpo d'água pode ser combinação de pelo menos três fatores: as sementes podem ter sido transportadas pelo vento (OZINGA et al., 2009), pelo carreamento das sementes, junto com a serapilheira, através do escoamento superficial da chuva de áreas mais distantes para áreas mais próximas do reservatório (TABACCHI et al., 2005) e pela maior movimentação da fauna, que utiliza as margens do reservatório para forrageamento ou reprodução (CORLETT, 2017). Estes deslocamentos combinados podem resultar numa maior quantidade de sementes nos locais mais próximos do reservatório. No entanto, a hipótese de uma maior quantidade de sementes sendo depositadas nos locais mais baixos e próximos aos corpos d'água requerem uma investigação mais profunda no contexto espacial terrestre, a fim de melhor identificar esses processos ecológicos.

A umidade do solo também influenciou fortemente a densidade de indivíduos independentemente da distância. A água é a base do metabolismo da planta, pois todos os nutrientes e compostos necessários para seu desenvolvimento, são dissolvidos ou transportados pela água (QIU et al., 2018). Em geral, a relação planta e umidade depende de vários fatores que influenciam tanto a absorção quanto a demanda por água, o que varia entre as espécies de plantas (NAIMAN et al., 2005). Assim, a disponibilidade de água exerce uma forte influência na estrutura das comunidades ribeirinhas, principalmente por favorecer espécies mais dependentes de água (NILSSON e SVEDMARK, 2002).

Com isso, a maior umidade do solo devido à proximidade do reservatório pode ter contribuído para uma maior densidade, tanto nas parcelas de restauro como nos sítios de referência. Uma maior densidade de indivíduos poderia ser o resultado da maior probabilidade de germinação das sementes depositadas no solo (ANDERSSON et al., 2000), combinada com uma maior taxa de sobrevivência dos indivíduos emersos. Processo similar ocorreu na floresta tropical semidecídua na Bolívia, onde, em nove anos, a disponibilidade de água foi mais importante para o recrutamento de novos indivíduos e crescimento, do que a fertilidade do solo (VAN DER SANDE et al., 2017). RAYMUNDO et al. (2019), mostraram o mesmo processo numa floresta tropical sazonal em Minas Gerais, onde, 10 anos após a construção de um reservatório, houve um aumento de riqueza e abundância de espécies de plantas, devido ao maior recrutamento de indivíduos nos sítios mais próximos ao reservatório (0-10m) em remanescentes florestais antigos.

A maior densidade de indivíduos registrada nas proximidades do reservatório resultou nas diferenças detectadas na estrutura da vegetação em relação à distância do corpo d'água. A maioria das parcelas do restauro e, todas as parcelas dos remanescentes florestais eram mais densas e estratificadas próximas do reservatório (Figuras 10 e 11). O recrutamento diferencial de novos indivíduos resultou na variação da estratificação em altura da floresta ao longo da distância do reservatório. Nas parcelas mais próximas ao reservatório, tanto nos sítios de referência como nas áreas de restauro, registramos uma floresta mais estratificada e com maior número de indivíduos menores. Por outro lado, tanto na área restaurada como nos remanescentes apresentaram árvores maiores nas parcelas mais distantes do reservatório, com maiores valores do índice de Volume do Tronco. O que seria esperado, simplesmente, pelo fato de que um grande número de indivíduos pequenos nas parcelas próximas ao reservatório diminuiu o valor médio do tamanho das árvores (Figuras 10 e 11).

A umidade do solo exerceu um efeito positivo, enquanto a distância exerceu um efeito negativo no primeiro eixo gerado pela ACP (Veg 1). Assim, nas parcelas mais próximas do corpo d'água, a floresta era mais densa e estratificada. Nestas parcelas registramos maiores quantidades de serapilheira, o que ocorreu quando consideramos as áreas de restauro em conjunto com os remanescentes florestais, mas também, quando consideramos apenas a área de restauro (Figuras 12 e 13). As parcelas mais densas e estratificadas, poderiam contribuir mais efetivamente com a produção e estoque de serapilheira como seria esperado, uma vez que nestas parcelas a produção de folhas e galhos finos, que compõem a grande maioria da serapilheira deve ser maior. No entanto, além da distância influenciar indiretamente a quantidade de

serapilheira via estrutura da floresta, detectamos o efeito direto, que independentemente da umidade do solo, foi negativo. Em períodos de estiagem, a serapilheira seca pode ser mais facilmente transportada pelo vento de áreas altas para áreas mais baixas (TONIN et al., 2017), e nos períodos chuvosos, este transporte poderia ocorrer junto com o escoamento superficial, uma vez que a inclinação da área poderia facilitar este transporte, de pontos mais altos para acumulá-la em áreas mais baixas durante precipitações torrenciais (FACELLI e PICKETT, 1991). Em florestas decíduas do Oregon, foi detectado a mesma movimentação de serapilheira em áreas inclinadas na estação seca do hemisfério norte (primavera/verão) (HART et al., 2013).

O efeito líquido da umidade, independentemente da distância, na quantidade de serapilheira foi negativo, tanto pelo modelo A quanto pelo modelo B (Figuras 12 e 13), entretanto, este efeito foi mais intenso quando consideramos a área em restauração em conjunto com os remanescentes. Em florestas tropicais, a disponibilidade de água, altas temperaturas e a comunidade de decompositores são condições favoráveis para uma rápida decomposição do resíduo vegetal (WIEDER et al., 2009), o que pode ter contribuído para que as parcelas mais úmidas terem quantidades ligeiramente menores de serapilheira acumulada.

