



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

VICTOR LUCAS MORENO DE PAULA

**RESPIRAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL E FRAGMENTOS DE MATA ATLÂNTICA NO
SUL DO BRASIL**

Londrina
2018



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA



C A P E S



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

VICTOR LUCAS MORENO DE PAULA

**RESPIRAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL E FRAGMENTOS DE MATA ATLÂNTICA NO
SUL DO BRASIL**

Londrina
2018

VICTOR LUCAS MORENO DE PAULA

**RESPIRAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL E FRAGMENTOS DE MATA ATLÂNTICA NO
SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas (Biodiversidade e Conservação de Habitats Fragmentados).

Orientador: Prof. Dr. José Marcelo Domingues Torezan.

Londrina
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

de Paula, Victor Lucas Moreno .

Respiração do solo em áreas de restauração florestal e fragmentos de Mata Atlântica no Sul do Brasil / Victor Lucas Moreno de Paula. - Londrina, 2019.

41 f. : il.

Orientador: José Marcelo Domingues Torezan.

Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, 2019. Inclui bibliografia.

1. Restauração Ecológica - Tese. 2. Ciclo de Carbono - Tese. 3. Decomposição - Tese. 4. Funcionamento do ecossistema - Tese. I. Torezan, José Marcelo Domingues . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas. III. Título.

VICTOR LUCAS MORENO DE PAULA

**RESPIRAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL E FRAGMENTOS DE MATA ATLÂNTICA NO SUL DO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas (Biodiversidade e Conservação de Habitats Fragmentados).

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Renata Stolf Moreira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Renato Marques
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Dr. Jose Marcelo Domingues Torezan
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 13 de julho de 2018

Aos meus pais e ao meu irmão, que sempre me apoiaram e incentivaram na busca pela realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. José Marcelo D. Torezan, pela paciência, ensinamentos e auxílio durante a realização deste trabalho.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante a realização do curso.

Aos professores do curso pelos ensinamentos que oportunizaram de algum modo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos e funcionários do LABRE.

Aos meus pais, Irineu de Paula e Maria Olivia Moreno A. de Paula, e irmão, Irineu Moreno de Paula, pelo amor, paciência, incentivo e apoio incondicional.

Aos colegas de laboratório pela amizade, conversas, apoio, parceria e troca de experiências e conhecimentos.

Aos meus amigos, em especial Daniela C. Rejan, Hugo Perini, Vinicius E. Vendramini. Obrigado pelo apoio não só durante o Mestrado como durante toda a graduação.

A minha namorada Mayara, por compreender a minha ausência, por me acalmar nos momentos difíceis, e por todo apoio, atenção e carinho.

À esta universidade pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação científica e crescimento pessoal. O meu muito obrigada.

“São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo o que ele ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas.”

(Patrick Rothfuss)

De Paula, Victor Lucas Moreno. **Respiração do solo em áreas de restauração florestal e fragmentos de Mata Atlântica no sul do Brasil**. 2018. 41 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

RESUMO

Além da utilização de combustíveis fósseis, o desmatamento tem contribuído com o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, sendo a principal fonte de GEE no Brasil atualmente. Com a grande quantidade de áreas degradadas, os reflorestamentos tornaram-se uma alternativa para a mitigação destas emissões, uma vez que florestas em crescimento apresentam alta capacidade de assimilar carbono através da produção primária. A presença da vegetação também acarreta a formação de uma camada de necromassa, que juntamente com a biomassa acima e no solo forma o estoque de carbono orgânico do ecossistema. A necromassa, quando decomposta, libera CO₂ para a atmosfera, que juntamente com a respiração das raízes é conhecida como “respiração do solo”. A mensuração deste fluxo de CO₂ pode informar sobre o estado do ecossistema em recuperação, refletindo tanto o metabolismo dos decompositores quanto das plantas e dos microrganismos rizosféricos. Nesse contexto este trabalho objetiva avaliar a respiração do solo, a produção e o acúmulo de serapilheira, bem como a temperatura e a umidade do solo, visando determinar diferenças entre sítios de restauração florestal e fragmentos florestais, tomados como ecossistemas de referência. O estudo foi realizado em três reflorestamentos com cerca de 15 anos e três fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual. A respiração do solo apresentou valores médios de 73,1 e 73,8 mg CO₂.m⁻².s⁻¹ nos reflorestamentos e fragmentos florestais respectivamente, sendo ligeiramente maior nos fragmentos florestais, e nos momentos de maior umidade e/ou temperatura do solo, quando se analisa as áreas em conjunto. No entanto, as variáveis determinantes para a respiração do solo foram diferentes em cada ambiente, sendo a área basal determinante em reflorestamentos enquanto umidade e temperatura do solo foram determinantes em fragmentos florestais. A contribuição da respiração autotrófica variou de 28 a 57 % nos ambientes de reflorestamento e de 27 a 36 % nos ambientes de floresta observando-se então maior contribuição da respiração autotrófica em ambientes de reflorestamento. Os resultados sugerem que a vegetação e a biota decompositora está se recuperando rapidamente nos sítios de restauração

Palavras-chave: Restauração Ecológica. Ciclo de Carbono. Decomposição. Funcionamento do ecossistema

De Paula, Victor Lucas Moreno. **Soil Respiration in forest restoration sites and Atlantic Forest fragments in Southern Brazil**. 2018. 41pp. Dissertation (Master's on Biological Sciences) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

ABSTRACT

Besides the use of fossil fuels, deforestation has contributed to the increase of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere, being the main source of GHG in Brazil nowadays. With the large number of degraded areas, reforestation has become an alternative for the mitigation of these emissions, since growing forests have a high capacity to assimilate carbon through primary production. The presence of vegetation also entails the deposition of a necromass layer which, along with below and aboveground biomass, is part of the organic carbon ecosystem stock. Necromass, when decomposed, releases CO₂ into the atmosphere, that in addition to the roots respiration is known as soil respiration. The measurement of this CO₂ flow may indicate the recovery state of the ecosystem, reflecting both decomposer and plant and rizospheric microbes metabolism. In this context, this study aims to evaluate soil respiration, litter production and accumulation, as well as soil temperature and humidity, in order to determine differences between forest restoration sites and forest fragments, taken as reference ecosystems. The study was carried out in three, 15 years old reforestations and three Atlantic Forest fragments in the north of Paraná, an area originally occupied by Semideciduous Seasonal Forest. Soil respiration mean values were 73,1 and 73,8 mg CO₂.m⁻².s⁻¹ in reforestation and forest fragments, respectively, being slightly higher in the forest fragments than in the reforestations. A difference was observed in which variables were determinant for respiration in each environment, being the biomass and the basal area important in the reforestation and the soil moisture and soil temperature were the most important variables in the forest fragments. Autotrophic contribution to soil respiration varied between 28 to 57 % in reforestation sites and from 27 to 36 % in forest fragments sites therefore contributing more to total soil respiration in reforested environments. The results suggest that the vegetation and the decomposing biota are recovering very fast in the restoration sites.

Key words: Carbon Cycle. Decomposition. Ecological Restoration. Ecosystem Function.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Áreas de estudo no entorno da cidade de Londrina. Fazenda Alvorada localizada no município de Alvorada do Sul; Fazenda Congonhas localizada no município de Rancho Alegre e Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG) localizado no município de Londrina, norte do Paraná, Brasil. Os tons de verde escuro indicam fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual. A linha azul indica o rio Paranapanema, divisa dos estados de Paraná e São Paulo (Fonte: Google Earth).14
- Figura 2** - Fragmento de floresta (FF) e reflorestamento adjacente (RF) no entorno do reservatório de Capivara, Alvorada do Sul, PR. Brasil. (Fonte: Google Earth).....15
- Figura 3** - Parque Estadual Mata dos Godoy, fragmento de floresta (FF), reflorestamento (RF) (PEMG), Londrina PR (Fonte: Google Earth).16
- Figura 4** - a. Modelo esquemático do método para amostragem da respiração do solo utilizando-se do IRGA acoplado à câmara. b. IRGA acoplado à câmara e computador pra a leitura de respiração do solo. (Fonte: O autor).....18
- Figura 5** - Modelo esquemático da obtenção da zona de exclusão de raízes. (Fonte: O autor).19
- Figura 6** - Umidade do solo em um reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, no Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-PR. (I) comparação de medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e em zona não manipulada (com presença de raízes). (II) comparação de medidas feitas em ambiente de reflorestamento e fragmento florestal. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa no teste de Kruskal-Wallis ($p= 0,001$).22
- Figura 7** - Umidade do solo em um reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e um fragmento de

Floresta Estacional Semidecidual, no Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-PR. As linhas vermelhas indicam medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e as linhas azuis medidas feitas numa zona não manipulada (com presença de raízes).23

Figura 8 - Temperatura do solo em ambientes de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual. Norte do Paraná. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis $p= 0,0000$23

Figura 9 - Respiração do solo em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, Norte do Paraná. “Zona de exclusão” indica medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e “Raízes” medidas feitas numa zona não manipulada (com presença de raízes). As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis ($p= 0,0005$).26

Figura 10 - (I.) Umidade do solo, (II.) Temperatura do solo, e (III.) Respiração do solo estimadas em ambientes de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, nas áreas de Alvorada (ALV), Congonhas (CGH) e Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG), Norte do Paraná, Brasil. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis ($p< 0,01$).27

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Medidas de temperatura e precipitação entre os meses de março e julho de 2017, para o posto meteorológico de Londrina. (Fonte: IAPAR)17
- Tabela 2** - Efluxo estimado de CO₂ do solo (mgCO₂m⁻²h⁻¹) e proporção por tipo de atividade (auto ou heterotrófica), em ambiente de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual Norte do Paraná.24
- Tabela 3** - Resultados de um modelo linear generalizado para a respiração do solo em resposta à umidade e temperatura do solo, produção e estoque de serapilheira, biomassa acima do solo e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF).25
- Tabela 4** - Coeficientes de correlação de Spearman entre a respiração do solo, umidade do solo, temperatura do solo, produção de serapilheira, estoque de serapilheira, biomassa e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF). Os asteriscos ao lado dos valores apresentados na tabela indicam diferença estatisticamente significativa a p<0.05.28

