

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

MARINA CONTE PELUCI

**Dinâmica do carbono e nitrogênio ao longo de uma sequência cronológica
de florestas secundárias na bacia do rio Corumbataí**

**Piracicaba
2017**

MARINA CONTE PELUCI

**Dinâmica do carbono e nitrogênio ao longo de uma sequência cronológica
de florestas secundárias na bacia do rio Corumbataí**

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

**Dissertação apresentada ao Centro de Energia
Nuclear na Agricultura da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Ciências**

**Área de Concentração: Química na Agricultura e
no Ambiente**

**Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marisa de Cássia
Piccolo**

Piracicaba

2017

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Peluci, Marina Conte

Dinâmica do carbono e nitrogênio ao longo de uma sequência cronológica de florestas secundárias na bacia do rio Corumbataí / Marina Conte Peluci; orientadora Marisa de Cássia Piccolo. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

90 p.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1 Carbono 13 2. Ciclo do carbono 3. Ciclo do nitrogênio 4. Florestas tropicais 5. Pastagens 6. Solo 7. Uso do solo I. Título

CDU 631.416/.417 : 630*231

*A meus pais,
por me mostrarem o caminho
e me apoiarem em segui-lo
com força e determinação,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família e aos meus pais (Lilian e Antonio), que sempre acreditaram em meu potencial e me deram forças para continuar em frente e nunca desistir. Sem vocês eu nada seria. Muito obrigada por tanto amor, carinho e paciência.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Marisa de Cássia Piccolo pela oportunidade em realizar este mestrado e por todas as recomendações.

Ao Prof. Dr. Pedro Brancalion por ter me proporcionado o primeiro contato com os estudos florestais, pelo apoio quanto às análises e pela orientação e importantes sugestões.

Ao Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli pela valiosa orientação e força, tanto na qualificação quanto na dissertação.

Ao colega Ricardo César Gomes, por toda ajuda, desde a concepção do projeto de pesquisa até a finalização da dissertação. Sem sua ajuda não conseguiria ter finalizado as tão difíceis e pesadas coletas!

Aos meus amigos que me deram uma enorme ajuda nas coletas, obrigada pelo companheirismo, pela disponibilidade e força de vontade! Vocês foram essenciais nas coletas, Nina, Karmen, Tropi, Kika, To-Indo, Cesinha, Alex, Wanderley, Adibe e Vanessa, muito obrigada de coração!

Ao Prof. Dr. Tiago Osório, pelas críticas e sugestões na qualificação e pelo apoio nas análises de solo.

Ao Prof. Carlos Tadeu dos Santos Dias e ao Prof. Gabriel Adrián Sarriés, pela ajuda essencial na realização e interpretação das análises estatísticas.

Ao Rossi, pela disponibilidade e pelo apoio na realização das análises físicas de solo.

À Comissão de Pós Graduação pela atenção e disponibilidade em me auxiliar sempre que precisei. E também à Seção da Biblioteca, em especial à Marília pela correção deste trabalho e pelas dicas.

Ao CENA/USP pela oportunidade que me foi oferecida e ao CNPq pela concessão da bolsa, me permitindo focar todo meu tempo ao mestrado.

Às minhas amadas e queridas amigas (e amigo) da Gaiola das Lokas, por todos os momentos que passamos juntas e por tanto carinho e parceria! Quero vocês por perto para sempre.

À minha confidente/conselheira/parceira Shaxahmary muito obrigada de coração por estar sempre tão presente nos meus dias! Agradeço pelas Marias, Rucas, Gramadões, viagens e todos os nossos momentinhos juntas! Juntas somos mais fortes!!

Aos meus amigos de vivência, Cesinha e Meds, morar com vocês é incrível, obrigada por tantos conselhos e por me darem forças nos momentos difíceis! Bora juntos nessa caminhada pelo mundo!

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Ecologia Isotópica e Ciclagem de Nutrientes (Rodrigo, Ju, Adibe, Lucas, Wanderley, George, Cris, Siglea e Gabi) pela troca de experiências e conversas, muito obrigada pessoal! Vocês com certeza enriqueceram este trabalho!

Agradeço imensamente à querida Siglea pelas tantas dicas, correções e aprendizado dividido, você é um exemplo de mulher, mana!

Ao Marcos Siqueira Neto, pela ajuda no entendimento dos cálculos dos estoques e conselhos sobre a vida acadêmica.

Ao Guilherme pela ajuda no preparo das amostras, nas análises isotópicas, na logística das coletas e pelo bate papo sempre alto astral!

Aos tão prestativos e queridos Toninha, Fá e Geraldo, muito obrigada pela ajuda e apoio em todas as ocasiões, a ciência precisa de pessoas maravilhosas como vocês!

E todos aqueles que de alguma forma me ajudaram na realização deste trabalho.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

*“Quem não se movimenta não sente
as correntes que o prendem”*

Rosa Luxemburgo

RESUMO

PELUCI, M. C. **Dinâmica do carbono e nitrogênio ao longo de uma sequência cronológica de florestas secundárias na bacia do rio Corumbataí.** 2017. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

As mudanças no uso do solo, como por exemplo a remoção de áreas florestais para a implantação da agricultura e pecuária, promovem alterações no teor de matéria orgânica do solo. Em contrapartida, a regeneração natural surge como uma possibilidade do reestabelecimento parcial de funções ecológicas importantes, com destaque para o papel das florestas secundárias na redução do fluxo de gases atmosféricos, na influência da qualidade e quantidade da água, e no sequestro de carbono da atmosfera e estocagem no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento do carbono e do nitrogênio no solo ao longo da sequência cronológica de florestas secundárias, comparando-as com floresta madura e pastagens no município de Rio Claro (SP). Com o auxílio de imagens aéreas (dos anos de 1978, 1995, 2000 e 2008) foram selecionadas 15 parcelas com 900 m² cada, as quais consistiram em uma sequência temporal de florestas secundárias regeneradas sob pastagem (apresentando 8 a 16 anos (FS12), 21 a 38 anos (FS30) e 38 a 54 anos (FS46)), além de floresta “fonte” (floresta estacional semidecidual) com mais de 55 anos (FF) e pastagem em uso há mais de 50 anos (PA50). O solo da área de estudo é classificado como Argissolo de textura média. As concentrações e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) e os valores isotópicos de C ($\delta^{13}\text{C}$) foram analisados na serapilheira e nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo. A análise de $\delta^{13}\text{C}$ indicou presença do sinal isotópico oriundo de vegetação C₃ já nos primeiros 12 anos de regeneração, representando 60% do C presente no solo (proveniente da FF e da FS12). Na área de pastagem foi constatada a presença de carbono remanescente da floresta nativa (C₃), correspondendo por 30% do carbono total. A análise de componentes principais definiu os agrupamentos de acordo com as áreas de estudo, além de correlacionar negativamente os estoques de carbono e nitrogênio e os teores de areia. As florestas secundárias apresentaram estoques de carbono e nitrogênio na serapilheira próximos à floresta fonte (1,8 Mg C ha⁻¹ e 0,10 Mg N ha⁻¹). Os estoques de C e N no solo (0-30 cm) foram maiores na floresta fonte (74,1 Mg C ha⁻¹ e 7,6 Mg N ha⁻¹), ocorrendo brusca redução (40%) na conversão para pastagem (41,4 Mg C ha⁻¹ e 4,7 Mg N ha⁻¹). Além disso, as áreas de regeneração não diferiram da área de pastagem quanto aos estoques de carbono e nitrogênio no solo.