Por outro lado, a área basal total das árvores não influenciou o estoque de serapilheira na área de restauro (Figura 13) e, mostrou um fraco efeito positivo quando os sítios de referência foram considerados (Figura 12). A área basal é considerada um importante indicador de sucessão, pois modifica o ambiente local (LEBRIJA-TREJOS et al., 2011) e, as espécies que possuem maior área basal e volume possuem copas maiores, levando a uma quantidade maior de folhas produzidas e descartadas ao longo do ano, o que pode levar a um aumento também na adição de nutrientes nas camadas superficiais do solo (RUIZ-BENITO et al., 2014; GIWETA, 2020). Assim, as parcelas localizadas nos remanescentes florestais podem ter contribuído na quantidade de serapilheira, devido ao fato de que estas florestas são mais densas e com árvores mais desenvolvidas, quando comparadas com a área de restauro. Neste momento, apesar de a área basal total refletir numa maior biomassa de troncos, foi a maior quantidade de indivíduos arbóreos combinado com uma maior estratificação que resultou numa maior quantidade de serapilheira (Figura 12).

Nós detectamos o efeito direto e positivo na umidade na quantidade de matéria orgânica no solo nos dois Modelos (A e B), mostrando que a umidade do solo influencia positivamente a quantidade de matéria orgânica (Figuras 12 e 13). Parece existir um efeito de retroalimentação entre a umidade e a matéria orgânica, pois a umidade combinada com altas temperaturas, drenagem e textura do solo favorecem uma maior produção de matéria orgânica (BRADY e

WEIL, 2014), e, ao mesmo tempo, a matéria orgânica pode aumentar não apenas a taxa de infiltração da água, como diminuir o escoamento superficial e assim, contribuindo para a retenção da umidade no solo (LIU et al., 2018).

A umidade influenciou positivamente a matéria orgânica também via estrutura da vegetação, mas apenas quando os remanescentes florestais foram incluídos (Modelo A), mostrando que florestas mais densas e mais estratificadas resulta em maiores quantidades de serapilheira, mas também, de matéria orgânica no solo (Figura 12). No modelo A, a produtividade das plantas que crescem em ambientes relativamente úmidos leva a uma maior produção de serapilheira e, conseqüentemente a maiores adições de matéria orgânica no solo com efeitos diretos na ciclagem de nutrientes (BRADY e WEIL, 2014). Esse ciclo pode ser influenciado pelo tipo de floresta, estágio sucessional e a produtividade local, embora, muitos desses fatores estão inter-relacionados (NAIMAN et al., 2005). O efeito da estrutura da floresta na quantidade de matéria orgânica no solo não foi detectado quando consideramos apenas a área de restauro (Figura 13). Isto pode sugerir que, ou o tempo de incorporação da matéria orgânica no solo produzida pela floresta, ainda não foi suficiente para a detecção de um aumento da matéria orgânica no restauro, ou a variação na estrutura da floresta plantada é muito pequena para se detectar este efeito, ou seja, a floresta plantada é ainda muito homogênea quando comparada com os sítios de referência.

Antes da implantação do restauro, a área de estudo foi utilizada por mais de 30 anos como cultivo de cana-de-açúcar, levando a mudanças nas propriedades do solo que afetaram direta e indiretamente muitos de seus processos funcionais, principalmente nas camadas superficiais, que são mais ricas em matéria orgânica e com maior atividade biológica. A supressão da vegetação em florestas tropicais, e o uso do solo para fins agrícolas e pastoris, normalmente diminui os estoques de carbono orgânico do solo, aumenta sua densidade e altera o pH (VELDKAMP et al., 2020). Nossos resultados mostraram, como esperado, que as parcelas dos sítios de referências apresentaram as maiores concentrações de nutrientes, quando comparados às parcelas localizadas na área de restauro (Figura 14). A fertilidade do solo foi fortemente relacionada com o seu teor de matéria orgânica, mas os sítios de referência apresentaram uma quantidade maior de matéria orgânica e fertilidade quando comparadas ao restauro (Figura 15).

A matéria orgânica é considerada um indicador chave da qualidade do solo, e está associado a serviços ecossistêmicos como sequestro de carbono, retenção de água, fertilidade, controle de erosão, entre outros (ADHIKARI e HARTEMINK, 2016). Após 12 anos de

restauro, houve um incremento de 37% da quantidade de matéria orgânica na área restaurada, quando comparadas com a quantidade de matéria orgânica coletado antes da restauração (Figura 16). Esse aumento parece ser resultado do rápido desenvolvimento da estrutura vegetal que contribuiu com a produção de serapilheira e para sua incorporação no solo, recuperando pelo menos parcialmente, a quantidade de matéria orgânica que seria esperado nos remanescentes florestais. Além disso, as ações conduzidas no início da restauração em 2008 incluíram, além do plantio de mudas de espécies arbóreas, uma deposição de matéria orgânica na superfície do solo via palhada de cana-de-açúcar ao longo do primeiro ano, com o objetivo de proteger o solo contra a luminosidade solar excessiva, diminuir o escoamento superficial, reter a umidade, diminuir a intensa variação de temperaturas nas camadas superficiais, e aumentar a atividade biológica do solo (PRIMAVESI, 2002; NOLAN et al., 2021), mesmo que temporariamente.

O aumento da matéria orgânica resulta na recuperação das condições edáficas incluindo propriedades físicas do solo e a retenção e disponibilidade de macro e micronutrientes, devido ao fato de que teores de matéria orgânica regulam a capacidade de troca catiônica (CTC), principalmente em solos tropicais (BRADY e WEIL, 2014). Após 12 anos, registramos um aumento considerável na quantidade de matéria orgânica no solo. No entanto, este tempo ainda não foi suficiente para restabelecer a quantidade de matéria orgânica e de outros atributos químicos baseado nas áreas de referência. A recuperação das quantidades de nutrientes deve ser normalmente lenta, e a velocidade com que isto ocorre parece depender do histórico do uso da terra, do clima, das propriedades físicas do solo e provavelmente das espécies de árvores plantadas, podendo levar décadas até atingir valores semelhantes aos dos remanescentes florestais locais (POWERS e MARIN-SPIOTTA, 2017).