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
INTRODUÇÃO	9
MATERIAL E MÉTODOS	14
Área de estudo	14
Coleta de dados	19
Análise dos dados.....	21
RESULTADOS	22
Umidade do solo	22
Temperatura do solo	24
Respiração do solo.....	25
Correlação entre a respiração do solo e demais variáveis.....	29
DISCUSSÃO	29
CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ANEXOS	
ANEXO A – Valores de Biomassa e Área Basal (ARCANJO, 2017).	39
ANEXO B – Resultados de um modelo linear generalizado para a respiração do solo em resposta à umidade e temperatura do solo, produção e estoque de serapilheira, biomassa acima do solo e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF).	40
ANEXO C – Médias históricas de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, evaporação e insolação para as cidades de Londrina e Bela Vista do Paraíso – PR. (Fonte: IAPAR).	41

INTRODUÇÃO

Atividades como a utilização de combustíveis fósseis e remoção da cobertura vegetal original, com o objetivo de expansão das atividades agrícolas, tem contribuído com o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (BROWN; GILLESPIE; LUGO, 1989; IPCC 2007). Dentre estes gases os que mais se destacam são o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4), os quais tiveram a sua concentração na atmosfera aumentada significativamente nos últimos 40 anos. No caso do CO_2 a concentração que era de 390.5 ppm em 1975 (HARTMANN *et al.*, 2013), atualmente é estimada em 407,24 ppm, com estimativa de alcançar 700 ppm até o final do século (CHEN; HUANG; SUN, 2016; COLLINS, 2013; NOAA 2018).

Apesar do efeito estufa ser um fenômeno natural que possibilita a existência de vida na Terra através manutenção da temperatura global, (TOMMASINO; FOLADORI, 2001), dados relacionados a mudanças na composição isotópica do CO_2 atmosférico demonstram causa antropogênica para o aumento significativo da emissão de CO_2 nos últimos anos, decorrente da queima excessiva de combustíveis fósseis (IPCC, 2014; IPCC, 2001). O desmatamento associado à expansão da agricultura, contribui também para mudanças na concentração de CO_2 atmosférico (IPCC, 2014), sendo responsável nos últimos 150 anos pela liberação líquida de 121 Gt de C para a atmosfera, tornando o Brasil o maior emissor de gases do efeito estufa relacionado a mudanças no uso da terra (MACHADO, 2005).

Em função dos efeitos do aumento da concentração destes gases na atmosfera, diversos estudos têm abordado formas de capturar carbono atmosférico, como separação e captura de CO_2 por sistemas energéticos, sequestro de carbono nos oceanos, ecossistemas terrestres e formações geológicas profundas (MACHADO, 2005). Em ecossistemas terrestres isso pode ser feito através da assimilação do C em forma de matéria vegetal por meio da fotossíntese (CANADELL; RAUPACH, 2008), principalmente em ambientes tropicais, onde se estima que a produção primária corresponda a 32 % da produção global (FIELD *et al.*, 1998).

O sequestro de C por ambientes florestais em crescimento tem potencial para diminuir a concentração de carbono atmosférico, e o enriquecimento do estoque de carbono pode ser alcançado por meio de práticas como o

reflorestamento (LAL, 2005). Como em diversas regiões nos trópicos a cobertura vegetal se encontra severamente degradada, há um grande potencial para retirar carbono da atmosfera por meio da restauração ecológica, o que poderia compensar ao menos parte do carbono emitido pelo desmatamento. A Mata Atlântica brasileira, por exemplo, apresenta somente 8,5 % de área remanescente quando se leva em consideração fragmentos maiores que 100 ha, e 12,5 % quando se consideram fragmentos maiores que 3 ha (SOS MATA ATLÂNTICA, 2012), por outro lado, segundo o Pacto pela Restauração da Mata Atlântica, estima-se que existam 15 milhões de hectares de áreas degradadas passíveis de restauração em todo Brasil. Assim, a restauração florestal passou a ser uma maneira de não só melhorar as condições ambientais em escala local, mas também mitigar o aumento dos GEE na atmosfera (LOCATELLI *et al.*, 2016). Isso pode ser constatado em estudo realizado por Suganuma & Torezan (2013) onde um reflorestamento sob o domínio da Floresta Estacional Semidecidual apresentou, em apenas 5 anos, um acúmulo de biomassa de 80 Mg/ha, aproximando-se do fragmento florestal utilizado como referência (134 Mg/ha).

Uma vez que o ecossistema em restauração se desenvolve, a vegetação arbórea é restabelecida e com o tempo ocorre também o acúmulo de necromassa, que é composta por galhos, folhas, frutos e flores mortos, formando uma camada conhecida como serapilheira (KOEHLER, 1989). Esta camada é de grande importância para a manutenção do ecossistema, uma vez que contribui para a manutenção da umidade do solo, e o processo de decomposição e mineralização deste material fará com que nutrientes nela presentes retornem ao solo e possam ser absorvidos pelas plantas (FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2003), dando continuidade aos seus respectivos ciclos. Além disso, a deposição de serapilheira e o crescimento de raízes nos ecossistemas em restauração promovem mudanças na densidade aparente e na porosidade do solo, que juntamente com a deposição de matéria orgânica no solo permite que áreas antes degradadas possam se tornar mais semelhantes a áreas de floresta (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Parte do C assimilado pela produção primária é devolvido à atmosfera pelo processo conhecido como respiração do solo, que é resultado de processos como a decomposição e mineralização da matéria orgânica e a atividade da fauna do solo (processos heterotróficos) juntamente com a respiração de raízes vivas (processo autotrófico) (EDWARDS *et al.*, 1970). Enquanto os processos

heterotróficos estão ligados ao C presente no solo (necromassa) a respiração das raízes depende do consumo de componentes orgânicos disponibilizados pelas próprias plantas (HORWATH *et al.*, 1994). Desta forma, a respiração dos microorganismos associados à rizosfera pode ser considerada parte da respiração das raízes, uma vez que parte dos métodos utilizados para estimativas da respiração do solo não permitem essa diferenciação (HANSON *et al.*, 2000). Sendo assim, a respiração das raízes pode ser definida como toda respiração resultante de compostos orgânicos originados pelas plantas vivas, incluindo a respiração dos tecidos vegetais, de fungos micorrízicos e de microorganismos rizosféricos, associados aos compostos exsudados das raízes (WIANT, 1967).

A respiração do solo é considerada um dos principais componentes do ciclo global de C, e conseqüentemente pequenas mudanças neste fluxo podem ter um amplo efeito tanto nos estoques locais de carbono quanto na concentração de CO₂ na atmosfera (SCHLESINGER, 2000); evidência disto é a quantidade de C liberado do solo para a atmosfera anualmente, que seria de aproximadamente 98 petagramas (Pg) (BOND-LAMBERTY; THOMSON 2010) enquanto todo o sistema energético brasileiro emite anualmente 0,43 Pg (SEEG BRASIL, 2016) e no ano de 2017 as emissões de CO₂ por queima de combustíveis fósseis, indústria e conversão do uso da terra alcançaram $41,5 \pm 4,4$ Pg (PETERS *et al.*, 2017). Desta forma, o monitoramento da respiração do solo pode fornecer informações sobre o estado do ecossistema e ajudar na compreensão da dinâmica dos estoques de C no solo (RYAN; LAW, 2005).

A respiração do solo pode ser influenciada por diversas variáveis, como a temperatura (LLOYD; TAYLOR, 1994), a umidade do solo (DAVIDSON *et al.*, 2000) e a composição da serapilheira (RAICH; TUFEKCIOGUL, 2000), sendo, portanto, influenciada tanto pela composição da vegetação quanto por fatores climáticos. O efeito da temperatura sobre a respiração do solo pode ser abordado por duas perspectivas. Por um lado, o clima regional, incluindo as variações sazonais, determina as características do ecossistema, e por outro o microclima e variações de curto prazo exercem efeito sobre a microbiota presente no solo e o metabolismo das plantas, designando assim respectivamente os efeitos indiretos e diretos da temperatura sobre a respiração do solo (KRUSE, 2013). Estudos vêm demonstrando que o efeito da temperatura sobre a respiração do solo pode ser descrito apenas quando a interação com a umidade for incluída no modelo ou

quando as amostras avaliadas não apresentam limitação de umidade (KEITH *et al.*, 1997; KIRSCHBAUM, 2000; LLOYD; TAYLOR, 1994), uma vez que alterações no potencial de água do solo desencadeiam mudanças na resposta dinâmica da respiração (KRUSE, 2013).

Em relação à microbiota, a temperatura influencia a atividade de enzimas produzidas pelos microrganismos (KRUSE, 2013), as quais são responsáveis por despolimerizar compostos orgânicos poliméricos, produzindo monômeros solúveis assimiláveis (KRAIGHER *et al.*, 2013). Esse aumento da disponibilidade de compostos, incluindo formas de carbono orgânico dissolvido, influencia não apenas a atividade microbiana em geral, e a respiração do solo (BENGTSON; BENGTSON, 2007; KRUSE, 2013).

Nas plantas, por sua vez, há a ocorrência de um processo rápido de aclimação respiratória em resposta a flutuações na temperatura (ATKIN *et al.*, 2000; KRUSE, 2013). Kruse *et al.* (2002), em estudos com *Eucalyptus* spp. demonstraram que ocorre a aclimação respiratória que deva estar associada a um ajuste do metabolismo da planta em resposta a mudanças na temperatura, propiciando um crescimento estável. Deste modo, a aclimação da respiração da raiz apresenta-se como um fator influenciador na sensibilidade da respiração em função da temperatura (LUO *et al.*, 2001).

A umidade apresenta uma relação direta com a respiração do solo, de modo que esta diminui à medida que a umidade decai. Esta relação foi constatada em um estudo realizado por Davidson *et al.* (2000) em quatro diferentes áreas na Amazônia Oriental, sendo estas florestas primárias, secundárias, pastagens de gado ativas e pastagens de gado degradadas. Em seus resultados os autores constataram uma redução na taxa de respiração do solo da estação úmida para a estação seca em todas as áreas avaliadas.