Palavras-chave: Carbono 13. Ciclo do carbono. Ciclo do nitrogênio. Florestas tropicais. Pastagens. Solo. Uso do solo

ABSTRACT

PELUCI, M. C. **Carbon and nitrogen dynamics along a chronological sequence of secondary forests in the Corumbatai river basin.** 2017. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

Changes in soil use, such as the removal of forest areas for the implantation of agriculture and livestock, promote changes in soil organic matter content. Due to this imbalance between the inputs and outputs of plant material in the system the MOS dynamics will be changed, affecting the ecosystem as a whole. On the other hand, natural regeneration appears as a possibility for the partial reestablishment of important ecological functions, with emphasis on the role of secondary forests in the reduction of the flow of atmospheric gases, the influence of water quality and quantity, and sequestration of carbon from the atmosphere and storage in the soil. The objective of this work was to evaluate the behavior of carbon and nitrogen in the soil along the chronological sequence of secondary forests, comparing them with old growth forest and pastures in Rio Claro (SP). Fifteen plots with 900 m² each were selected using aerial images (from 1978, 1995, 2000 and 2008), which consisted of a temporal sequence of regenerated secondary forests under pasture (8 to 16 years old (FS12) 21 to 38 years old (FS30) and 38 to 54 years old (FS46)), as well as an old growth forest (seasonal semideciduous forest) with more than 55 years (FF) and pasture in use for more than 50 years (PA50). The soil of the study area is classified as Argissolo. with medium texture. The concentrations and stocks of carbon (C) and nitrogen (N) and the isotopic values of C ($\delta^{13}\text{C}$) were analyzed in the litter and in the layers of 0-10, 10-20 and 20-30 cm of the soil. The analysis of $\delta^{13}\text{C}$ indicated the presence of the isotopic signal from C₃ vegetation already in the first 12 years of regeneration, representing 60% of the C present in the soil (coming from FF and FS12). In the pasture area, the remaining carbon of the native forest (C₃) was observed, corresponding to 30% of the total carbon. The principal components analysis defined the groupings according to the study areas, in addition to negatively correlating the carbon and nitrogen stocks and the sand contents. Secondary forests presented carbon and nitrogen stocks in the litter approximate to the old growth forest (1,8 Mg C ha⁻¹ and 0,10 Mg N ha⁻¹). C and N stocks in the soil (0-30 cm) were higher in the old growth forest (74,1 Mg C ha⁻¹ and 7,6 Mg N ha⁻¹), with an abrupt reduction (40%) in conversion to pasture (41,4 Mg C ha⁻¹ and 4,7 Mg N ha⁻¹). In addition, the regeneration areas did not differ from the pasture area for carbon and nitrogen stocks in the soil.

Keywords: Carbon 13. Carbon cycle. Nitrogen cycle. Tropical forests. Grassland. Soil. Soil use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição e composição das florestas nas diferentes regiões do mundo	24
Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do rio Corumbataí no estado de São Paulo	35
Figura 3. Precipitação anual (mm) no município de Rio Claro (SP) nos anos entre 1995 e 2015	36
Figura 4. Climograma do município de Rio Claro (SP) no período de junho de 2015 a junho de 2016 (período no qual foram realizadas as coletas)	37
Figura 5. Mapa de Solos da bacia do rio Corumbataí (SP), segundo a classificação de solos (EMBRAPA, 1999). A área delimitada pelo quadrado em branco refere-se à localização das parcelas estudadas, a partir da inserção das coordenadas geográficas no programa Google Earth.....	38
Figura 6. Mapa de Uso de Solo da bacia do rio Corumbataí no ano de 2001	40
Figura 7. Esquema da sequência temporal avaliada neste estudo	41
Figura 8. Imagens aéreas do fragmento florestal em estudo (Rio Claro – SP) referentes aos anos de 1962, 1978, 1995, 2000 e 2008, nas quais é possível observar no ano de 1978 a diminuição em área do fragmento e em 1995, 2000 e 2008 o aumento da área.....	42
Figura 9. Áreas de floresta fonte (FF), pastagem (PA50) e florestas secundárias (FS12, FS30 e FS46) estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP).....	44
Figura 10. Distribuição das parcelas no fragmento florestal. Legenda amarela: FF (floresta fonte); roxa: PA50 (pastagem 50 anos); azul: FS12 (floresta secundária com 8-16 anos); rosa: FS30 (floresta secundária com 21-38 anos); e laranja: FS46 (floresta secundária com 38-54 anos).....	45
Figura 11. Correlação entre os teores de silte e argila das amostras de solo para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	49
Figura 12. Estoque da biomassa da serapilheira ($Mg\ ha^{-1}$) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	56
Figura 13. Estoque de carbono ($Mg\ ha^{-1}$) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	59
Figura 14. Estoque de nitrogênio ($Mg\ ha^{-1}$) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	60
Figura 15. Estoques de carbono ($Mg\ ha^{-1}$) na camada total (0 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	67
Figura 16. Estoques de nitrogênio ($Mg\ ha^{-1}$) na camada total (0 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	67

Figura 17. Abundância natural de ^{13}C na serapilheira e no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)..... 69

Figura 18. Diagrama da análise de componentes principais para os atributos do solo nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP) obtido com auxílio do programa SAS 9.3..... 73

Figura 19. Dendrograma obtido através da análise de agrupamento realizada no programa SAS 9.3 .. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização das áreas de estudo, com as parcelas correspondentes, na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	43
Tabela 2. Análise granulométrica no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP).....	46
Tabela 3. Análises físico-química no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	47
Tabela 4. Teores de carbono e nitrogênio (g kg^{-1}), relação C/N e abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	57
Tabela 5. Teores de hemicelulose, celulose e lignina (g kg^{-1}) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	61
Tabela 6. Teores de carbono e nitrogênio (g kg^{-1}) e relação C/N no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	62
Tabela 7. Densidade do solo (g cm^{-3}) para as diferentes camadas (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP).....	64
Tabela 8. Estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm), para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	66
Tabela 9. Contribuição das vegetações C_3 e C_4 quanto ao carbono total para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1. Florestas primárias e secundárias	23
2.2. Produção e decomposição da serapilheira	25
2.3. Ciclagem de carbono e nitrogênio em solos florestais	27
2.4. Estoques de carbono e nitrogênio na vegetação e no solo.....	28
2.5. Abundância natural de C ($\delta^{13}\text{C}$) e sua aplicação em estudos ambientais	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Localização da área de estudo	35
3.2. Caracterização da bacia do rio Corumbataí (SP).....	35
3.3. Análises químicas	51
3.4. Análise estatística	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. Caracterização da serapilheira	55
4.2. Análise do solo	62
4.3. Análise multivariada.....	72
5. CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICES	89

1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica, formação vegetal que abrange diversos tipos de ecossistemas tropicais e apresenta enorme biodiversidade e endemismo, tem sido desmatada ao longo do tempo pela expansão das atividades agrícolas, principalmente cultivos de cana de açúcar, café, algodão, pastagens, e ainda pela pressão exercida pela urbanização e estabelecimento de grandes cidades. De sua área inicial, aproximadamente 148 milhões ha, restam apenas 12,4% de área atualmente recoberta pela vegetação original (cerca de 16 milhões ha), a qual se distribui em diversos fragmentos, com diferentes tamanhos e estados de conservação, sendo por isso um dos biomas mais ameaçados do mundo (RIBEIRO et al., 2009; SOS MATA ATLÂNTICA, 2017). Restringindo ao estado de São Paulo, restam 16,3% da área original, correspondendo a 2 milhões de hectares (SOS MATA ATLÂNTICA, 2017).

A mudança no uso do solo pode levar a alterações significativas na matéria orgânica do solo, modificando sua dinâmica e as entradas e saídas de nutrientes no sistema, sendo estabelecido assim um novo equilíbrio, o que afeta a disponibilidade e a qualidade de recursos naturais disponíveis (BASILE, 2001; ROSOLEN et al., 2012; VALENTE, 2001).

As florestas secundárias surgem como uma alternativa promissora para a recuperação e conservação dos ecossistemas naturais. Após uma modificação (distúrbio natural ou antrópico) na área florestal, o processo de regeneração natural permite a recolonização gradual das espécies vegetais até o estabelecimento de uma floresta em estágio sucessional mais avançado, com estrutura e riqueza de espécies semelhantes às da floresta nativa (CHAZDON, 2008).

A regeneração permite, em alguns casos, o reestabelecimento parcial de funções ecológicas muito importantes, entre elas: a atuação do solo como reservatório do carbono atmosférico, pelo processo da fotossíntese; e a conservação dos nutrientes através da transferência dos nutrientes do solo para o material vegetal, tornando estes nutrientes menos vulneráveis à erosão e lixiviação. O nitrogênio é um elemento essencial ao processo de regeneração natural, sendo o nutriente mais limitante nas etapas iniciais da sucessão secundária de florestas tropicais (AMAZONAS et al., 2011; DAVIDSON et al., 2007). O conhecimento da ciclagem de carbono e nitrogênio nas florestas secundárias é de extrema importância quando se tem como objetivo a recuperação de áreas degradadas a partir da conservação e regeneração de áreas anteriormente recobertas por floresta (DIAS-FILHO, 2011; FELDPAUSCH et al., 2004).

Neste contexto, as hipóteses deste estudo foram: (i) o estabelecimento de florestas secundárias, em área precedida por pastagem, favorece o aumento dos estoques de carbono e nitrogênio no solo; (ii) fragmentos florestais em estádios mais avançados de regeneração apresentam melhorias na condição do solo.