## **5. CONCLUSÃO**

Nossos resultados mostraram que a variação na trajetória e velocidade da restauração da floresta às margens da PCH Anhanguera parece ser determinada pela distância do corpo d'água devido a topografia da região e pela umidade do solo provocada pelo enchimento do reservatório, mas de maneira independente. Locais mais baixos e mais úmidos favoreceram a formação de florestas mais densas e estratificadas, o que resultou em maiores quantidades de serapilheira acumulada na superfície do solo. Além disso, as áreas mais úmidas tinham os maiores valores de matéria orgânica, e a grande quantidade de regenerantes próximo ao

reservatório indicam uma trajetória da floresta em restauração em direção aos remanescentes florestais

A diferença entre os modelos A e B sugerem que, para se detectar o efeito direto da estrutura da vegetação na quantidade de matéria orgânica, parece depender do grau de complexidade da estrutura da floresta, uma vez que quando consideramos apenas a área em restauração não detectamos tal efeito. Florestas tropicais antigas tendem a serem mais complexas, mais densas, com maior área basal e maior variação no tamanho das árvores do que as florestas em estágios sucessionais inferiores. No entanto, as ações da implantação do restauro, combinadas com o período de apenas 12 anos, foram suficientes para detectarmos o efeito destas ações, no acúmulo de serapilheira e num aumento substancial na quantidade de matéria orgânica no solo. Como a matéria orgânica se relacionou fortemente com a fertilidade do solo, é provável que a fertilidade do solo na área em restauração tenha se recuperado, pelo menos parcialmente.

A relação intrínseca entre vegetação e solo que vimos neste estudo, indicam que monitoramentos de áreas em restauração devem abordar tanto a vegetação, pois fornece indicadores sensíveis a mudanças rápidas em sua estrutura, como o solo que, embora apresente mudanças mais a longo prazo, têm um forte impacto na recuperação dos processos ecossistêmicos.

Certamente, ainda há uma série de variáveis ambientais não medidas (luz, umidade do ar, temperatura, textura e drenagem do solo, atividades microbianas, entre outros) que apresentam variações quando mensurados em grandes escalas espaciais, devido à alta estocasticidade ambiental, e que podem contribuir para o entendimento da trajetória da estrutura de uma floresta em restauração. No entanto, há um estímulo crescente para a restauração de ecossistemas em todo o mundo e, os esforços da restauração necessitam de abordagens que sejam práticas em larga escala. Como a maioria dos estudos científicos são realizados em pequenas escalas, o presente estudo pode contribuir para orientar projetos de restauração de grandes dimensões que serão implementados nessa década.

## 6. REFERÊNCIAS

ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services – A global review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, p. 101-111, jan. 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAVOREK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

ÁLVAREZ-YÉPIZ, J. C.; Restoration ecology in the Anthropocene: learning from responses of tropical forests to extreme disturbance events. **Restoration Ecology**, Washington, v. 28, n. 2, p. 271-276, mar. 2020.

AMAZONAS, N. T.; MARTINELLI, L. A.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUES, R. R. Nitrogen dynamics during ecosystem development in tropical forest restoration. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 8, p. 1551-1557, out. 2011.

ANDERSSON, E.; NILSSON, C.; JOHANSSON, M. E. Effects of river fragmentation on plant dispersal and riparian flora. **Regulated Rivers: Research & Management**, New Jersey, v. 16, n. 1, p. 83-89, fev. 2000.

ARONSON, J.; DHILLION, S.; LE FLOC'H, E. On the need to select an ecosystem of reference, however imperfect: a reply to Pickett and Parker. **Restoration Ecology**, Washington, v. 3, n. 1, p. 1-3, mar. 1995.

BALDECK, C. A.; HARMS, K. E.; YAVITT, J. B.; JOHN, R.; TURNER, B. L.; VALENCIA, R.; NAVARRETE, H.; DAVIES, S. J.; CHUYONG, G. B.; KENFACK, D.; THOMAS, D. W.; MADAWALA, S.; GUNATILLEKE, N.; GUNATILLEKE, S.; BUNYAVEJCHEWIN, S.; KIRATIPRAYOON, S.; YAACOB, A.; NUR SUPARDI, M. N.; DALLING, J. W. Soil resources and topography shape local tree community structure in tropical forests. **Proceedings of the royal society B: Biological Sciences**, London, v. 280, n. 1753, p. 1-7, fev. 2013

BALTZER, J.L.; THOMAS, S.C. Determinants of whole-plant light requirements in Bornean rain forest tree saplings. **Journal of Ecology**, London, v. 95, n. 6, p. 1208-1221, nov. 2007.

BENDIX, J. Scale, direction, and pattern in riparian vegetation-environment relationships. **Annals of the Association of American Geographers**, Cambridge, v. 84, n. 4, p. 652-665, dez. 1994

BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; DANTAS, A.S.L.; PONÇANO, W.L.; CAMPANHA, G.A.C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; CREMONINI, O.A. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:500.000**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. 126 p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. **Elements of the nature and properties of soils**. Harlow: Pearson Education Limited, 3rd ed. 2014. 666 p.

BREWER, J. S.; MENZEL, T. A method for evaluating outcomes of restoration when no reference sites exist. **Restoration Ecology**, Washington, v. 17, n. 1, p. 4-11, jan. 2009.

BRUDVIG, L. A.; BARAK, R. S.; BAUER, J. T.; CAUGHLIN, T. T.; LAUGHLIN, D. C.; LARIOS, L.; MATTHEWS, J. W.; STUBLE, K. L.; TURLEY, N. E.; ZIRBEL, C. R. Interpreting variation to advance predictive restoration science. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 54, n. 4, p. 1018-1027, ago. 2017.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G. D.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 120, p. 105-125, mai. 2018.