A serapilheira representa uma fonte de energia e nutrientes os quais podem ser metabolizados pelos microrganismos presentes no solo para seu crescimento e reprodução (FANIN *et al.*, 2011). Dentro de escalas regionais (TOWNSEND *et al.*, 2007) e locais (HÄTTENSCHWILER *et al.*, 2008) pode-se observar uma ampla variação na qualidade e na composição da serapilheira, devido a mudanças na composição da vegetação, culminando em uma entrada de matéria orgânica no solo espacialmente diversificada (FANIN *et al.*, 2011). Devido à maior sobreposição de árvores, a composição e a qualidade da serapilheira em escalas

menor tende a ser mais semelhante. Estudo realizado por Fanin *et al.* (2011) na floresta amazônica demonstrou que parte da variabilidade na respiração no solo no ambiente estudado pode ser justificada pela qualidade e quantidade de serapilheira produzida pela vegetação, considerada amplamente diversa. Deste modo, o processo de respiração microbiana do solo parece apresentar uma relação estreita não só a parâmetros do solo mas também com a composição da camada serapilheira (FANIN *et al.*, 2011).

Um fator importante que deve ser considerado ao analisar a respiração do solo é a profundidade na qual esses dados estão sendo coletados no solo. Caso a produção de CO₂ ocorra a uma profundidade abaixo daquela onde a umidade e temperatura do solo estão sendo medidos, as funções baseadas nesses dois fatores pode produzir resultados inconsistentes (DAVIDSON *et al.*, 2000).

Os primeiros estudos envolvendo respiração do solo apontavam a decomposição por bactérias (respiração heterotrófica) como fonte primária de efluxo de CO₂ (TURPIN, 1920). Com o passar dos anos, estudos revelaram a importância da respiração das raízes na contribuição para a respiração do solo, de modo que em solos de floresta a respiração de autotrófica pode superar a respiração heterotrófica (ANDERSON, 1973; GARRETT; COX, 1973; REINERS, 1963). Deste modo, para o desenvolvimento de uma análise mais precisa sobre a respiração do solo é preciso avaliar tanto a respiração autotrófica quanto a heterotrófica, especialmente quando se pretende usar a respiração do solo como indicador de estado do ecossistema, por exemplo, em uma avaliação de sítios de restauração.

Entre as formas mais comuns de avaliar a restauração, especialmente em ecossistemas florestais, estão medidas de características estruturais, como a biomassa, área basal, diversidade etc. Medidas diretas de aspectos do funcionamento do ecossistema, como a fotossíntese ou a decomposição, não são comuns, por dificuldades metodológicas. No entanto, estimar a respiração do solo pode fornecer um indicador amplo de estado metabólico, tanto no que diz respeito às plantas quanto à biota decompositora. No entanto, ainda há poucos estudos para determinar padrões de comparação entre sítios em restauração de diferentes idades e ecossistemas de referência.

Neste contexto este trabalho tem como objetivos, (I) analisar se eventuais diferenças microclimáticas presentes entre reflorestamentos e fragmentos de floresta resultarão em diferenças na respiração do solo; (II) verificar como os

componentes heterotrófico e autotrófico contribuem para a respiração total do solo e (III) avaliar quais variáveis ambientais têm maior influência sobre a respiração do solo.

Para atingir estes objetivos propõe-se testar as seguintes hipóteses: quanto maiores os valores de (I) umidade e (II) temperatura do solo, (III) produção e (IV) estoque de serapilheira, (V) biomassa e (VI) área basal, maiores serão os valores de respiração do solo. E (VII) a respiração do solo será maior em ambientes de remanescentes florestais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na região de Londrina, norte do estado do Paraná, sul do Brasil, sendo duas áreas no entorno da represa de Capivara, em propriedades rurais privadas, e o Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG) (Figura 1).



Figura 1. Áreas de estudo no entorno da cidade de Londrina. Fazenda Alvorada localizada no município de Alvorada do Sul; Fazenda Congonhas localizada no município de Rancho Alegre e Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG) localizado no município de Londrina, norte do Paraná, Brasil. Os tons de verde escuro indicam fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual. A linha azul indica o rio Paranapanema, divisa dos estados de Paraná e São Paulo (Fonte: Google Earth).

A vegetação na região é originalmente classificada como Floresta Estacional Semidecidual (Torezan 2002), sendo o clima classificado como Cfa, segundo Köppen, com temperaturas moderadas e total pluviométrico anual variando entre 1400 a 1600 mm ano⁻¹ as médias históricas para a cidade de Londrina e Bela Vista do Paraíso (estação meteorológica mais próxima de ALV e CGH) são apresentadas no anexo C.

Em cada um dos três locais de amostragem há um fragmento de floresta e um sítio de restauração (reflorestamento) adjacente (Figura 2). As amostragens foram realizadas em parcelas utilizadas para amostragem da vegetação e para estimativas de biomassa, alocadas ao longo de transectos de 1000 m (ou dois de 500 m em alguns casos), mantendo-se uma distância das bordas da floresta de no mínimo 100 m (fragmentos florestais) e 50 m (reflorestamentos). A mesma distância mínima foi observada entre as parcelas



Figura 2. Fragmento de floresta (FF) e reflorestamento adjacente (RF) no entorno do reservatório de Capivara, Alvorada do Sul, PR. Brasil. (Fonte: Google Earth).

A região no entorno é predominantemente agrícola, com a presença de poucos remanescentes florestais. Os fragmentos estudados, com exceção do Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG), apresentam histórico de extração seletiva de madeira e outros impactos causados pela atividade agropecuária em seu entorno. O PEMG foi criado em 1989 pelo governo do estado do Paraná e se localiza no distrito São Luiz, pertencente ao município de Londrina. Apresenta aproximadamente 645 ha, inseridos em uma mancha de 2800 ha de floresta em

graus variados de conservação (VICENTE, 2006) (Figura 3). No caso dos dois fragmentos amostrados em áreas privadas a extração de madeira ocorreu, segundo entrevistas com moradores locais, entre 1975 e 1985.

Os reflorestamentos nas fazendas Congonhas e Alvorada eram anteriormente áreas agrícolas ocupadas com rotação entre as culturas de soja e milho por mais de 20 anos. O reflorestamento do Parque Estadual Mata dos Godoy está numa área que foi um cafezal, por cerca de 40 anos. Após a remoção dos pés de café, em 1991-1992, a área foi abandonada, sendo invadida por gramíneas, até o plantio do reflorestamento em 2002. Todos os reflorestamentos apresentavam idade entre 12 e 15 anos desde o plantio das mudas até o momento da amostragem. Tais reflorestamentos foram feitos utilizando-se espécies arbóreas nativas da região, com predomínio de espécies pioneiras, e um espaçamento entre as mudas de 3x2 m.

Este estudo faz parte do programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD) Mata Atlântica do Norte do Paraná.

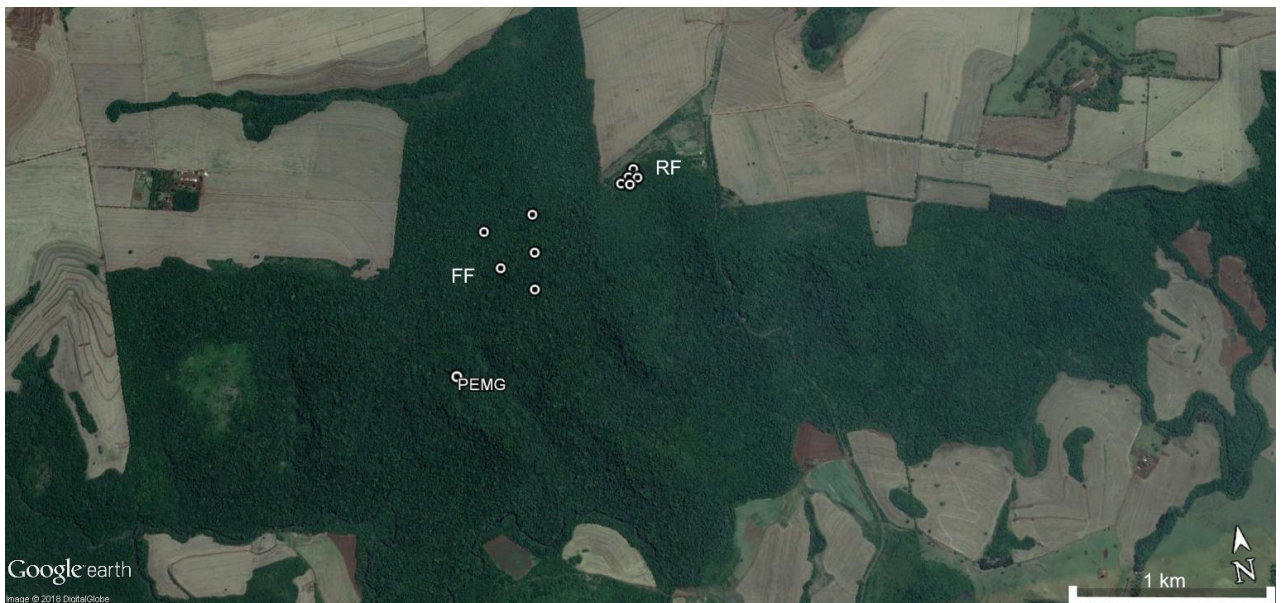


Figura 3. Parque Estadual Mata dos Godoy, fragmento de floresta (FF), reflorestamento (RF) (PEMG), Londrina PR (Fonte: Google Earth).

Coleta de dados

As variáveis avaliadas foram a respiração do solo; umidade e temperatura do solo; produção mensal de serapilheira e massa (estoque) de serapilheira sobre o solo. As amostragens foram realizadas quinzenalmente no

período de março a julho de 2017, totalizando-se sete amostras. Durante este período as temperaturas médias mensais variaram entre 24,1 a 15,5 °C, e a precipitação variou entre 222 a 107 mm, com exceção do mês de julho, em que não houve precipitação (Tabela 1).