E para testar essa hipótese o objetivo desta pesquisa foi avaliar a dinâmica do C e N no solo ao longo da sequência cronológica de florestas secundárias, comparando-as com floresta madura e pastagens que sucederam a regeneração no município de Rio Claro (SP). A sequência temporal floresta-pastagem-regeneração natural com diferentes idades foi analisada a partir dos seguintes objetivos específicos: (1) Quantificar os teores de carbono e nitrogênio no solo e na serapilheira; (2) Determinar os estoques de carbono e nitrogênio na serapilheira e no solo; (3) Comparar a abundância natural de C ($\delta^{13}\text{C}$) da serapilheira e do solo; (4) Determinar a origem do carbono presente na matéria orgânica do solo com a avaliação da abundância natural de ^{13}C .

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Florestas primárias e secundárias

A demanda por maiores áreas para a produção agrícola e pecuária tem causado o desmatamento de milhares de hectares de florestas primárias em todo o mundo, o que afeta diretamente a biodiversidade e desequilibra os fluxos de CO₂ e O₂ para a atmosfera, resultando no aquecimento global e nas mudanças climáticas. Frente a este panorama, diversos estudos florestais têm buscado uma maneira de reverter esta realidade, buscando a interrupção do desmatamento e a regeneração e restauração das florestas.

As florestas podem ser classificadas em primária, definida como “a vegetação caracterizada como de máxima expressão local, com grande diversidade biológica, sendo os efeitos das ações antrópicas mínimos, a ponto de não afetar significativamente suas características originais de estrutura e de espécies”; e em floresta secundária, sendo classificada como “a vegetação resultante de processos naturais de regeneração, após remoção total ou parcial de vegetação primária por ações antrópicas ou causas naturais, podendo ocorrer árvores remanescentes de vegetação primária” (BRASIL, 1994a).

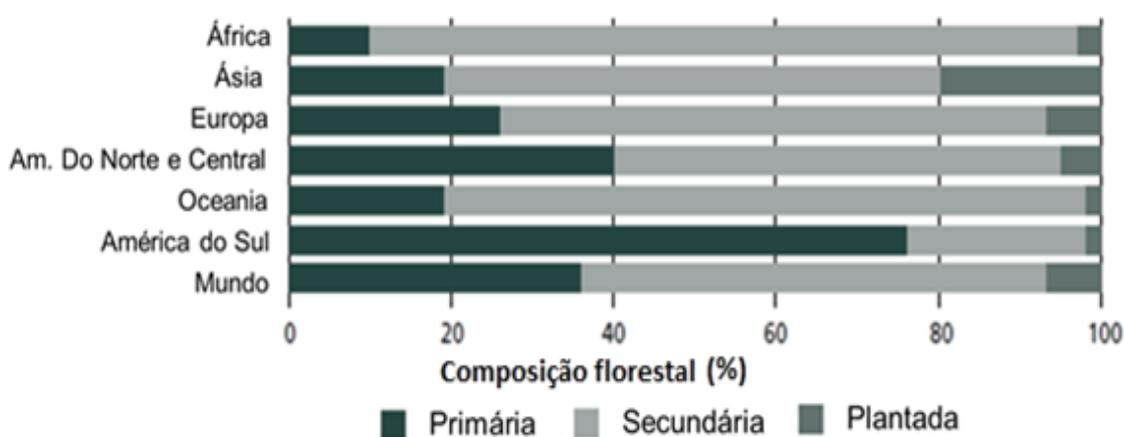
O processo de formação das florestas secundárias é denominado regeneração natural, tendo início após a ocorrência de um distúrbio (antrópico ou natural, como terremotos, incêndio causado por raios, derrubamento de árvores devido a tempestades, entre outros) na floresta primária, resultando na abertura de clareiras, as quais serão recolonizadas pela vegetação, iniciando o processo as espécies herbáceas, seguida pelas arbustivas e por fim as arbóreas, resultando após determinado tempo em uma floresta secundária com estrutura e riqueza de espécies semelhantes às da floresta primária. Desta maneira ocorrerá o reestabelecimento parcial de funções ecológicas importantes, como redução no fluxo dos gases atmosféricos, influência na qualidade e quantidade da água, diminuição do efeito estufa, entre outros (BOENI, 2016; CHAZDON, 2008; PUIG, 2005).

A manutenção das florestas, tanto as primárias quanto as secundárias, garante maior biodiversidade e abundância de espécies, e ainda propicia maior dinâmica e aporte de nutrientes ao solo via decomposição da serapilheira. Além disso, as florestas atuam como reservatório do CO₂ atmosférico, fixando este no solo e liberando para atmosfera o O₂, minimizando assim o desequilíbrio entre estes gases gerado principalmente pelo desmatamento e pela queima de combustíveis fósseis (NEUMANN-COSEL et al., 2010; SANTANA; SOUTO, 2011).

Atualmente as florestas ocupam 31% da área total do globo, o que corresponde a 4 bilhões de hectares. Deste total, pouco mais da metade (57%) está em processo de regeneração natural, enquanto que as florestas primárias representam 36% e as florestas plantadas 7%, conforme observado na Figura 1 (FAO, 2015).

Na Amazônia, entre 30 e 50% das áreas que foram anteriormente desmatadas para expansão da agricultura e pecuária estão hoje em processo de regeneração natural, em torno de 172 mil km² (DAVIDSON et al., 2007; INPE, 2012; NUNES, 2011).

Figura 1. Distribuição e composição das florestas nas diferentes regiões do mundo



Fonte: FAO, 2015

No caso da regeneração ocorrer em áreas anteriormente recobertas por pastagens o processo de retorno da vegetação e das condições ambientais demanda um maior período de tempo quando comparada à regeneração ocorrida após agricultura ou distúrbios naturais. Tal fato pode ser explicado pela falta de propágulos florestais e banco de sementes, pela predação de sementes e plântulas, pela degradação dos solos e ainda competição com gramíneas e espécies herbáceas já estabelecidas (AIDE et al., 1995; FEARNSIDE et al., 1996).

Logo, no atual cenário de aumento da emissão de CO₂ para a atmosfera e aceleração do aquecimento global, as florestas passam a ter maior destaque e importância por realizarem o serviço ecossistêmico de sumidouro de carbono, sendo este removido da atmosfera e estocado no solo e na vegetação, auxiliando assim na redução do efeito estufa e salientando ainda mais a necessidade iminente de recuperação dos ecossistemas florestais (MELO; DURIGAN, 2006; TELLES et al., 2003).

Entre os anos de 1750 e 2011 as emissões de CO₂ somaram 2035 Gt, emissões estas geradas por atividades como queima de combustíveis fósseis, produção de cimento e alteração no uso da terra. Desse total, 43% foram acumulados na atmosfera, 28% nos oceanos e 29% em ecossistemas terrestres naturais, sendo acumulados no solo, portanto, mais de 160 Gt de carbono. Sem esta transferência do carbono da atmosfera para o solo a concentração de CO₂ atmosférico atingiria valores ainda mais elevados, intensificando assim o aquecimento global e suas consequências. Mesmo o ecossistema natural terrestre não sendo o maior reservatório para acúmulo deste carbono, este pode ser alterado diretamente pela influência das atividades humanas por ser potencialmente mais lábil do que os outros reservatórios (BATJES, 1996; CANADELL et al., 2007; LE QUÉRÉ et al., 2015; SCHMALENSEE et al., 1998).

O entendimento dos fluxos e padrões do processo de regeneração natural vem ganhando destaque inclusive quanto à questão econômica, uma vez que a regeneração natural surge como um mecanismo efetivo de recuperação das florestas e manutenção da biodiversidade em que não ocorre a demanda de investimentos, resolvendo uma das maiores dificuldades encontradas nas atividades de restauração florestal que é o elevado investimento necessário para a implantação e a manutenção destas áreas (AIDE et al., 1995; CHAZDON et al., 2016; FEHSE et al., 2002; SILVER et al., 2000).

Em estudo conduzido na América Latina foi verificado que as florestas em regeneração são capazes de sequestrar mais CO₂ do que as florestas primárias, isto devido ao reestabelecimento e crescimento da vegetação, o que não ocorre nas florestas intactas, as quais já atingiram os níveis máximos em estocagem de carbono, deixando, portanto de absorver grandes quantidades de CO₂ da atmosfera (POORTER et al., 2016).

Por fim, a compreensão do processo de regeneração natural como um todo tem se mostrado essencial para o desenvolvimento de estratégias e políticas que permitam a restauração e a sustentabilidade destes ecossistemas, e ainda na decisão das regiões prioritárias quanto às atividades de recuperação e restauração baseadas em seu potencial de estocar carbono e nutrientes no solo (ARYAL et al., 2013).

2.2. Produção e decomposição da serapilheira

Nos ecossistemas florestais a ciclagem de nutrientes ocorre envolvendo o processo de transferência dos nutrientes acumulados na biomassa vegetal para o solo, através da deposição e decomposição da serapilheira, constituída principalmente por folhas, flores, raízes, cascas e caules.