CHAZDON, R. L. **Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation**. Chicago: The University of Chicago Press, 2014. 472 p.

CONDIT, R.; ASHTON, P. S.; BAKER, P.; BUNYAVEJCHEWIN, S.; GUNATILLEKE, S.; GUNATILLEKE, N.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B.; ITOH, A.; LAFRANKIE, J. V.; LEE, H. S.; LOSOS, E.; MANOKARAN, N.; SUKUMAR, R.; YAMAKURA, T. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, Washington, v. 288, n. 5470, p. 1414-1418, mai. 2000.

CORLETT, R. T. Frugivory and seed dispersal by vertebrates in tropical and subtropical Asia: An update. **Global Ecology and Conservation**, Amsterdam, v. 11, p. 1-22, jul. 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.

ERFANI, M.; SALMANMAHINY, A.; DANEHKAR, A.; ETEMAD, V. Modeling of forest soil and litter health using disturbance and landscape heterogeneity indicators in northern Iran. **Journal of Mountain Science**, Sichuan, v. 14, n. 9, p. 1801-1813, set. 2017.

FACELLI, J. M.; PICKETT, S. T. A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. **The Botanical Review**, New York, v. 57, n. 1, p. 1-32, jan. 1991.

GANN, G. D.; McDONALD, T.; WALDER, B.; ARONSON, J.; NELSON, C. R.; JONSON, J.; HALLETT, J. G.; EISENBERG, C.; GUARIGUATA, M. R.; LIU, J.; HUA, F.; ECHEVERRÍA, C.; GONZALES, E.; SHAW, N.; DECLEER, K.; DIXON, K. W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second Edition. **Restoration Ecology**, Washington, v. 27, n. S1, p. S1-S46, set. 2019.

GESSNER, M. O.; SWAN, C. M.; DANG, C. K.; MCKIE, B. G.; BARDGETT, R. D.; WALL, D. H.; HÄTTENSCHWILER, S. Diversity meets decomposition. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 25, n. 6, p. 372-380, jun. 2010.

GILLMAN, L. N.; WRIGHT, S. D.; OGDEN, J. Response of forest tree seedlings to simulate litterfall damage. **Plant Ecology**, Netherlands, v. 169, n. 1, p. 53-60, nov. 2003.

GIWETA, M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. **Journal of Ecology and Environment**, London, v. 44, p. 1-9, mai. 2020.

GUERRA, A.; REIS, L. K.; BORGES, F. L. G.; OJEDA, P. T. A.; PINEDA, D. A. M.; MIRANDA, C. O.; MAIDANA, D. P. F. L.; SANTOS, T. M. R.; SHIBUYA, P. S.; MARQUES, M. C. M.; LAURANCE, S. G. W.; GARCIA, L. C. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 458, p. 1-7, fev. 2020.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5th ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

HART, S. K.; HIBBS, D. E. Riparian litter inputs to streams in the central Oregon Coast Range. **Freshwater Science**, Chicago, v. 32, n. 1, p. 343-358, mar. 2013.

HENEGHAN, L.; MILLER, S. P.; BAER, S.; CALLAHAM JR., M. A.; MONTGOMERY, J.; PAVAO-ZUCKERMAN, M.; RHOADES, C. C.; RICHARDSON, S. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. **Restoration Ecology**, Washington, v. 16, n. 4, p. 608-617, dez. 2008.

HOLL, K. D. Restoring tropical forests from the bottom up. **Science**, Washington, v. 355, n. 6324, p. 455-456, fev. 2017.

HOOPER, D.; COUGHLAN, J.; MULLEN, M. Structural equation modelling: guidelines for determining model fit. **Electronic Journal of Business Research Methods**, Kidmore End, v. 6, n. 1, p. 53-60, jan. 2008.

JORDAN III, W. R.; GILPIN, M. E.; ABER, J. D. **Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 342 p.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Colorado Springs, v. 23, n. 3, p. 187-200, set. 1958.

KARDOL, P.; WARDLE, D. A. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 25, n. 11, p. 670-679, nov. 2010.

KNELMAN, J. E.; GRAHAM, E. B.; FERRENBURG, S.; LABRADO, A.; DARCY, J. L.; NEMERGUT, D. R.; SCHMIDT, S. K. Rapid shifts in soil nutrients and decomposition enzyme activity in early succession following forest fire. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 1-12, set. 2017.

KOHYAMA, T. Significance of architecture and allometry in saplings. **Functional Ecology**, New York, v. 1, n. 4, p. 399-404, 1987.

KOHYAMA, T.; HOTTA, M. Significance of allometry in tropical saplings. **Functional Ecology**, New York, v. 4, n. 4, p. 515-521, 1990.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, Basel, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, mai. 2015.

LEBRIJA-TREJOS, E.; PÉREZ-GARCÍA, E. A.; MEAVE, J. A.; POORTER, L.; BONGERS, F. Environmental changes during secondary succession in a tropical dry forest in Mexico. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 27, n. 5, p. 477-489, set. 2011.

LEGATES, D. R.; MAHMOOD, R.; LEVIA, D. F.; DELIBERTY, T. L.; QUIRING, S. M.; HOUSER, C.; NELSON, F. E. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, London, v. 35, n. 1, p. 65-86, fev. 2011.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical Ecology**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. 1006 p.

LI, B.; LI, P.; ZHANG, W. T.; JI, J. Y.; LIU, G. B.; XU, M. X. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau. **Geoderma**, Amsterdam, v. 399, p. 1-13, out. 2021.

LIU, J.; GAO, G.; WANG, S.; JIAO, L.; WU, X.; FU, B. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics. **Journal of Geographical Sciences**, London, v. 28, n. 1, p. 59-78, jan. 2018.