Tabela 1. Medidas de temperatura e precipitação entre os meses de março e julho de 2017, para o posto meteorológico de Londrina. (Fonte: IAPAR)

	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Precipitação Média (mm)
Março	33,8	15,0	24,1	222,9
Abril	28,8	14,5	21,7	139,6
Mai	29,0	13,4	19,3	222,6
Junho	27,8	8,6	12,7	107,2
Julho	25,0	11,2	15,5	0,0

A respiração do solo foi amostrada com o leitor de gases a infravermelho (IRGA) Licor Li840A, acoplado a uma câmara de PVC com volume interno de 1,1L, colocada sobre o solo e conectada ao IRGA em sistema fechado para a amostragem do acúmulo de CO₂ e posterior estimativa da respiração do solo (DAVIDSON 2002) (Figura 4).

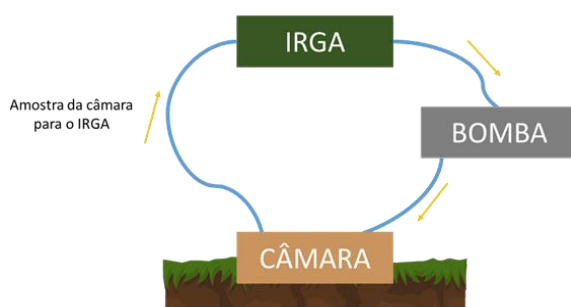


Figura 4. a. Modelo esquemático do método para amostragem da respiração do solo utilizando-se do IRGA acoplado à câmara. b. IRGA acoplado à câmara e computador pra a leitura de respiração do solo. (Fonte: O autor).

Neste sistema foi registrada a concentração de CO₂, em partes por milhão (*ppm*), a cada segundo, sendo posteriormente feita uma regressão linear da concentração de CO₂ em função do tempo (em *ppm* por segundo) e calculada a respiração do solo de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Respiração do solo (m}^2 \times \text{h)} = \frac{a}{1000000} \times n \times \frac{1}{\text{área da câmara}} \times 12000 \times 3600, \text{ onde:}$$

a = constante de interceptação da reta de regressão com o eixo vertical

n = número de mols de CO₂ na amostra, calculado pela equação de estado do gás ideal:

$$n = \frac{PV}{RT} n = \frac{PV}{RT}$$

12000 = fator de conversão de mg de carbono por mol de CO₂

3600 = valor referente à conversão de 1h em segundos

Área da câmara = calculada por $\pi \times r^2$

O fluxo de CO₂ foi mensurado em cada local e cada ambiente (reflorestamento ou fragmento florestal) em cinco pontos, correspondentes às parcelas ímpares do inventário de biomassa. Em cada um destes cinco pontos foi determinado um ponto de medida de fluxo livre de interferência e um ponto, distante 1,5 a 2 m do primeiro, onde foi estabelecida uma zona de exclusão de raízes. A zona de exclusão de raízes foi criada utilizando-se uma tela de poliamida com malha de abertura constante de 25 μm com o objetivo de impedir o restabelecimento de raízes no ponto amostrado, mas permitindo a passagem de água e da microbiota. A malha foi costurada na forma de sacos, de 0,25 por 0,50 m. Para a obtenção da área de exclusão de raízes foi utilizado um tubo de PVC e foram retiradas amostras cilíndricas indeformadas de solo de 0,25 m de diâmetro por aproximadamente 0,5 m de altura, que foram alocadas dentro dos sacos de poliamida e devolvidos ao solo, criando-se assim a área de exclusão de raízes (Figura 5). O início das coletas se deu após três meses após a instalação das zonas de exclusão, para que o solo se estabilizasse e houvesse a decomposição das raízes seccionadas.

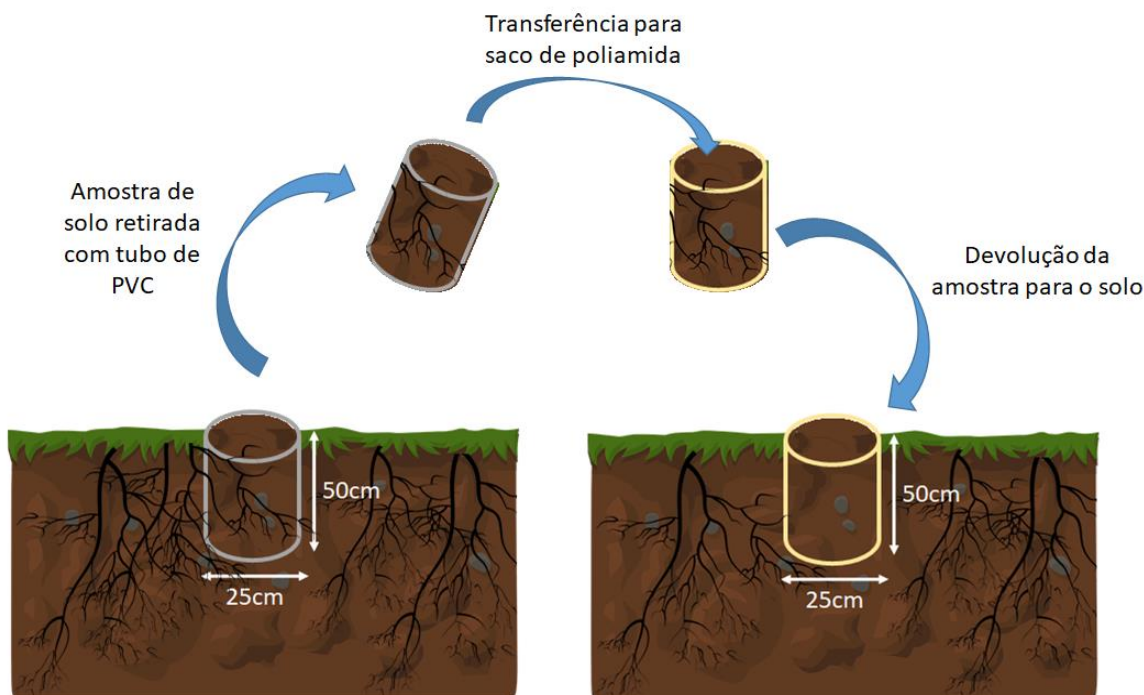


Figura 5. Modelo esquemático da obtenção da zona de exclusão de raízes. (Fonte: O autor).

A umidade e a temperatura do solo foram medidas tanto no interior da área de exclusão de raízes como na área não manipulada. A umidade foi obtida com medidor Field Scout TDR100 Soil e a temperatura com termômetro portátil Hanna HI 93532R com sensor do tipo termopar, ambos a 5 cm de profundidade no solo.

Apenas no PEMG foram instaladas 6 micro estações Onset Hobo H21-003, para a obtenção dos dados de umidade (com sensores S-SMC5) e temperatura do solo S-TMB-M017 de hora em hora.

Para a produção de serapilheira foram instalados coletores de 1m^2 situados a 0,5m do solo e a 1-2m de distância dos pontos de medida de fluxo, sendo coletada a serapilheira acumulada sobre os coletores a cada 30 dias. Quanto à serapilheira acumulada sobre o solo, foi utilizado um gabarito de $0,5\text{ m}^2$ que era colocado sobre o solo dentro da parcela e coletada toda a serapilheira acumulada, sendo posteriormente estas amostras secas em estufa até peso constante, e pesadas em balança semi-analítica. Este procedimento foi repetido a cada

amostragem de fluxo de CO₂, sempre em pontos alternados e distantes até 2 m dos pontos de medida de fluxo.

Além destas variáveis estimadas em campo foram utilizados parâmetros para a avaliação da vegetação local como dados de biomassa acima do solo e área basal das parcelas do programa PELD, obtidas por trabalhos realizados pelo mesmo grupo de pesquisa (Anexo A: ARCANJO, 2017). A estimativa da biomassa acima do solo foi obtida através da utilização de fórmulas alométricas obtidas por Chave et al (2005) que levam em consideração as medidas da altura e diâmetro das árvores a 1,30 m de altura juntamente com a densidade da madeira.

Análise dos dados

Para a comparação das variáveis entre as diferentes áreas (Fazenda Alvorada, ALV; Fazenda Congonhas, CGH e Parque Estadual Mata dos Godoy, PEMG) e diferentes ambientes (reflorestamento e fragmento de floresta) foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal Wallis, considerando-se os cinco pontos por área/ambiente como repetições.

A estimativa da proporção da respiração autotrófica foi obtida a partir da subtração da respiração total (área não manipulada) pela respiração heterotrófica (área de exclusão de raízes) e então calculada a proporção da respiração autotrófica estimada sobre a respiração total.

Foram calculados coeficientes de correlação de Spearman para determinar a influência da temperatura, umidade, produção (massa de serapilheira em gramas por mês por m²) e estoque de serapilheira (massa de serapilheira em g por m²), biomassa (em Mg por ha) e área basal (em m² por ha) sobre o efluxo de CO₂ do solo. Foram utilizados modelos lineares generalizados (GLM) para se determinar quais dos fatores considerados no estudo têm maior influência e serviriam, portanto, como melhores preditores para a respiração do solo. Para selecionar o melhor modelo foram selecionados os fatores que obtiveram maior significância de acordo com o valor de p e o maior valor do R² do modelo. Os dados apresentaram distribuição sigma.

RESULTADOS

Umidade do solo

A umidade foi mais alta na zona de exclusão de raízes do que nos pontos sem manipulação no decorrer de todo o período avaliado, tanto em reflorestamento quanto em ambiente de floresta (Kruskal-Wallis $p= 0,00001$; Figura 6 a). O mesmo foi observado nas leituras realizadas de hora em hora nos ambientes de reflorestamento e floresta coletados no PEMG, utilizando micro estações hobo (Figura 7), onde pode-se observar picos de umidade nos períodos de chuva seguidos de decréscimo da umidade do solo com o passar do tempo para ambos os tratamentos (com e sem zona de exclusão) nos dois ambientes avaliados (reflorestamento e floresta), sendo os valores observados sempre mais elevados na zona de exclusão de raízes (Figuras 6).