A decomposição deste material por microrganismos e a subsequente incorporação e retorno dos nutrientes ao solo são considerados os processos mais importantes na transferência de elementos essenciais da vegetação para o solo e no controle da ciclagem de nutrientes, sendo essencial para o isolamento térmico e hídrico do solo, para a manutenção da fertilidade do solo e para o estabelecimento e desenvolvimento de povoamentos florestais tropicais, os quais geralmente ocorrem em solos pobres, com maior grau de intemperismo (LACLAU et al., 2004; PARSONS et al., 2014; PINTO et al., 2009; VITAL et al., 2004).

O processo de decomposição pode ser definido como a desintegração gradual de material vegetal e animal até que estes se tornem uma estrutura indefinida, com as moléculas orgânicas sendo fragmentadas em CO₂, água e componentes minerais. Durante este processo, parte do material decomposto é liberado através da respiração heterotrófica e parte é estabilizado para formar a matéria orgânica do solo (MOS) (LUO et al., 2016).

Além de garantir a disponibilidade dos nutrientes para a vegetação, a decomposição da serapilheira forma o húmus, matéria orgânica muito rica em nitrogênio e polifenóis, responsável por importantes características do solo, como estrutura, capacidade de retenção de água e troca iônica (MASON, 1980; BRADY, 1989; MELILLO; ABBER, 1991).

Diversos fatores podem influenciar a decomposição, entre eles: a relação C/N (carbono/nitrogênio), que determinará a ocorrência de mineralização ou imobilização dos nutrientes; a relação lignina/celulose, uma vez que, devido à composição química dos resíduos vegetais, a velocidade de decomposição varia, sendo iniciada pelos materiais solúveis, em seguida celulose e hemicelulose, carboidratos sólidos e por fim lignina e compostos fenólicos, assim, quanto maior a relação lignina/celulose mais lenta será a decomposição; as condições edafoclimáticas, como fertilidade do solo, quantidade e qualidade da argila, temperatura e umidade; e a taxa de atividade microbiana (MASON, 1980; MOORE et al., 1999; VITOUSEK et al., 1986).

No estabelecimento das florestas secundárias, a serapilheira possui papel muito importante, pois representa a principal via de transferência de nutrientes no sistema solo-planta, influenciando na composição e nos teores de nutrientes que retornarão ao solo (CALDEIRA et al., 2008). Quanto à quantidade e qualidade da serapilheira, estas dependem da interação entre fatores bióticos e abióticos, entre eles tipo de vegetação, solo, clima, altitude, latitude, precipitação, regimes de luminosidade e evapotranspiração. Tratando-se da importância das condições climáticas, destacam-se a pluviosidade e a temperatura, ocorrendo uma relação direta entre estes atributos e a produção de serapilheira. Isto pode ser observado a partir das diferentes taxas de produção anual de serapilheira nas diferentes áreas do globo: as

florestas situadas em regiões árticas ou alpinas produzem, anualmente, cerca de $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de serapilheira; as florestas temperadas frias, $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$; as florestas temperadas quentes, $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$; e as florestas equatoriais, cerca de $11,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (BRAY et al., 1964; CALVI, 2009; MARTINS, 2010; VITAL et al., 2004).

2.3. Ciclagem de carbono e nitrogênio em solos florestais

Nos ecossistemas florestais as principais entradas de C e N ocorrem via água das chuvas, a qual é depositada no solo após o escoamento nos troncos, lavagem de folhas e percolação de resíduos vegetais; via decomposição da serapilheira, processo biológico básico e essencial para a manutenção da ciclagem de nutrientes; e ainda através da biomassa de raízes finas, a qual devido à sua rápida renovação e incorporação ao solo pode ser responsável por até 50% da produtividade primária líquida, adicionando principalmente carbono ao solo (FASSBENDER, 1985; HAAG, 1985; MENEZES et al., 2010; NAVROSKI et al., 2010).

O carbono possui um dos ciclos biogeoquímicos de maior importância encontrados na natureza, sendo responsável por 40-50% da matéria orgânica viva. Sua ciclagem global é formada por dois ciclos, os quais acontecem em intervalos de tempo diferentes: o ciclo biológico e o ciclo geoquímico. O ciclo biológico ocorre através da interação entre planta e atmosfera, e está intimamente relacionado ao ciclo do oxigênio, uma vez que a entrada do carbono ocorre via fotossíntese (realizada por organismos fotoautotróficos), a qual remove o CO_2 da atmosfera para posterior conversão em biomassa e incorporação ao solo, e a liberação do CO_2 para a atmosfera ocorre via respiração. O ciclo geoquímico refere-se à transferência de C entre a atmosfera e a litosfera (oceanos, rios e solos), e demanda um período de tempo muito mais longo (milhões de anos) do que o ciclo biológico (ADUAN, 2003; GOMES et al., 2008; HAAG, 1985).

No ciclo do nitrogênio a entrada deste elemento no sistema solo-planta pode ocorrer via fixação atmosférica, na qual a energia luminosa quebra as moléculas de N_2 , que irão se ligar ao oxigênio disponível na atmosfera formando óxidos, sendo dissolvidos na água da chuva e posteriormente depositados no solo; e fixação biológica (a partir de associações de leguminosas com micorrizas ou por outras espécies vegetais). A saída pode ocorrer por meio de variados mecanismos de perdas, tais como lixiviação, na qual o nitrato é perdido através da solução do solo, por volatilização da amônia para a atmosfera, e via desnitrificação, no qual o nitrato é convertido a N_2 atmosférico pela ação de bactérias em condições anaeróbias (CANTARELLA, 2007; GOMES et al., 2008).

As reações envolvendo o N no compartimento solo dependem dos microrganismos, sendo diretamente afetadas pelas condições ambientais e climáticas consideradas favoráveis para cada microrganismo, sendo assim mais complexo prever e controlar sua ciclagem. Assim, dependendo das condições ambientais o N pode tanto ficar imobilizado e ser utilizado pelas plantas quanto ser lixiviado nas águas superficiais do subsolo, ou ainda ser perdido para a atmosfera na forma gasosa.

Os ciclos do C e N são intrinsecamente relacionados e a dinâmica de funcionamento destes sofre influência de fatores ambientais e práticas de manejo, principalmente no que se refere à manutenção ou não da cobertura vegetal. Com a manutenção da vegetação natural ocorre uma maior preservação da matéria orgânica, o que em conjunto com um maior aporte de nutrientes via serapilheira e um menor revolvimento do solo (resultando em menor exposição da matéria orgânica ao ataque dos microrganismos) propicia maiores teores de C e N quando comparados com cultivos agrícolas convencionais, por exemplo. A retirada da cobertura vegetal original resulta no rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando suas propriedades químicas, físicas e biológicas (MULLER, 2001).

A importância da ciclagem de nutrientes mostra-se ainda mais notável no caso das florestas tropicais, pois estão localizadas em solos mais intemperizados e com isso mais pobres em nutrientes, sendo assim indispensável esta ciclagem para a formação e desenvolvimento de exuberantes povoamentos florestais (PINTO et al., 2009).

2.4. Estoques de carbono e nitrogênio na vegetação e no solo

O solo é definido como sendo a superfície inconsolidada que recobre as rochas e suporta a vida animal e vegetal, constituído de camadas que diferem quanto à natureza física, química, mineralógica e biológica, e se desenvolvem pela ação do intemperismo sobre os materiais de origem, de natureza mineral e orgânica (FONTES; FONTES, 1992).

Este compartimento é um importante reservatório de carbono da superfície terrestre. Em termos globais, nos primeiros 100 cm de profundidade estão armazenados entre 1330 a 2000 Pg de carbono, correspondendo ao dobro da concentração presente na atmosfera, e aproximadamente 9,5 Mg de nitrogênio. Considerando apenas o carbono orgânico (que representa entre 30-60% do carbono total estocado nos ecossistemas florestais tropicais), os solos armazenam uma quantidade maior do que atmosfera e biosfera juntas (BROWN, 1993; MEERSMANS et al., 2008; NAVARRETE et al., 2016; POST et al., 1985). Devido às condições climáticas e à sua grande biodiversidade e produtividade, os solos

tropicais ocupados por florestas são grandes reservatórios de nutrientes, capazes de armazenar 44% do carbono orgânico total global. No caso dos solos brasileiros, considerando os primeiros 30 cm de profundidade estão armazenados em torno de 36,4 Pg de carbono (BERNOUX et al., 2002; JOBBAGY; JACKSON, 2000).