LIU, W.; LUO, Q.; LU, H.; WU, J.; DUAN, W. The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes, SW China. **Catena**, Netherlands, v. 149, n. 1, p. 167-175, fev. 2017.

MACEDO, M. O.; RESENDE, A. S.; GARCIA, P. C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 5-6, p. 1516-1524, abr. 2008.

MAY, R. A.; STEVENSON, K. J. Software Review of Origin 8. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 131, n. 2, p. 872-872, jan. 2009.

NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H.; McCLAIN, M. E. **Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities**. London: Elsevier Academic Press, 2005. 448 p.

NILSSON, C.; SVEDMARK, M. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: Riparian plant communities. **Environmental Management**, v. 30, n. 4., p. 468-480, out. 2002.

NOGUEIRA JR., L. R.; GONÇALVES, J. L. M.; ENGEL, V. L.; PARROTTA, J. Soil dynamics and carbon stocks 10 years after restoration of degraded land using Atlantic Forest tree species. **Forest Systems**, Madrid, v. 20, n. 3, p. 536-545, dez. 2011.

NOLAN, M.; STANTON, K. J.; EVANS, K.; PYM, L.; KAUFMAN, B.; DULEY, E. From the ground up: prioritizing soil at the forefront of ecological restoration. **Restoration Ecology**, Washington, e 13453, p. 1-5, jun. 2021.

NUNES, L.; VICENTE, A.K.; CANDIDO, D.H. Clima da região sudeste do Brasil. *In*: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F. (Org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 464 p.

OZINGA, W. A.; RÖMERMANN, C.; BEKKER, R. M.; PRINZING, A.; TAMIS, W. L. M.; SCHAMINÉE, J. H. J.; HENNEKENS, S. M.; THOMPSON, K.; POSCHLOD, P.; KLEYER, M.; BAKKER, J. P.; VAN GROENENDAEL, J. M. Dispersal failure contributes to plant losses in NW Europe. **Ecology Letters**, Hoboken, v. 12, n. 1, p. 66-74, jan. 2009.

PALMQUIST, E. C.; RALSTON, B. E.; MERRITT, D. M.; SHAFROTH, P. B. Landscape-scale processes influence riparian plant composition along a regulated river. **Journal of Arid Environments**, Amsterdam, v. 148, p. 54-64, jan. 2018.

PANDIT, R.; PARROTTA, J. A.; CHAUDHARY, A. K.; KARLEN, D. L.; VIEIRA, D. L. M.; ANKER, Y.; CHEN, R.; MORRIS, J.; HARRIS, J.; NTSHOTSHO, P. A framework to evaluate land degradation and restoration responses for improved planning and decision-making. **Ecosystems and People**, London, v. 16, n. 1, p. 1-18, jan. 2020.

PEÑA-CLAROS, M.; POORTER, L.; ALARCÓN, A.; BLATE, G.; CHOQUE, U.; FREDERICKSEN, T. S.; JUSTINANO, M. J.; LEAÑO, C.; LICONA, J. C.; PARIONA, W.; PUTZ, F. E.; QUEVEDO, L.; TOLEDO, M. Soil effects on forest structure and diversity in a moist and a dry tropical forest. **Biotropica**, New Jersey, v. 44, n. 3, p. 276-283, mai. 2012.

POWERS, J. S.; MARÍN-SPIOTTA, E. Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, San Mateo, v. 48, p. 497-519, nov. 2017.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo Ecológico do Solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: NBL Editora, 2002, 549 p.

QIU, K.; XIE, Y.; XU, D.; POTT, R. Ecosystem function including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for vegetation recovery. **Scientific Reports**, London, v. 8, p. 1-11, mai. 2018.

- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 240 p.
- RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.
- RAYMUNDO, D.; PRADO-JUNIOR, J. A.; CARVALHO, F. A.; VALE, V. S.; OLIVEIRA, P. E.; VAN DER SANDE, M. T. Shifting species and functional diversity due to abrupt changes in water availability in tropical dry forests. **Journal of Ecology**, London, v. 107, n. 1, p. 253-264, jan. 2019.
- ROSSEEL, Y. lavaan: an R package for structural equation modeling. **Journal of Statistical Software**, Innsbruck, v. 48, n. 2, p. 1-36, mai. 2012.
- ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p.
- RUIZ-BENITO, P.; GÓMEZ-APARICIO, L.; PAQUETTE, A.; MESSIER, C.; KATTGE, J.; ZAVALA, M. A. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. **Global Ecology and Biogeography**, Hoboken, v. 23, n. 3, p. 311-322, mar. 2014.
- RUIZ-JAÉN, M. C.; AIDE, T. M. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 218, n. 1, p. 159-173, out. 2005.
- SANTOS, R. S.; WIESMEIER, M.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; LOCATELLI, J. L.; HOLZSCHUH, M.; CERRI, C. E. P. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 400, p. 1-14, out. 2021.
- SAYER, E. J.; TANNER, E. V. J.; CHEESMAN, A. W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. **Plant and Soil**, v. 281, n. 1-2, p. 5-13, mar. 2006.

SEBER, G. A. F.; WILD, C. J. **Nonlinear Regression**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 768 p.

SEDDON, N.; TURNER, B.; BERRY, P.; CHAUSSON, A.; GIRARDIN, C. A. J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. **Nature Climate Change**, London, v. 9, p. 82-87, fev. 2019.

SILVA, W. B.; PÉRICO, E.; DALZUCHIO, M. S.; SANTOS, M.; CAJAIBA, R. L. Are litterfall and litter decomposition processes indicators of forest regeneration in the neotropics? Insights from a case study in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 429, p. 189-197, dez. 2018.