Foi observada também diferença na umidade do solo entre os fragmentos florestais e reflorestamentos (Figura 5 b), de modo que a umidade se apresentou mais alta nos reflorestamentos (Kruskal-Wallis $p= 0,001$), algo possivelmente relacionado com uma maior densidade de plantas na floresta, culminando em uma maior quantidade de raízes neste ambiente, as quais utilizam-se mais rapidamente da umidade disponível no solo quando comparada ao reflorestamento, em uma época com chuvas constantes. Em medidas realizadas durante a estação seca pela mesma equipe (dados não apresentados) o padrão foi inverso.

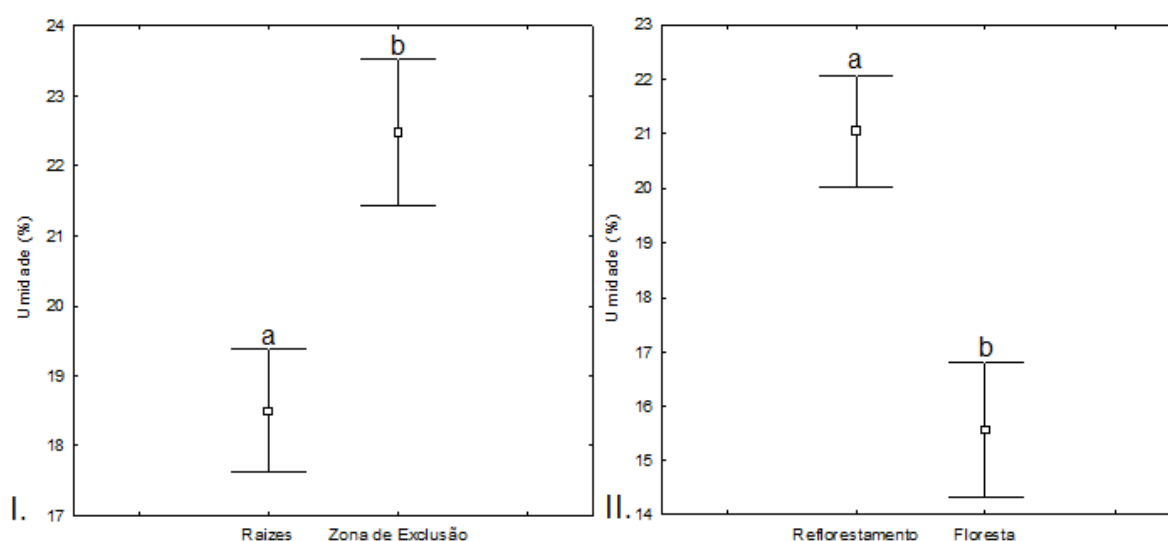


Figura 6. Umidade do solo em um reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, no Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-PR. (I) comparação de medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e em zona não manipulada (com presença de raízes). (II) comparação de medidas feitas em ambiente de reflorestamento e fragmento florestal. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa no teste de Kruskal-Wallis ($p=0,0017$).

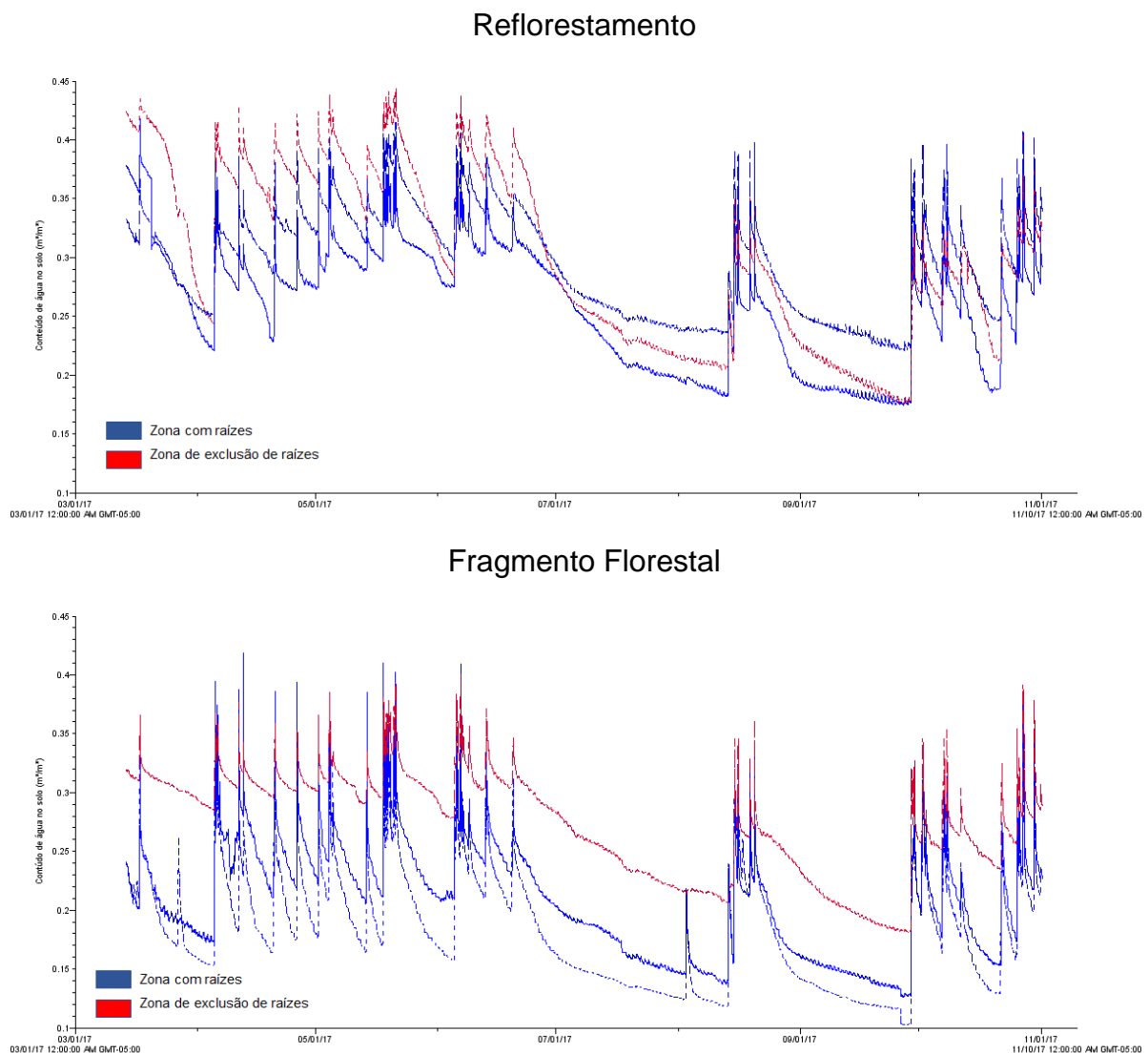


Figura 7. Umidade do solo em um reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, no Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-PR. As linhas vermelhas indicam

medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e as linhas azuis medidas feitas numa zona não manipulada (com presença de raízes).

Temperatura do solo

Pode-se constatar temperatura do solo mais elevada (Kruskal-Wallis $p= 0,0000$), de aproximadamente $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, nos ambientes de reflorestamento (Figura 8) comparado à floresta.

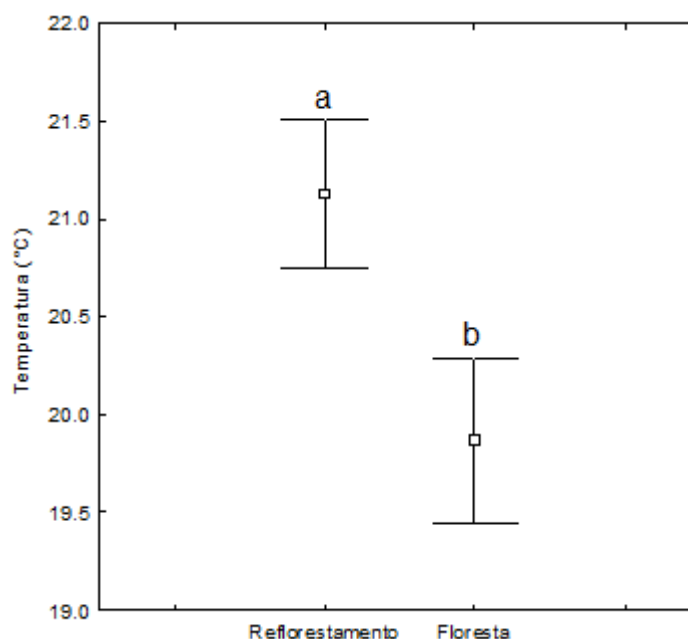


Figura 8. Temperatura do solo em ambientes de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual. Norte do Paraná. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis $p= 0,0000$.

Respiração do solo

A respiração do solo variou de $4,2$ a $278,3\text{ mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, com valores médios de $73,1$ e $73,8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ nos reflorestamentos e fragmentos florestais respectivamente. Os menores valores foram observados no reflorestamento ALV e os maiores no fragmento florestal CGH (Tabela 2). Houve uma variação de 28 a 57 % na contribuição da respiração autotrófica nos ambientes de reflorestamento e de 27 a 36 % nos ambientes de floresta (o que equivale a uma variação da respiração heterotrófica de 43 a 72 % a 64 a 73 %, respectivamente, nos ambientes de reflorestamento e floresta).

Tabela 2. Efluxo estimado de CO₂ do solo (mg.m⁻².h⁻¹) e proporção por tipo de atividade (auto ou heterotrófica), em ambiente de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual Norte do Paraná.

	Reflorestamento			Floresta		
	ALV	CGH	PEMG	ALV	CGH	PEMG
Autotrófica (%)	57,3	28,6	31,5	36,1	27,7	27,7
Média	54,8	99,1	65,4	55,7	80,9	84,9
Mínima	4,2	30,7	31,4	23,3	11,3	28,3
Máxima	132,7	278,3	172,0	96,4	174,3	171,6

Não é observada diferença significativa entre os ambientes de reflorestamento e fragmento de floresta, tanto se tomadas as três áreas em conjunto (Kruskal-Wallis $p= 0,1437$) como cada área separadamente. No entanto, a variância associada aos demais fatores, como a umidade, temperatura e a biomassa está incluída nesta comparação, dificultando a discriminação da variância associada ao tipo de ambiente. Para verificar o efeito do ambiente e dos demais fatores conjuntamente foram produzidos modelos lineares generalizados utilizando-se as variáveis umidade e temperatura do solo, estoque e produção de serapilheira, biomassa acima do solo, área basal e ambiente. O modelo que melhor explicou as variações na respiração do solo incluiu apenas a umidade, a temperatura do solo (que influenciaram positivamente a respiração) e o ambiente (com maiores valores no fragmento; Tabela 3). Os modelos rejeitados são apresentados no anexo B.