De acordo com o citado anteriormente, as florestas têm recebido atenção especial devido ao potencial de sumidouro do carbono atmosférico, através da fixação deste no processo de fotossíntese. Segundo estimativas da FAO, no ano de 2015 as florestas foram capazes de estocar 289 Gt (gigatoneladas) de carbono em sua biomassa. A capacidade atual das florestas ao redor do mundo é de estocar mais de 650 bilhões de toneladas de carbono, sendo que deste total 44% é estocado na biomassa, 11% na serapilheira e 45% no solo (FAO, 2015).

Devido à rápida taxa de produção de biomassa nos estádios iniciais da regeneração e à decomposição da serapilheira as florestas secundárias têm alto potencial para assimilar e estocar no solo o carbono e os nutrientes que foram perdidos durante o período em que a vegetação natural foi removida para diferentes usos do solo, podendo inclusive sequestrar mais CO₂ do que as florestas intactas devido ao estágio sucessional em que se encontram (HUGHES et al., 1999).

Além do carbono, o nitrogênio é também um elemento essencial às florestas em regeneração. As florestas tropicais em estádios iniciais de regeneração podem ser limitadas pela disponibilidade de N no sistema, interferindo no sucesso da reestruturação da paisagem. Logo após o distúrbio e o início da regeneração as florestas tropicais demonstram um ciclo conservativo típico, apresentando maiores taxas de ciclagem interna e redução nas perdas de N, disponibilizando assim maiores quantidades de nitrogênio para a recuperação e o desenvolvimento da vegetação secundária (DAVIDSON et al., 2007; FIGUEIRA, 2006).

A mudança do uso do solo é um fator importante na alteração dos estoques de nutrientes, pois pode influenciar a quantidade e a qualidade da serapilheira, a decomposição desta e os processos de estabilização da matéria orgânica através da formação de complexos organo minerais (JOHN et al., 2005). As variações nos estoques de C e N após a alteração no uso do solo entre floresta e pastagem têm apresentado resultados conflitantes, sendo observado tanto acréscimo após a retirada da vegetação original, devido ao maior aporte de matéria orgânica em razão do sistema radicular bem desenvolvido e distribuído das gramíneas (BERNOUX et al., 2002; ECLESIA et al., 2012); quanto decréscimo, podendo ser ocasionado pela degradação das pastagens e pelo maior aporte de nutrientes via decomposição da serapilheira nas florestas. Além disso, os resultados sofrem influência ainda do tipo de solo e

manejo (ASSAD et al., 2013; CARDOSO et al., 2009; DON et al., 2011; DORTZBACH et al., 2015).

Após a conversão de floresta nativa para pastagem em Rondônia os estoques de carbono no solo (Latosolo; 0-30 cm) em pastagens com 20 anos de implantação foram 17-20% maiores do que os estoques encontrados na floresta nativa (MORAES et al., 1996). Resultado semelhante foi observado na comparação entre solos (Nitossolo, 0-10 cm) de áreas de pastagem e floresta secundária em Marmeleiro (PR) em que os maiores estoques de nitrogênio no solo foram encontrados na floresta secundária (LOSS et al., 2014).

Em contrapartida, a implantação de pastagem em área anteriormente recoberta por vegetação nativa de Cerrado em Montividiu (GO) em Latossolo (0-30 cm, teor de argila: 550 g kg⁻¹) resultou em redução nos estoques de carbono, com uma redução média de 0,25 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. Os valores encontrados de estoque foram 75,4 Mg C ha⁻¹ para vegetação nativa, 72,3 Mg C ha⁻¹ para pastagem com 21 anos e 68,0 Mg C ha⁻¹ para pastagem com 23 anos (CARVALHO et al., 2014). No município de Sorocaba (SP), em uma comparação entre pastagem e floresta primária a quantidade de carbono estocado no solo foi 48% menor nas áreas ocupadas por pastagem (SILVA et al., 2009).

No estabelecimento de floresta secundária após o abandono da pastagem em Amazonas ocorreu acréscimo nos estoques de carbono no solo (Latosolo, 0-45 cm, teor de argila: 800 a 850 g kg⁻¹), com as florestas secundárias de 12-14 anos de regeneração estocando em média 25 Mg C ha⁻¹ e 1,5 Mg N ha⁻¹ a mais do que as florestas secundárias mais jovens. Os estoques de nitrogênio no solo também foram maiores nas florestas, aumentando conforme a idade da regeneração. Além disso, em todas as áreas, a camada 0-15 cm representou 40-45% do total de estoque de N na camada 0-45 cm, devido aos maiores teores de matéria orgânica e atividade microbiológica (FELDPAUSCH et al., 2004).

Na quantificação do carbono estocado no solo em áreas de pastagem e floresta secundária no Equador (solos vulcânicos e sedimentares, 0-50 cm, teor de argila: 230 g kg⁻¹), as pastagens com 10 anos de implantação apresentaram em média 9,3 Mg ha⁻¹ a mais que as florestas secundárias. Entretanto, quando comparadas a pastagens com 20 e 30 anos as florestas apresentaram acréscimo de 18,8 Mg ha⁻¹ (DE KONING, 2003).

Na análise entre pastagens (20 anos) e florestas secundárias (mais de 30 anos) localizadas no nordeste da Costa Rica (Argissolo, 0-30 cm), as pastagens estocaram 19% a mais que florestas secundárias na camada 0-10 cm, porém na camada 10-30 cm as florestas secundárias estocaram 18% a mais que as pastagens, alterando a distribuição do carbono no solo. Foi observado ainda que para a camada total analisada (0-30 cm) as florestas secundárias

estocam em média 49% do carbono na camada 0-10 cm, com diminuição gradual nas camadas 10-20 e 20-30 cm (SCHEDLBAUER et al., 2007).

Em Camboriú (SC), em área de conversão floresta-pastagem com diferentes tempos de implantação, os maiores estoques de carbono no solo (Argissolos, Cambissolos e Gleissolos, 0 – 1 m) foram observados nas áreas atualmente ocupadas por floresta, enquanto que as regenerações com mais de 25 anos apresentaram aumento dos estoques em comparação à pastagem. Em uma área com 50 anos de regeneração os estoques foram maiores do que os apresentados pela floresta nativa, destacando o importante papel das florestas secundárias como reservatório de carbono (DORTZBACH et al., 2015).

Em estudo realizado no Parque Estadual da Serra do Mar (SP) em áreas de Floresta ombrófila densa montana em Neossolo e Cambissolo (1 m), em diferentes altitudes (0m, 100m, 400m e 1000m) os estoques de C e N do solo foram avaliados, apresentando acréscimo nos estoques de acordo com o gradiente altitudinal. Além disso, ocorreu enriquecimento isotópico em profundidade em todas as altitudes devido a migração da matéria orgânica mais velha no perfil e fracionamento isotópico neste processo. As áreas de altas altitudes apresentaram solos mais argilosos (em média 200 g kg⁻¹ de argila) em relação aos solos a 0m (em média 900 g kg⁻¹ de areia), o que interferiu na ciclagem dos teores e estoques de C e N do solo (MARTINS, 2010).

Frente a esses diferentes resultados, conclui-se que estudos referentes aos estoques de C e N nas florestas secundárias são imprescindíveis para melhor compreender a influência exercida pela alteração do uso do solo sobre a dinâmica destes elementos, como ocorre a recuperação dos ciclos destes elementos ao longo da regeneração e qual o potencial destas florestas em atuar como reservatórios de carbono (MARIN-SPIOTTA; SHARMA, 2013).

2.5. Abundância natural de C ($\delta^{13}\text{C}$) e sua aplicação em estudos ambientais

Isótopos são átomos de determinado elemento que possuem o mesmo número de prótons e diferente número de nêutrons, resultando em diferentes valores de massa. Estes são classificados em estáveis e radioisótopos (os quais emitem radiação e desintegram com o tempo). Os isótopos estáveis de muitos elementos apresentam diferentes abundâncias, e para esta quantificação são utilizadas amostras (de solo, água e/ou tecido de plantas ou animais) que serão convertidas em gás, via combustão, e depois introduzidas em espectrômetro de massa, onde serão ionizadas e suas moléculas separadas de acordo com sua massa.

Assim, a proporção de massa/carga é medida de acordo com a proporção (R) de isótopos pesados (^{13}C) e leves (^{12}C) da amostra.

Os isótopos estáveis estão presentes nos ecossistemas e sua distribuição natural fornece informações a respeito da história dos processos físicos e metabólicos no ambiente, sendo considerada uma importante ferramenta para a compreensão da ciclagem de nutrientes.