SILVER, W. L.; HALL, S. J.; GONZÁLES, G. Differential effects of canopy trimming and litter deposition on litterfall and nutrient dynamics in a wet subtropical forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 332, p. 47-55, nov. 2014.

SUDING, K.; HIGGS, E.; PALMER, M.; CALLICOTT, J. B.; ANDERSON, C. B.; BAKER, M.; GUTRICH, J. J.; HONDULA, K. L.; LAFEVOR, M. C.; LARSON, B. M. H.; RANDALL, A.; RUHL, J. B.; SCHWARTZ, K. Z. S. Committing to ecological restoration. **Science**, Washington, v. 348, n. 6235, p. 638-640, mai. 2015.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, Washington, v. 23, n. 3, p. 238-251, mai. 2015.

TABACCHI, E.; PLANTY-TABACCHI, A. M.; ROQUES, L.; NADAL, E. Seed inputs in riparian zones: implications for plant invasion. **River research and applications**, New Jersey, v. 21, n. 2-3, p. 299-313, mar. 2005.

TONIN, A. M.; GONÇALVES JR, J. F.; BAMBI, P.; COUCEIRO, S. R. M.; FEITOZA, L. A. M.; FONTANA, L. E.; HAMADA, N.; HEPP, L. U.; LEZAN-KOWALCZUK, V. G.; LEITE, G. F. M.; LEMES-SILVA, A. L.; LISBOA, L. K.; LOUREIRO, R. C.; MARTINS, R. T.; MEDEIROS, A. O.; MORAIS, P. B.; MORETTO, Y.; OLIVERIA, P. C. A.; PEREIRA, E. B.; FERREIRA, L. P.; PÉREZ, J.; PETRUCIO, M. M.; REIS, D. F.; REZENDE, R. S.; ROQUE, N.; SANTOS, L. E. P.; SIEGLOCH, A. E.; TONELLO, G.; BOYERO, L. Plant litter dynamics in the forest-stream interface: precipitation is a major control across tropical biomes. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 1-14, set. 2017.

UN – UNITED NATIONS. **United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030)**. A/RES/73/284, 73th session, 19-03519, p. 1-6, 2019.

VALE, V. S.; SCHIAVINI, I.; PRADO-JUNIOR, J. A.; OLIVEIRA, A. P.; GUSSON, A. E. Rapid changes in tree composition and biodiversity: consequences of dams on dry seasonal forests. **Revista Chilena de História Natural**, Chile, v. 88, n. 13, p. 1-11, jun. 2015.

VAN DER SANDE, M. T.; PEÑA-CLAROS, M.; ASCARRUNZ, N.; ARETS, E. J. M. M.; LICONA, J. C.; TOLEDO, M.; POORTER, L. Abiotic and biotic drivers of biomass change in a neotropical forest. **Journal of Ecology**, London, v. 105, n. 5, p. 1223-1234, set. 2017.

VELDKAMP, E.; SCHMIDT, M.; POWERS, J. S.; CORRE, M. D. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. **Nature reviews Earth & Environment**, London, v. 1, p. 590-605, set. 2020.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

VIDAL, M. M.; PIVELLO, V. R.; MEIRELLES, S. T.; METZGER, J. P.; Produção de serapilheira em floresta atlântica secundária numa paisagem fragmentada (Ibiúna, SP): Importância da borda e tamanho dos fragmentos. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 521-532, set. 2007.

WANG, F.; DING, Y.; SAYER, E. J.; LI, Q.; ZOU, B.; MO, Q.; LI, Y.; LU, X.; TANG, J.; ZHU, W.; LI, Z. Tropical Forest restoration: Fast resilience of plant biomass contrasts with slow recovery of stable soil C stocks. **Functional Ecology**, London, v. 31, n. 12, p. 2344-2355, dez. 2017.

WIEDER, W. R.; CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R. Controls over leaf litter decomposition in wet tropical forests. **Ecology**, New York, v. 90, n. 12, p. 3333-3341, dez. 2009.

## APÊNDICES

Apêndice A – Localização e suas respectivas distâncias do centro das parcelas em relação ao reservatório.

Parcelas	Distância do reservatório (m)	SIRGAS - 2000	
		X (Long.)	Y (Lat.)
<b>Remanescente florestal</b>			
RFB01	6,92	202.735	7.729.062
RFA05	7,41	201.867	7.729.142
RFA01	8,73	201.823	7.729.068
RFB02	20,61	202.729	7.729.051
RFA06	23,55	201.884	7.729.127
RFA02	31,90	201.824	7.729.045
RFA07	59,93	201.886	7.729.085
RFB03	60,71	202.728	7.729.011
RFA03	62,72	201.823	7.729.015
RFA08	72,61	201.933	7.729.114
RFB04	78,17	202.765	7.728.984
RFA04	97,21	201.797	7.728.984
<b>Área em restauração</b>			
RD02	6,34	201.765	7.730.535
RE07	16,18	200.991	7.730.266
RD06	18,87	202.053	7.730.075
RE14	21,13	201.115	7.730.089
RE15	21,80	201.433	7.730.037
RE01	23,82	201.130	7.730.927
RD05	23,97	201.941	7.730.235
RE05	24,01	201.207	7.730.311
RE09	25,47	200.547	7.730.066
RD01	26,02	201.665	7.730.855
RE06	26,54	201.145	7.730.290
RD09	32,08	202.652	7.729.557
RE11	33,60	200.604	7.729.963
RE16	34,27	201.496	7.729.964
RD10	37,29	203.192	7.729.141
RE19	39,95	201.672	7.729.281
RE12	50,35	200.882	7.730.032
RE10	52,39	200.444	7.730.070
RE13	52,48	200.991	7.730.049
RE02	52,55	201.139	7.730.758
RD07	59,78	202.353	7.729.776
RD11	59,84	203.445	7.729.103
RD03	60,98	201.844	7.730.449
RE18	67,63	201.609	7.729.374
RE17	81,43	201.606	7.729.562
RD04	82,20	202.036	7.730.238
RE04	84,02	201.291	7.730.536
RE20	88,54	202.939	7.728.875
RD08	91,29	202.610	7.729.642
RD12	92,26	203.602	7.729.039
RE03	92,58	201.180	7.730.674
RE08	96,62	200.629	7.730.198

Apêndice B – Lista de espécies encontradas na área em restauro e nos remanescentes florestais do presente estudo, classificadas em ordem alfabética de famílias, com informações sobre suas respectivas ocorrências.