Tabela 3. Resultados de um modelo linear generalizado para a respiração do solo em resposta à umidade e temperatura do solo, produção e estoque de serapilheira, biomassa acima do solo e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF).

	GS	MS	F	p
Intersecção	1	23382,68	21,67246	0,000006
Umidade (%)	1	41262,66	38,2447	0,000019
Temperatura (°C)	1	52307,68	48,48188	0,000000

Ambiente	1	20664,76	19,15333	0,00002
Erro	192	1078,91		

Quando comparada a respiração do solo entre as zonas com e sem exclusão de raízes, a respiração demonstrou-se mais elevada na zona sem exclusão de raízes (Kruskal-Wallis $p= 0,0000$), tanto em ambiente de reflorestamento como em ambientes de floresta (Figura 9).

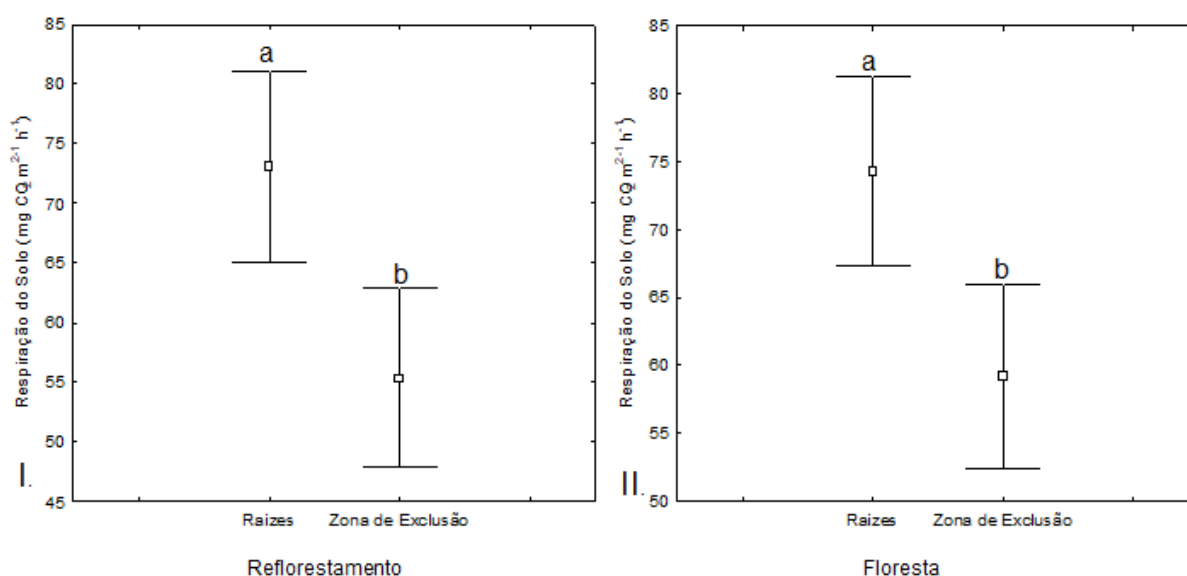


Figura 9. Respiração do solo em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, Norte do Paraná. “Zona de exclusão” indica medidas feitas em uma zona de exclusão de raízes (ver texto) e “Raízes” medidas feitas numa zona não manipulada (com presença de raízes). As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis ($p= 0,0005$).

Ao comparar a umidade, a temperatura e a respiração do solo entre as áreas de estudo (Figura 10), pode-se observar que houve diferença estatística (Kruskal-Wallis $p < 0,01$) para todas estas variáveis entre as áreas estudadas, sendo que a umidade do solo apresentou maior variação entre os ambientes florestais, sendo mais elevada no PEMG e menor em ALV. A temperatura do solo variou menos, enquanto a respiração do solo em ambientes de reflorestamento teve

maiores valores em CGH. Em ambientes de floresta a respiração do solo foi menor em ALV e maior em CGH e no PEMG.

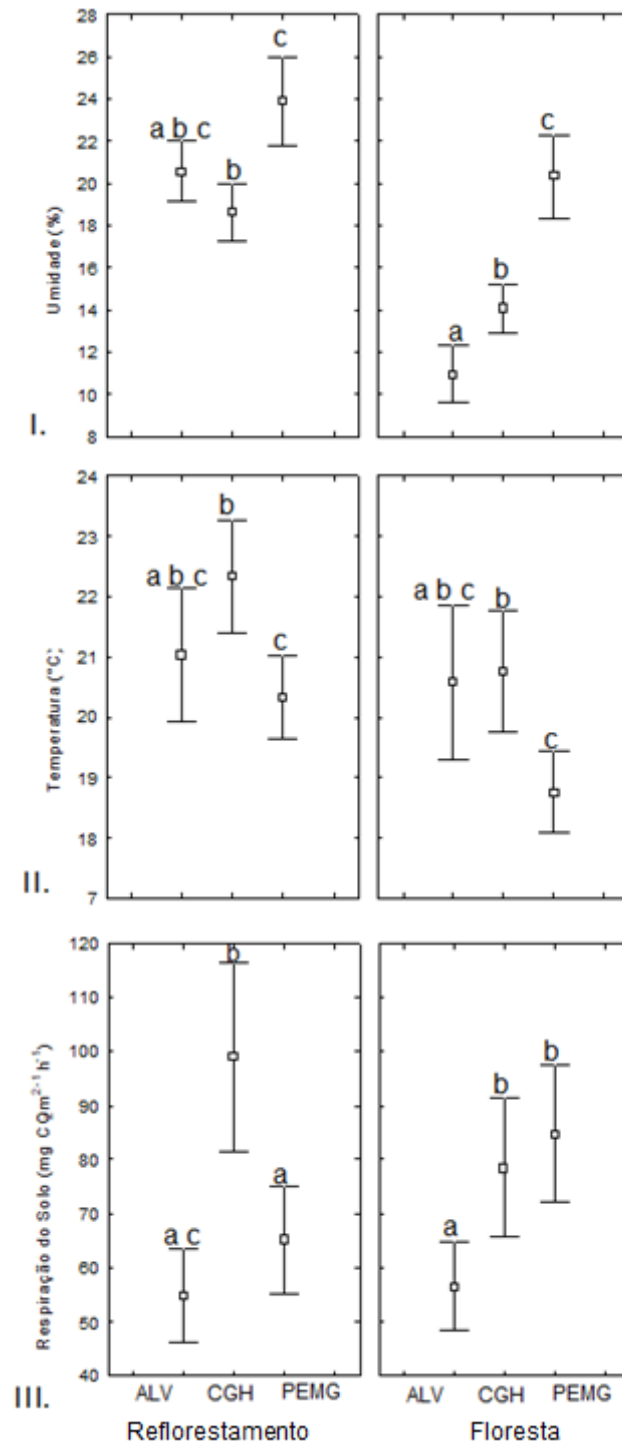


Figura 10. (I.) Umidade do solo, (II.) Temperatura do solo, e (III.) Respiração do solo estimadas em ambientes de reflorestamento com espécies nativas de 15 anos (no momento da amostragem) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, nas áreas de Alvorada (ALV), Congonhas (CGH) e Parque Estadual Mata dos Godoy

(PEMG), Norte do Paraná, Brasil. As diferentes letras minúsculas sobre as barras indicam diferença estatisticamente significativa em teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,01$).

Correlação entre a respiração do solo e as demais variáveis

A respiração do solo, quando considerados em conjunto os dados obtidos em ambientes de fragmento florestal e reflorestamento mostrou correlação positiva com a umidade, temperatura, biomassa e área basal, e correlação negativa com o estoque de serapilheira sobre o solo. Entretanto, quando analisados separadamente os dados obtidos nos dois tipos de ambiente, a respiração do solo mostrou correlação positiva com a umidade e a temperatura do solo apenas em fragmentos florestais. Nos reflorestamentos, a respiração mostrou correlação positiva com a biomassa e a área basal e negativa com o estoque de serapilheira (Tabela 4).

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Spearman entre a respiração do solo, umidade do solo, temperatura do solo, produção de serapilheira, estoque de serapilheira, biomassa e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF). Os asteriscos ao lado dos valores apresentados na tabela indicam diferença estatisticamente significativa a $p < 0.05$.

Variável / Ambiente	RF & FF	RF	FF
Umidade do solo. (%)	0,12*	0,12	0,23*
Temperatura do solo(°C)	0,15*	0,09	0,26*
Produção de serapilheira (g)	-0,07	-0,11	0
Estoque de serapilheira (g)	-0,12*	-0,16*	-0,08
Biomassa florestal (Mg/ha)	0,12*	0,23*	-0,07
Área Basal (m ² /ha)	0,11*	0,20*	0

DISCUSSÃO

A umidade do solo mais alta na zona de exclusão de raízes pode ser explicada pela ausência de consumo por parte de raízes, combinada a uma provável baixa velocidade de difusão horizontal da água causada pela textura argilosa do solo (REINERT; REICHERT, 2006), resultando assim em uma umidade do solo

constantemente mais elevada na zona de exclusão, o que ocorreu tanto no ambiente de reflorestamento como no ambiente de floresta. A diferença da umidade do solo entre os tratamentos (com e sem raízes) foi significativa estatisticamente, da ordem de cerca de 4 %. A umidade do solo foi cerca de 3 % mais alta nos ambientes de reflorestamento, provavelmente em função da menor taxa de colonização de raízes (por sua vez resultado da menor densidade de plantas) neste ambiente quando em comparação à floresta. É válido ressaltar que a ausência das raízes devido à zona de exclusão fez com que a diferença da umidade do solo fosse mais pronunciada nos ambientes de floresta, indicando que a influência das raízes na umidade do solo é maior neste ambiente. A variação na umidade do solo entre as áreas foi maior entre os fragmentos florestais, se mantendo mais homogênea entre os reflorestamentos, sendo que entre os fragmentos florestais os maiores valores foram observados no PEMG.