A técnica da variação da abundância natural dos isótopos estáveis avalia a mudança na composição isotópica das amostras que ocorre durante a alteração dos estados físico-químicos dos elementos (processo denominado como discriminação ou fracionamento), com a mudança preferencial de um dos isótopos, uma vez que esse fenômeno irá alterar as proporções $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (MARTINELLI et al., 2009). Esta técnica tem sido utilizada na análise da influência da substituição da vegetação (conversão de vegetação C_3 para C_4 e vice-versa) na dinâmica do carbono. Sua aplicabilidade é baseada no pressuposto de que a matéria orgânica presente no solo reflete o material vegetal anterior e atual presentes na matéria orgânica do solo. Para cada transformação química, física e biológica que a matéria orgânica sofre ocorrerá uma discriminação entre seus isótopos, possibilitando sua utilização como traçadores naturais (BOUTTON, 1991).

Na natureza são encontrados dois isótopos estáveis de carbono: ^{12}C , que é o isótopo mais leve e que apresenta maior proporção em relação ao carbono total (98,89%), e o ^{13}C , que representa 1,11% da abundância. Essa relação se mantém relativamente estável em qualquer material orgânico. A composição isotópica é obtida comparando-se a proporção $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra com um padrão internacional (Vienna Pee Dee Belemnite - VPDB), o qual apresenta $R = 0,0111820$. Os desvios encontrados nas amostras são conhecidos como unidades δ , e como são valores muito pequenos convencionou-se expressá-los em partes por mil (‰) (LAJTHA; MARSHALL, 1994).

Devido ao fato de a relação molar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da vegetação ser inferior à do padrão VPDB, os resultados do $\delta^{13}\text{C}$ da vegetação é negativo, variando de -11 a -35‰. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 atmosférico situam-se em torno de -7‰ (ALVES et al., 2006).

Para amostras de tecidos vegetais, as maiores variações no valor de $\delta^{13}\text{C}$ são obtidas na comparação entre espécies dos ciclos fotossintéticos C_3 e C_4 , pois como estes ciclos utilizam-se de diferentes enzimas (as plantas C_3 utilizam a enzima RuBisCO e as plantas C_4 a PEP-carboxilase) o fracionamento isotópico do carbono ocorre de forma diferente, gerando valores de $\delta^{13}\text{C}$ distintos que permitem a diferenciação. As plantas do ciclo C_3 (espécies arbóreas) apresentam valores entre -20 e -34‰, enquanto as plantas de ciclo C_4 (gramíneas) presentes em pastagens, apresentam valores que variam de -9 a -17‰ (BOUTTON, 1991).

As análises da abundância natural de C ($\delta^{13}\text{C}$) têm demonstrado um enriquecimento em profundidade no perfil do solo, relacionado com a migração da matéria orgânica mais antiga no perfil do solo e com o efeito do fracionamento durante a decomposição da matéria orgânica ao longo do perfil do solo dos diferentes resíduos orgânicos, sendo este responsável por um aumento médio de 3 a 4% em profundidade. Na alteração do uso do solo, como na conversão de floresta nativa para pastagem ou de pastagem para floresta secundária, a origem do carbono pode ser analisada através da variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (ASSAD et al., 2013; LOSS et al., 2014; MARTINELLI et al., 1996).

Em estudo realizado no Parque Estadual da Serra do Mar (SP) em áreas de floresta ombrófila densa montana em Neossolo e Cambissolo, em diferentes altitudes (0m, 100m, 400m e 1000m) os valores isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$) observados foram de -22‰ e -32‰, estando dentro do intervalo típico para solos florestais. Além disso, ocorreu enriquecimento em profundidade em todas as áreas analisadas (MARTINS, 2010).

Comparando florestas secundárias e pastagens (ambas estabelecidas há mais de 30 anos) em Marmeleiro (PR), sob Nitossolo vermelho com textura argilosa, os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ foram de -26‰ e -19‰ (0 – 5 cm), e -25‰ e -18‰ (camada 5 – 10 cm), para floresta e pastagem respectivamente. Os resultados evidenciaram a ocorrência do enriquecimento em profundidade e da possibilidade de diferenciação entre as vegetações através da composição isotópica (LOSS et al., 2014). Resultados semelhantes foram observados em estudo realizado no Equador, no qual os valores isotópicos do solo (0 – 10 cm, teor de argila: 300 a 600g kg⁻¹) sob florestas secundárias (30 anos) variaram de -28‰ a -30‰ e nos solos sob pastagem entre -11‰ e -14‰ (PAUL et al., 2008).

Em área de conversão entre pastagem e floresta (Camboriú - SC) com diferentes idades, sob Argissolos, Cambissolos e Gleissolos os valores encontrados para $\delta^{13}\text{C}$ variaram entre -23‰ e -29‰ para as áreas de floresta nativa e secundárias, enquanto que as áreas ocupadas atualmente por pastagens apresentaram valores em torno de -19‰ (camada 0 – 10 cm), decrescendo a -23‰ em profundidade (30 cm), demonstrando a influência do material vegetal ainda proveniente da floresta nativa nas camadas mais profundas, a partir de 30 cm (DORTZBACH et al., 2015).

No nordeste da Costa Rica a análise do ^{13}C em pastagens e florestas secundárias indicou que o carbono proveniente das pastagens foi rapidamente substituído na regeneração, e que após 10 anos a ciclagem do carbono no solo se aproxima ao observado nos ecossistemas dominados por plantas C_3 (proveniente da nova vegetação), sendo confirmado pelo decréscimo nos valores de $\delta^{13}\text{C}$. Como relatado em outros estudos em solos de florestas

tropicais (CAMARGO et al., 1999; TELLES et al., 2003) ocorreu enriquecimento no perfil do solo (até 1m) em todas as florestas secundárias (SCHEDLBAUER et al., 2007).

Comparando áreas de mata nativa, pastagem e integração lavoura-pecuária distribuídas ao longo dos biomas cerrado, mata atlântica e pampa, quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ no solo (0 – 10 cm), foram encontradas médias iguais a -25,4‰ nas matas nativas, -19,6‰ na integração lavoura-pecuária e -17,7‰ na pastagem. Quanto à contribuição de plantas C_3 e C_4 no carbono do solo foi observado que o carbono proveniente da vegetação C_4 representa 66% do carbono presente nas áreas de pastagem, 52% na lavoura-pecuária e 10% nas áreas de vegetação nativa, indicando que algumas das áreas classificadas como vegetação nativa podem não ser florestas primárias, mas sim secundárias, ressaltando a aplicabilidade da técnica do carbono isotópico neste tipo de estudo (ASSAD et al., 2013).

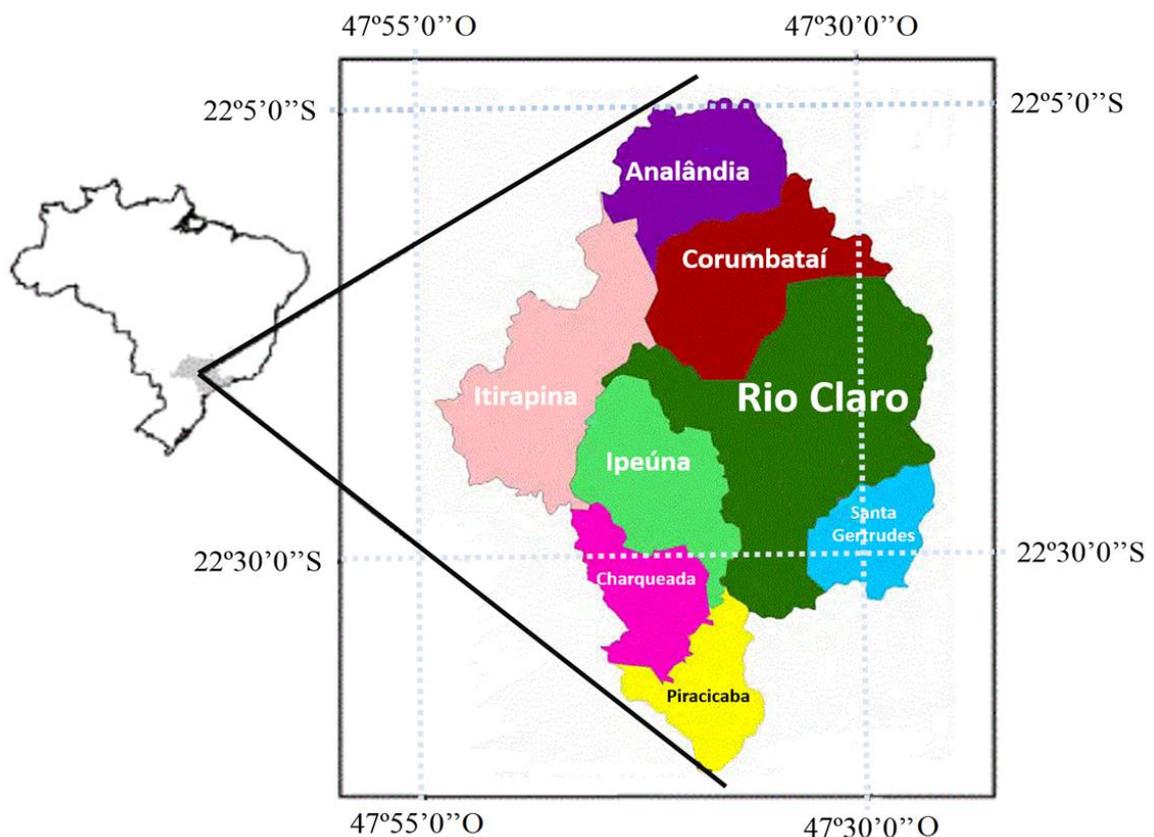
Estes resultados demonstram que a substituição do carbono é um processo lento e variável, influenciado por fatores como vegetação anterior e atual da área, atributos do solo, condições climáticas e tempo decorrido após a conversão. A análise de solos com o auxílio da técnica isotópica fornece informações a respeito do histórico de uso da área e da dinâmica do carbono.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