<b>FAMÍLIAS / ESPÉCIES</b>	<b>Área em restauração</b>	<b>Remanescente florestal</b>
<b>ANACARDIACEAE</b>		
<i>Astronium urundeuva</i> (M. Allemão) Engl.	X	X
<i>Lithraea molleoides</i> (Vell.) Engl.	X	
<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	X	
<i>Spondias mombin</i> L.	X	
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	X	X
<b>ANNONACEAE</b>		
<i>Annona sylvatica</i> A.St.-Hil.	X	X
<i>Xylopia aromatica</i> (Lam.) Mart.	X	X
<b>APOCYNACEAE</b>		
<i>Aspidosperma parvifolium</i> A.DC.		X
<i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.	X	
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	X	
<i>Aspidosperma</i> sp. Mart. & Zucc.		X
<i>Tabernaemontana hystrix</i> Steud.	X	
<b>ARALIACEAE</b>		
<i>Didymopanax morototoni</i> (Aubl.) Decne. & Planch.		X
<b>BIGNONIACEAE</b>		
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	X	
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	X	
<i>Jacaranda cuspidifolia</i> Mart.	X	
<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	X	
<b>BORAGINACEAE</b>		
<i>Cordia superba</i> Cham.	X	
<b>BURSERACEAE</b>		
<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand		X
<b>CALOPHYLLACEAE</b>		
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	X	
<b>CANNABACEAE</b>		
<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	X	
<b>CELASTRACEAE</b>		
<i>Monteverdia gonoclada</i> (Mart.)	X	X
<b>CHRYSOBALANACEAE</b>		
<i>Hirtella gracilipes</i> (Hook.f.) Prance		X
<b>CLUSIACEAE</b>		
<i>Garcinia gardneriana</i> (Planch. & Triana) Zappi	X	

(continua)

(continuação)

FAMÍLIAS / ESPÉCIES	Área em restauração	Remanescente florestal
<b>COMBRETACEAE</b>		
<i>Terminalia glabrescens</i> Mart.	X	X
<b>ERYTHROXYLACEAE</b>		
<i>Erythroxylum citrifolium</i> A.St.-Hil.		X
<i>Erythroxylum deciduum</i> A.St.-Hil.	X	X
<i>Erythroxylum subracemosum</i> Turcz.		X
<b>EUPHORBIACEAE</b>		
<i>Alchornea glandulosa</i> Poepp. & Endl.		X
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	X	X
<i>Croton urucurana</i> Baill.	X	
<i>Joannesia princeps</i> Vell.	X	
<b>FABACEAE</b>		
<i>Albizia niopoides</i> (Spruce ex Benth.) Burkart	X	X
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	X	
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	X	X
<i>Anadenanthera peregrina</i> var. <i>falcata</i> (Benth.) Altschul	X	
<i>Andira fraxinifolia</i> Benth.		X
<i>Cassia ferruginea</i> (Schrad.) Schrad. ex DC.	X	
<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	X	
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	X	
<i>Dipteryx alata</i> Vogel	X	
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	X	X
<i>Erythrina verna</i> Vell.	X	X
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	X	
<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	X	
<i>Inga marginata</i> Willd.		X
<i>Inga striata</i> Benth.	X	X
<i>Machaerium brasiliense</i> Vogel		X
<i>Machaerium hirtum</i> (Vell.) Stellfeld		X
<i>Myroxylon peruiferum</i> L.f.	X	
<i>Ormosia arborea</i> (Vell.) Harms	X	X
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	X	
<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.		X
<i>Platypodium elegans</i> Vogel		X
<i>Poecilanthe parviflora</i> Benth.	X	
<i>Pterocarpus rohrii</i> Vahl	X	
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	X	X
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	X	

(continua)

(continuação)

FAMÍLIAS / ESPÉCIES	Área em restauração	Remanescente florestal
<b>FABACEAE (continuação)</b>		
<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	X	X
<i>Senna pendula</i> (Humb. & Bonpl.ex Willd.) H.S.Irwin & Barneby		X
<b>LACISTEMATACEAE</b>		
<i>Lacistema hasslerianum</i> Chodat		X
<b>LAMIACEAE</b>		
<i>Aegiphila integrifolia</i> (Jacq.) Moldenke	X	
<b>LAURACEAE</b>		
<i>Endlicheria paniculata</i> (Spreng.) J.F.Macbr.		X
<i>Nectandra cissiflora</i> Nees	X	X
<b>LECYTHIDACEAE</b>		
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze		X
<b>LYTHRACEAE</b>		
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	X	
<b>MALVACEAE</b>		
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	X	
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	X	
<i>Luehea grandiflora</i> Mart. & Zucc.		X
<i>Pseudobombax grandiflorum</i> (Cav.) A.Robyns	X	
<i>Talipariti pernambucense</i> (Arruda) Bovini	X	
<b>MELASTOMATACEAE</b>		
<i>Pleroma granulorum</i> (Desr.) D. Don	X	
<b>MELIACEAE</b>		
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	X	
<i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	X	X
<i>Guarea kunthiana</i> A.Juss.	X	X
<i>Trichilia casaretti</i> C.DC.		X
<i>Trichilia catigua</i> A.Juss.	X	X
<i>Trichilia claussenii</i> C.DC.		X
<b>MONIMIACEAE</b>		
<i>Mollinedia widgrenii</i> A.DC.		X
<b>MORACEAE</b>		
<i>Ficus insipida</i> Willd.	X	
<i>Ficus</i> sp. L.	X	X