A variação de temperatura, em torno de 1,4 °C entre reflorestamento e floresta pode ser devida à estrutura mais aberta do ambiente de reflorestamento, resultando em uma maior incidência de radiação solar sobre o solo.

Os fatores mais importantes para explicar as variações na respiração do solo foram o ambiente (sendo a respiração maior no fragmento), a umidade e a temperatura do solo (que influenciaram positivamente a respiração). Embora o efluxo de CO₂ seja mais intenso nos fragmentos florestais, a forte influência da umidade e da temperatura faz com que os valores de ambos os ambientes oscilem em intervalos próximos. Assim, a respiração do solo sofre pouca diferenciação entre fragmento e reflorestamento, indicando um rápido desenvolvimento tanto da vegetação quanto da biota decompositora no sítio de restauração.

A diferença na respiração entre os diferentes locais pode ser explicada pelas variações na umidade e na temperatura do solo, bem como no estoque de serapilheira, na biomassa acima do solo e na área basal. Assim, os valores elevados da respiração do solo no reflorestamento em CGH ocorreram em função da maior biomassa. Arcanjo (2017) estimou a biomassa aérea nesta área em 119,6 Mg/ha, enquanto a estimativa em ALV era de 44,7 Mg/ha (anexo A). Esta ligação entre a respiração e a biomassa da vegetação é evidenciada também quando se analisa a proporção da respiração heterotrófica sobre a respiração total

do solo que chega a 57 % no reflorestamento em ALV (anexo A), enquanto em ambientes de floresta essa proporção varia entre 27 e 36%.

Já nos ambientes de floresta a respiração do solo apresentou correlação com a umidade e com a temperatura do solo, o que contribui para explicar também os valores mais baixos da respiração do solo serem observados justamente no fragmento florestal em ALV, onde a umidade do solo também se mostrou menor. Essa correlação direta entre umidade e respiração do solo foi evidenciada por Davidson *et al.* (2000), que reportaram uma redução na taxa de respiração do solo da estação úmida para a estação seca em quatro diferentes áreas na Amazônia Oriental (incluindo florestas primárias, secundárias, pastagens ativas e pastagens degradadas). A menor proporção da respiração autotrófica do solo em ambientes de floresta (27 a 36%) juntamente com a maior correlação da respiração com a umidade e temperatura do solo podem indicar que nestes ambientes a respiração total do solo é determinada principalmente pela atividade de microorganismos (BENGTSON; BENGTSON, 2007; KRAIGHER *et al.*, 2013; KRUSE, 2013), indicando assim uma mudança na forma como os componentes da respiração do solo contribuem com a respiração total, de acordo com a integridade ou com o estágio sucessional do ambiente.

Resultados semelhantes foram apresentados por Butler *et al.* (2011), que demonstraram que em áreas de cerrado a variação da umidade do solo entre as estações, e não a estrutura da vegetação, influenciou o fluxo de CO₂, sendo a respiração maior na estação chuvosa. Raich e Tufekciogul (2000) também afirmam não haver uma previsibilidade quanto a diferenças na respiração do solo quando se compara áreas com diferentes tipos de vegetação, afirmando que os fatores mais que mais influenciam a respiração do solo são a temperatura, a umidade e propriedades do solo (como a granulometria) que agem sobre a produção e o consumo de carbono orgânico presente no solo. No entanto, os autores também sugerem que a vegetação presente em determinado local pode influenciar a respiração do solo devido à sua capacidade de moldar o microclima e a estrutura do ambiente juntamente com a quantidade e a qualidade de matéria orgânica que fornece.

Os valores de efluxo de CO₂ obtidos neste trabalho são inferiores aos constatados em outros estudos realizados no Brasil, realizados em ambientes mais quentes, como o Cerrado, e mais úmidos, como florestas na Amazônia, com

valores reportados em torno de 200 a 300 mg C m⁻².h⁻¹ durante o período chuvoso (Davidson *et al.*, 2002) contra 73,8 mg C m⁻².h⁻¹ médios para fragmentos florestais registrados neste trabalho. Como este trabalho teve início ao final da estação quente e chuvosa, é possível que valores maiores sejam observados durante a estação chuvosa.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que apesar dos fatores microclimáticos variarem entre os ambientes, a respiração do solo apresentou pequena diferença entre fragmentos florestais e reflorestamentos adjacentes com 12 a 15 anos de idade, sugerindo um rápido desenvolvimento da vegetação e da biota decompositora nestes ambientes. Os reflorestamentos apresentaram maior contribuição da respiração autotrófica sobre a respiração total do que o observado nos fragmentos. As variáveis que tiveram influência sobre a respiração do solo foram diferentes em cada ambiente, sendo a biomassa e área basal as que influenciaram positivamente a respiração do solo nos reflorestamentos, e a umidade e temperatura as que influenciaram a respiração do solo nas florestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J. M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils. **J. Appl. Ecol.**, v. 10, p. 361–378, 1973.
- ARCANJO, F. A. **Biomassa arbórea em sítios de restauração e remanescentes de Mata Atlântica do Sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Biológicas, 2017.
- ATKIN, O. K., EDWARDS, E. J., LOVEYS, B. R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. **New Phytol.** v. 147, p. 141–154, 2000.
- BENGTSON, P., BENGTSON, G. Rapid turnover of DOC in temperate forests accounts for increased CO₂-production at elevated temperatures. **Ecol. Lett.**, v. 10, p. 783–790, 2007.
- BOND-LAMBERTY, B.; THOMSON, A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. **Nature**, v. 464, n. 7288, p. 579–582, 2010.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. **Society**, v. 35, n. 4, p. 881–902, 1989.
- CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R. Managing forests for climate change mitigation. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1456–1457, 2008.
- CHEN, Y.; HUANG, Y.; SUN, W.-J. Using Organic Matter and pH to Estimate the Bulk Density of Afforested/ Reforested Soils in Northwest and Northeast China. **Pedosphere**, v. 0160, 2017.
- COLLINS, M.R., KNUTTI, R., ARBLASTER, J., DUFRESNE, J.L., FICHEFET, T., FRIEDLINGSTEIN, P., GAO, X., GUTOWSKI, W.J., JOHNS, T., KRINNER, G., SHONGWE, M., TEBALDI, C., WEAVER, A.J., WEHNER, M. IN: STOCKER, T.F., QIN, D., PLATTNER, K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J.,

- NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V., MIDGLEY, P.M. (EDS.). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. **Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, capítulo 12, p. 1-108, 2013.
- DAVIDSON, E. A. et al. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1–4, p. 21–37, 2002.
- EDWARDS, C. A.; REICHLER, D. E., CROSSLEY, D. A. Jr. **The role of soil invertebrates in turnover of organic matter and nutrients.** In: Reichle DE (Eds) **Analysis of Temperate Forest Ecosystem.** Springer-Verlag, New York, 1970.
- FANIN, N.; HÄTTENSCHWILER, S.; BARANTAL, S.; SCHIMANN, H.; FROMIN, NATHALIE. Does variability in litter quality determine soil microbial respiration in a Amazonian rainforest? **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, p. 1014-1022, 2011.
- FIELD, C. B.; BEHRENFELD, M. J.; RANDERSON, J. T.; FALKOWSKI, P. Primary Production of the Biosphere: **Integrating Terrestrial and Oceanic Components.** v. 281, n. 5374, p. 237–240, 2011.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; MORAES, G.F.; SCHAAF, L.B.; FIGUEIREDO, D.J. Avaliação estacional da deposição de serapilheira em uma floresta ombrófila mista localizada no sul do Estado do Paraná. **Ciência Florestal**, v.13, p.11-18, 2003.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica período 2012-2013: Relatório técnico.** p. 1-61, 2014. Disponível em:< http://mapas.sosma.org.br/site_media/download/atlas_2012-2013_relatorio_tecnico_2014.pdf >. Acesso em: 17/05/2018.

- GARRETT, H. E.; COX, G. S. Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 37, p. 641–644, 1973.
- GEIGER, R. Classificação climática de Köppen- Geiger. **Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported**, p. 1–7, 1936.
- HARTMANN, D. L. et al. Observations: Atmosphere and surface. **Climate Change 2013: the Physical Science Basis: Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, v. 9781107057, p. 159–254, 2013.
- HÄTTENSCHWILER, S.; AESCHLIMANN, B.; COÛTEAUX, M. M.; ROY, J.; BONAL, D. High variation in foliage and leaf litter chemistry among 45 tree species of a neotropical rainforest community. **New Phytologist**, v. 179, 165-175., 2008.
- HORWATH, W. R.; PREGITZER, K. S.; PAUL, E. A. 14C allocation in tree-soil systems. **Tree Physiol**, v. 14, p. 1163–1176, 1994.
- IPCC. **Sumário do Relatório do IPCC para tomadores de decisão – WGII AR5**. Iniciativa Verde, 2014.
- IPCC. HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; van der LINDER, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. Climate change 2001: The scientific basis. **Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 1-881, 2001.
- KOEHLER, W. C. **Variação estacional de deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na Região de Ponta Grossa – PR**. . 138 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.
- KÖEPPEN, W. **Climatologia**. 1948. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/55213396/KOEPPEN-1948-Climatologia-Con-un-estudio-de-los-climas-de-la-Tierra>>. Acesso em: 21 Jun 2016.
- KRAIGHER, H.; BAJC, M.; GREBENC, T. Mycorrhizosphere complexity. **Dev. Environ. Sci.** v. 13, p. 151–177, 2013.