O presente trabalho foi conduzido no município de Rio Claro, localizado na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, região centro-leste do estado de São Paulo, entre os paralelos $22^{\circ}5'$ e $22^{\circ}30'S$ e os meridianos $47^{\circ}30'$ e $47^{\circ}55'O$ (Figura 2).

Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do rio Corumbataí no estado de São Paulo



Fonte: adaptado de Valente e Vettorazzi (2003)

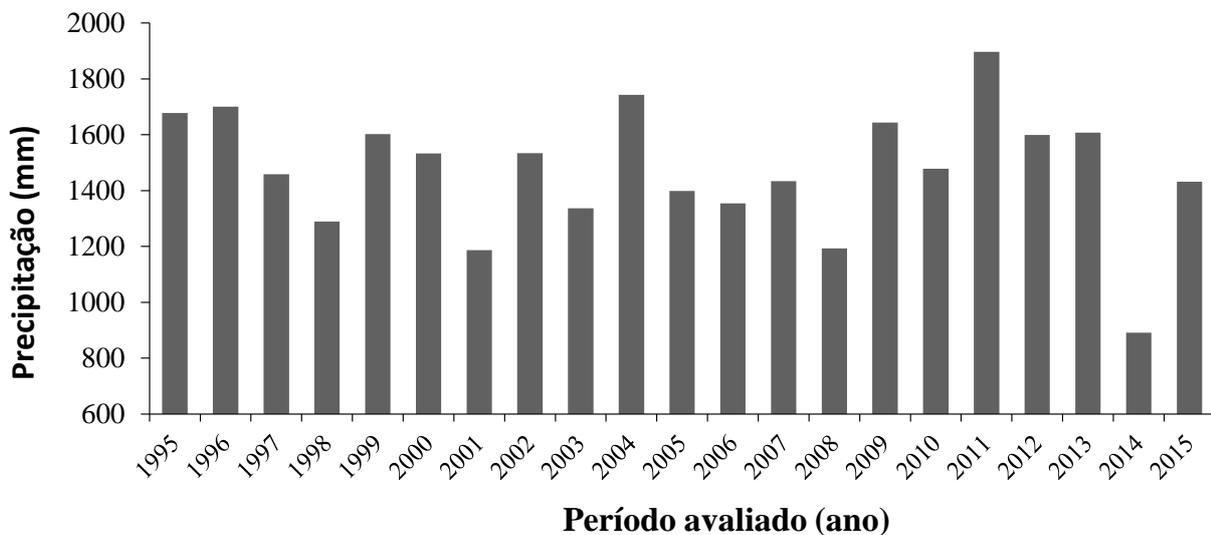
3.2. Caracterização da bacia do rio Corumbataí (SP)

A bacia do rio Corumbataí possui área de cerca de 1.700 km². Possui a maior parte de sua área na depressão periférica paulista e abrange oito municípios (Corumbataí, Ipeúna, Rio Claro, Santa Gertrudes e parte dos municípios de Analândia, Charqueada, Itirapina e Piracicaba), sendo responsável pelo abastecimento de água de aproximadamente 500 mil pessoas diretamente e de 5 milhões de pessoas indiretamente. Está localizada em uma

região de grande importância econômica, levando-se em consideração o desenvolvimento agrícola e industrial (VALENTE, 2001).

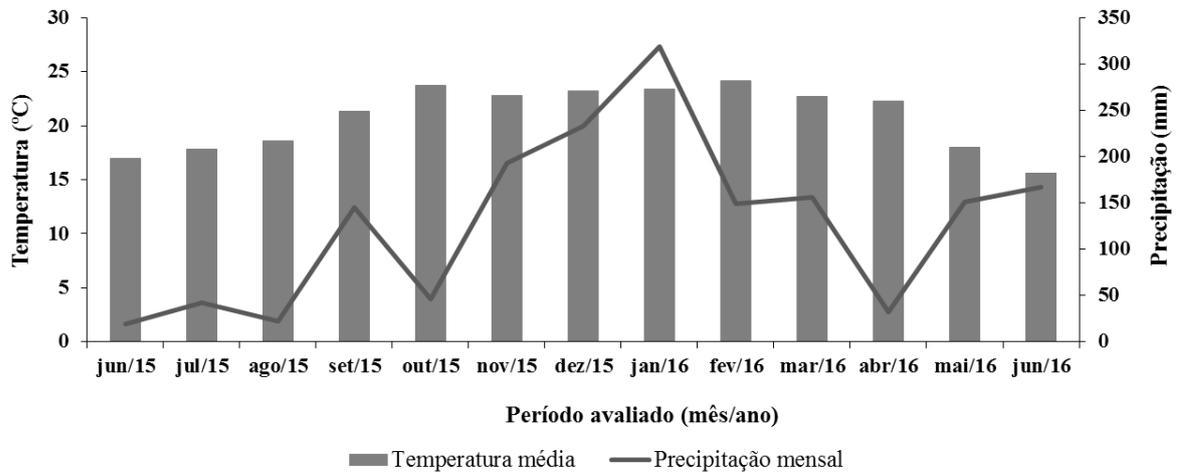
A região possui clima do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen, ou seja, subtropical, seco no inverno e chuvoso no verão, com temperatura média anual variando no mês de janeiro entre 20 e 23°C e em julho entre 14 e 17°C (ATLAS AMBIENTAL, 2002). Na estação seca (abril a setembro) chove menos de 30% da precipitação anual, e a estação chuvosa (outubro a março) concentra mais de 70% da precipitação (LOURENÇO, 2013). O regime pluvial é bastante variável na região, sendo que na porção norte e central da bacia as chuvas são mais frequentes, atingindo até 1700 mm, nas regiões leste e oeste os valores médios estão em torno de 1400 mm e ao sul ocorrem os menores valores médios de 1300 mm (ZAMPIN; RIBEIRO, 2013) (Figuras 3 e 4).

Figura 3. Precipitação anual (mm) no município de Rio Claro (SP) nos anos entre 1995 e 2015