(continua)

(continuação)

FAMÍLIAS / ESPÉCIES	Área em restauração	Remanescente florestal
<b>MYRTACEAE</b>		
<i>Campomanesia guazumifolia</i> (Cambess.) O.Berg.		X
<i>Eugenia brasiliensis</i> Lam.	X	
<i>Eugenia uniflora</i> L.	X	
<i>Eugenia</i> sp. L.	X	
<i>Myrcia</i> sp. DC.		X
<i>Psidium guajava</i> L.	X	
sp. 1		X
sp. 2		X
sp. 3		X
<b>OCHNACEAE</b>		
<i>Ouratea castaneifolia</i> (DC.) Engl.		X
<b>PHYTOLACCACEAE</b>		
<i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	X	X
<b>PIPERACEAE</b>		
<i>Piper amalago</i> L.	X	X
<i>Piper gaudichaudianum</i> Kunth	X	X
<b>POLYGONACEAE</b>		
<i>Triplaris americana</i> L.	X	
<b>PRIMULACEAE</b>		
<i>Geissanthus</i> cf. <i>ambiguus</i> (Mart.) G.Agostini	X	X
<i>Myrsine umbellata</i> Mart.	X	X
<b>RHAMNACEAE</b>		
<i>Colubrina glandulosa</i> Perkins		X
<i>Rhamnidium elaeocarpum</i> Reissek	X	X
<b>RUBIACEAE</b>		
<i>Cordia macrophylla</i> (K.Schum.) Kuntze		X
<i>Cordia sessilis</i> (Vell.) Kuntze	X	
<i>Genipa americana</i> L.	X	X
<i>Psychotria carthagenensis</i> Jacq.	X	X
<i>Simira sampaioana</i> (Standl.) Steyerm.		X
<b>RUTACEAE</b>		
<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	X	
<i>Dictyoloma vandellianum</i> A. Juss.	X	
<i>Zanthoxylum acuminatum</i> (Sw.) Sw.		X
<i>Zanthoxylum riedelianum</i> Engl.	X	X
<b>SALICACEAE</b>		
<i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.		X

(continua)

(continuação)

<b>FAMÍLIAS / ESPÉCIES</b>	<b>Área em restauração</b>	<b>Remanescente florestal</b>
<b>SAPINDACEAE</b>		
<i>Allophylus racemosus</i> Sw.		X
<i>Cupania vernalis</i> Cambess.		X
<i>Dilodendron bipinnatum</i> Radlk.	X	X
<i>Sapindus saponaria</i> L.	X	
<b>SAPOTACEAE</b>		
<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Eichler ex Miq.) Engl.		X
<b>SOLANACEAE</b>		
<i>Cestrum mariquitense</i> Kunth	X	X
<b>URTICACEAE</b>		
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	X	X
<b>VERBENACEAE</b>		
<i>Aloysia virgata</i> (Ruiz & Pav.) Juss.	X	X
<b>INDETERMINADA</b>		
sp. 1		X
sp. 2		X
sp. 3		X

Apêndice C – Variação dos dados de vegetação, serapilheira e dos atributos químicos do solo do presente estudo. Onde: CV = coeficiente de variação.

Variável	Área em restauração				Remanescente florestal			
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	CV	Valor mínimo	Valor máximo	Média	CV
<b>Estrutura da vegetação</b>								
Densidade (ind./ha.)	2300	8900	4171,88	0,37	4500	8000	6066,67	0,19
DAS (cm) *	0,50	43,61	7,10	1,11	0,70	41,03	4,68	1,23
Altura (m) *	1,00	16,88	4,94	0,72	1,10	19,14	4,31	0,83
Estratificacao em altura	0,35	0,94	0,68	0,22	0,59	1,08	0,81	0,17
Área basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	20,53	55,37	36,69	0,24	13,39	42,55	26,23	0,33
Índice de volume do tronco (m <sup>3</sup> ) *	0,00003	2,56919	0,11411	2,38	0,00005	2,60132	0,06541	3,57
Serapilheira (g/0,25 m <sup>2</sup> )	150,00	266,67	218,48	0,18	198,67	245,33	224,50	0,06
<b>Atributos do solo</b>								
Argila (g/kg)	436	660	542,63	0,12	403	619	478,92	0,13
P (mg/dm <sup>3</sup> )	8	77	33,13	0,62	11	53	33,50	0,51
M.O. (g/dm <sup>3</sup> )	30	56	40,31	0,16	32	85	64,75	0,26
pH	4,60	6,50	5,38	0,09	4,70	6,20	5,80	0,10
K (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,50	8,40	2,21	0,67	2,80	8,50	5,20	0,40
Ca (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	5	87	34,50	0,62	8	128	76,33	0,56
Mg (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	6	30	14,00	0,38	9	38	25,58	0,39
H + Al (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	18	58	36,31	0,30	25	58	32,50	0,37
SB (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	11,5	117,8	50,73	0,53	20,9	171,0	107,10	0,50
CTC (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	57,60	135,80	87,04	0,22	72,4	199,0	139,60	0,30
V (%)	17	87	55,13	0,34	26	86	71,58	0,31
N total (mg.kg <sup>-1</sup> )	1351	4011	1927,63	0,26	1736	4410	3164,00	0,27
Razão N:P	20,61	227,50	86,53	0,66	50,23	215,38	117,84	0,49
Umidade (%)	13,92	19,84	17,03	0,10	17,29	23,28	19,90	0,09

\* medidas de todos os indivíduos