- KRUSE, J.; SIMON, J.; RENNENBERG, H. Soil respiration and soil organic matter decomposition in response to climate change. **Development in Environmental Science**, v. 13, p. 131-149, 2013.
- LAL, R. Forest soil and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 242-258, 2005.
- LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, v. 8, n. 3, p. 315-323, 1994.
- LOCATELLI, B. et al. Tropical reforestation and climate change: Beyond carbon. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 4, p. 337–343, 2015.
- LUO, Y., WAN, S., HUI, D., WALLACE, L.L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. **Nature**, v. 413, p. 622–625, 2001.
- MACHADO, P.L.O.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329 – 334, 2005.
- NOAA. **Global Greenhouse Gas Reference Network**. Earth system research laboratory: Global monitoring division. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>>. Acesso em: 17/05/2018.
- NOAA. Global greenhouse gas reference. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gl_data.html>. Acesso em: 17/05/2018.
- PETERS, G. P.; QUÉRÉ, C. L.; ANDREW, R. M.; ANADELL, J. G.; FRIEDLINGSTEIN, P.; ILYINA, T.; JACKSON, R. B.; JOOS, F.; KORSBAKKEN, J. I.; MCKINLEY, G. A.; STICH, S.; TANS, P. Toward real-time verification of CO₂ emissions. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 848-852, 2017.
- POORTER, L. et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, v. 530, n. 7589, p. 211–214, 2016.
- RAICH, J. W.; TUFEKCIÖGÜL, A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [review]. **Biogeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 71–90, 2000.

- REINERS, W. A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. **Ecology**, v. 49, p. 471–483, 1968.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. 2006. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__texto.pdf>. Acesso em: 20/06/2018.
- RODRIGUES JUNIOR N.L. *et al.* Soil dynamics and carbon stocks 10 years after restoration of degraded land using Atlantic Forest tree species. **Forest Systems, [S.l.]**, v. 20, n. 3, p. 536-545, 2011.
- RYAN, M. G.; LAW, B. E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, v. 73, n. 1, p. 3–27, 2005.
- SALIMON, C. I. **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Ocidental**, Acre. Tese (Doutorado em Ciências-Energia Nuclear na Agricultura) - Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2003.
- SCHLESINGER, W.; ANDREWS, J. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 7–20, 2000.
- SEEG Brasil, 2016. System Study Greenhouse Gas Emissions Estimates (SEEG). Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>. Acesso em: 02/07/2018.
- SUGANUMA, M. S.; TOREZAN, J. M. D. Evolução dos processos ecossistêmicos em reflorestamentos da Floresta Estacional Semidecídua. **Hoenea**, v. 40, n. 3, p. 557–565, 2013.
- TOMMASINO, H.; FOLADORI, G. (Un)certainities on the environmental crisis. **Ambiente & Sociedade**, n. 8, 2001.

- TOREZAN, J.M.D. (2002). **Nota sobre a vegetação da bacia do rio Tibagi**. Pages 103-107 In: MEDRI, M.E.; BIANCHINI, E.; SHIBATTA, O.A.; PIMENTA, J.A. (Eds.), A bacia do rio Tibagi, Londrina.
- TOWNSEND, A. R.; CLEVELAND, C. C.; ASNER, G. P.; BUSTAMANTE, M. M. C. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. **Ecology**, v. 88, p. 107-118, 2007.
- TURPIN, H. W. The carbon dioxide of the soil air. **Cornell University Agr. Exp. Sta., Memoir**, v. 32, p. 315–362, 1920.
- VICENTE, R. F. O Parque Estadual Mata dos Godoy. In: TOREZAN, J. M. D. (Org.) **Ecologia do Parque Estadual Mata dos Godoy**. Londrina: ITEDES, 2006. p.13-18.
- WIANT, H. V. Contribution of roots to forest soil respiration. **Adv. Front. Plant Sci**, v. 18, p. 163– 167, 1967.

ANEXOS

ANEXO A – Valores de Biomassa e Área Basal (ARCANJO, 2017).

Alvorada FR	Área basal total	Equação floresta seca
PONTO	AB (m ² .ha ⁻¹)	BAS Mg/ha ⁻¹ TOTAL (seca)
1	16,0	88,3
3	43,8	189,6
5	36,8	205,3
7	14,5	66,5
9	90,3	450,2

Alvorada RF		
PONTO	AB (m ² .ha ⁻¹)	BAS Mg/ha ⁻¹ TOTAL
1	37,0	96,6
3	8,6	27,8
5	15,7	51,0
7	22,1	71,7
9	27,9	87,6

Congonhas FR		
PONTO	AB (m ² .ha ⁻¹)	BAS Mg/ha ⁻¹ TOTAL (seca)
1	71,2	409,5
3	28,1	121,7
5	25,2	84,2
7	17,3	49,2
9	32,5	166,4

Congonhas RF			
PONTO	AB (m ² .ha ⁻¹)	BAS Mg/ha ⁻¹	TOTAL
1	22,9		54,5
3	20,2		64,4
5	54,3		231,8
7	45,1		210,5
9	16,8		73,7

PEMGFR			
PONTO	AB (m ² .ha ⁻¹)	BAS Mg/ha ⁻¹	TOTAL (seca)
1	14,9		49,8
3	212,8		1181,7
5	31,9		147,4
7	26,7		110,2
9	83,0		392,5

ANEXO B – Resultados de um modelo linear generalizado para a respiração do solo em resposta à umidade e temperatura do solo, produção e estoque de serapilheira, biomassa acima do solo e área basal em reflorestamentos com espécies nativas de 15 anos (RF) e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FF)

	GS	MS	F	p
Intersecção	1	5288,54	4,59667	0,034924
Umidade (%)	1	39549,43	34,37541	0
Temperatura (°C)	1	19831,44	17,23701	0,000079
Prod. serapilheira (g)	1	3020,43	2,62529	0,108922
Estoque serapilheira (g)	1	12005,17	10,4346	0,001766
Biomassa (mg/há)	1	282,32	0,24539	0,621634
Área basal (m ² /h)	1	600,7	0,52211	0,471949
Ambiente	1	5696,55	4,95139	0,02875
Erro	84	1150,52		

ANEXO C – Médias históricas de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, evaporação e insolação para as cidades de Londrina e Bela Vista do Paraíso – PR. (Fonte: IAPAR)

LONDRINA														
MES	TEMPERATURA DO AR (.c)						U.REL		PRECIPITACAO			EVAPOR.		INSOL.
	média máxima	média mínima	máxima abs	ano	min abs	ano	média comp	média %	total	máxima 24h	ano	dias chuva	total mm	total horas
JAN	29,5	19,6	36,4	1993	11,0	1980	23,9	76	221,5	223,6	2016	16	105,3	203,7
FEV	29,9	19,7	38,0	2014	12,2	1987	24,0	76	188,6	93,6	1993	14	93,6	191,6
MAR	29,6	18,8	37,0	2005	7,0	1987	23,5	73	135,8	124,6	1992	12	115,5	220,8
ABR	27,9	16,7	34,9	2016	3,8	1999	21,7	71	112,1	151,2	1984	8	109,3	227,4
MAI	24,4	13,6	32,0	2001	0,0	1979	18,3	74	119,5	87,6	2016	8	90,4	211,9
JUN	23,0	12,0	30,3	2002	-1,0	1994	16,9	75	95,7	200,5	2012	8	78,7	204,4
JUL	23,5	11,6	31,2	1977	-1,3	2000	17,0	70	73,1	91,8	2015	6	103,7	228,7
AGO	25,9	12,9	34,8	1994	0,6	1984	18,9	62	51,6	62,5	1986	6	145,2	240,6
SET	26,8	14,6	37,5	1988	1,9	2002	20,2	63	116,8	82,8	1998	9	151,5	205,5
OUT	28,7	16,8	38,5	2014	8,0	1981	22,2	66	150,6	106,4	1994	10	157,0	220,7
NOV	29,3	17,9	39,2	1985	9,8	1976	23,1	67	167,7	142,7	1992	11	148,4	226,2
DEZ	29,5	19,2	36,4	1985	12,0	2001	23,8	73	207,8	117,1	1989	14	124,5	213,3
ANO	27,3	16,1					21,1	70,5	1641			122	1423	2595

ANEXO C – Médias históricas de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, evaporação e insolação para as cidades de Londrina e Bela Vista do Paraíso – PR. (continuação) (Fonte: IAPAR)

BELA VISTA DO PARAÍSO															
MES	TEMPERATURA DO AR (.c)					U.REL		PRECIPITACAO			EVAPOR.		INSOL.		
	média maxima	média minima	máxima abs	ano	min abs	ano	média comp	média %	total	máxima 24h	ano	dias chuva	total mm	total horas	
JAN	29,2	20,0	36,0	1993	11,6	1972	23,9	77	221,9	122,4	1994	15	75,7	203,2	
FEV	29,5	20,2	37,4	2014	12,6	1990	24,1	76	163,4	102,2	1980	13	71,6	192,2	
MAR	29,4	19,5	38,4	2005	9,7	1987	23,7	72	132,8	141,0	1996	11	87,4	219,7	
ABR	27,6	17,7	34,6	2005	4,2	1999	21,9	71	97,9	132,4	1999	7	86,1	226,6	
MAI	24,1	15,0	32,0	2005	1,4	1979	18,8	73	108,1	109,4	2005	8	72,7	213,0	
JUN	23,0	13,8	29,8	2010	0,4	1994	17,7	73	87,8	230,8	2012	7	66,4	203,4	
JUL	23,4	13,4	31,4	2006	-2,0	1975	17,7	67	66,8	80,0	2007	5	88,3	226,5	
AGO	25,8	14,5	34,6	2011	1,0	1972	19,5	60	45,6	78,8	1972	5	119,6	236,2	
SET	26,5	15,4	37,2	1988	1,0	1972	20,4	64	110,2	76,0	1999	8	113,5	199,7	
OUT	28,4	17,3	38,6	2012	7,8	1981	22,3	66	144,3	96,2	1975	10	114,3	219,7	
NOV	29,0	18,3	38,6	1985	10,4	1979	23,2	67	159,3	119,4	1985	10	103,8	225,3	
DEZ	29,1	19,5	36,8	2012	12,8	1982	23,7	74	191,2	110,0	1984	13	86,8	214,2	
ANO	27,1	17,1					21,4	69,9	1529			112	1086	2580	