Fonte: CEAPLA/INPE/UNESP, 2016

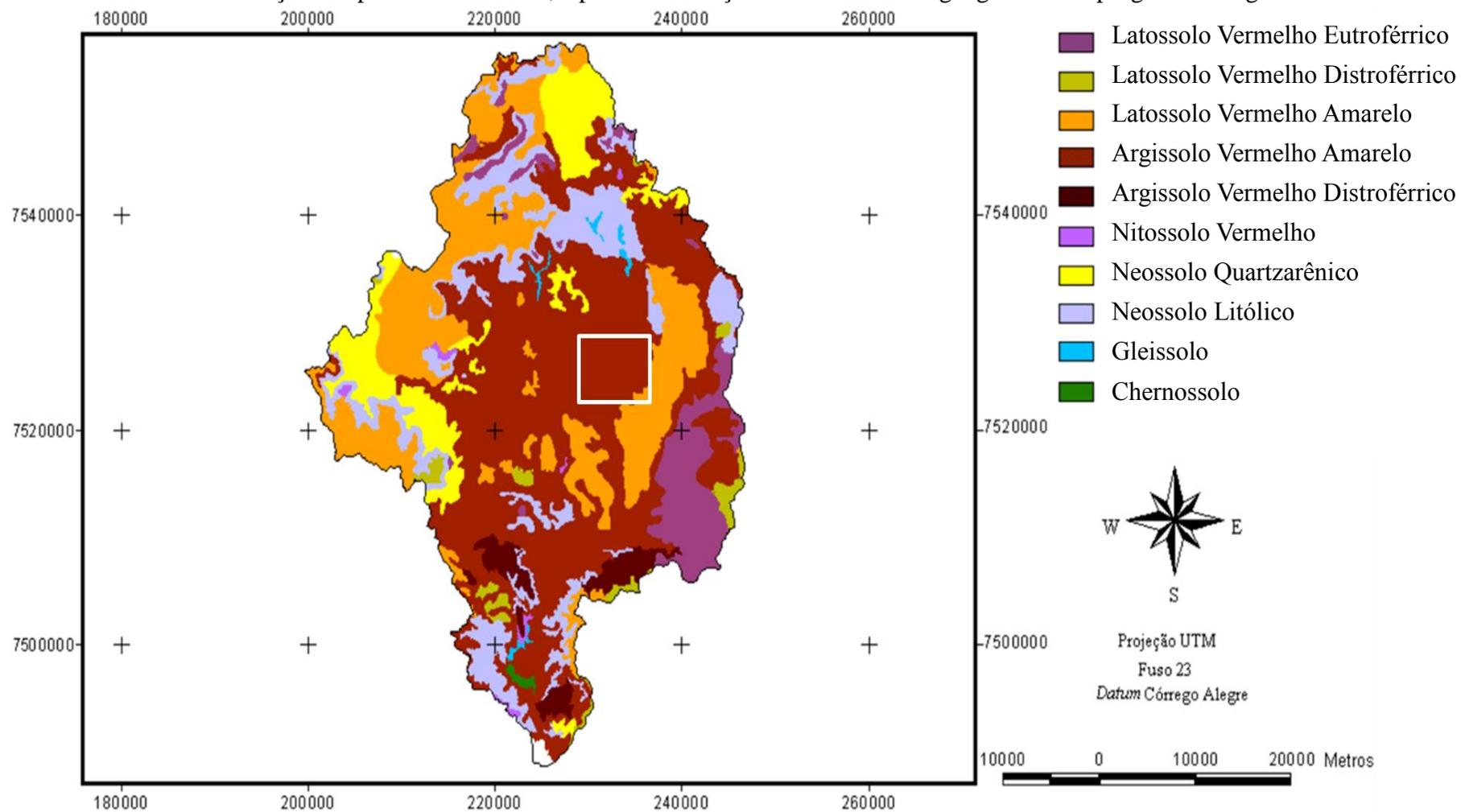
Figura 4. Climograma do município de Rio Claro (SP) no período de junho de 2015 a junho de 2016 (período no qual foram realizadas as coletas)



Fonte: CEAPLA/INPE/UNESP, 2016

A bacia é coberta predominantemente por Argissolo (40% de sua área), seguida por Latossolo (30%) e Neossolo (22%) (MUNIZ, 2014; VALENTE, 2001), conforme Figura 5.

Figura 5. Mapa de Solos da bacia do rio Corumbataí (SP), segundo a classificação de solos (EMBRAPA, 1999). A área delimitada pelo quadrado em branco refere-se à localização das parcelas estudadas, a partir da inserção das coordenadas geográficas no programa Google Earth

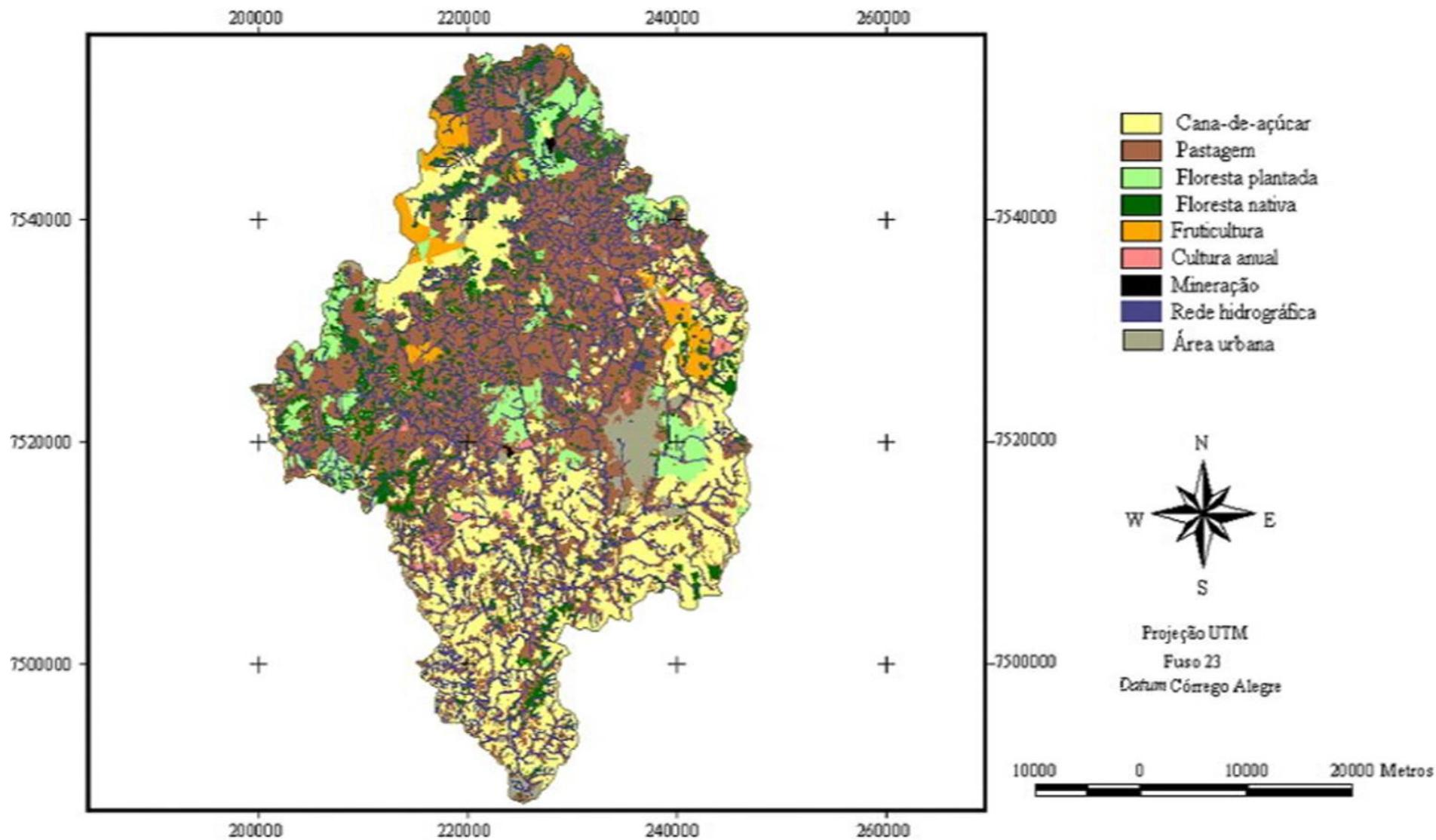


A região da bacia do rio Corumbataí apresenta cobertura original classificada como floresta estacional semidecidual, caracterizada por apresentar dossel descontínuo, variando entre 15 e 20 metros de altura com árvores emergentes de até 30 metros (RODRIGUES, 1999). O conceito ecológico deste tipo florestal é estabelecido em função da ocorrência de clima estacional (verão chuvoso e inverno seco) que resulta em semidecuidade das folhas (IBGE, 2012).

Os remanescentes florestais encontrados na bacia pertencem às seguintes formações: floresta estacional semidecidual floresta ripária, floresta paludosa, floresta estacional decidual e cerrado (RODRIGUES, 1999). A maior parte de sua cobertura florestal foi desmatada no início do século XX para o cultivo de café, sendo este gradualmente substituído por pastagens e cana-de-açúcar (BASILE, 2006; VALENTE; VETTORAZZI, 2003).

Segundo Valente e Vettorazzi (2003), os usos do solo mais comuns na área de estudo são pastagens e culturas agrícolas, com respectivamente 44% e 30% da cobertura do solo na bacia hidrográfica, seguidos por florestas nativas (12%), plantios florestais (7%) e outros usos do solo (7%) (Figura 6). Esta configuração, que caracteriza o atual mosaico do uso de solo da bacia, manteve-se estável nos últimos 40 anos, de modo que pastagens e plantios de cana-de-açúcar sempre ocuparam a maior parte das terras (PEREIRA; PINTO, 2007)

Figura 6. Mapa de Uso de Solo da bacia do rio Corumbataí no ano de 2001



Fonte: Valente, 2001

3.2.1. Caracterização das áreas de estudo

Para a seleção das áreas deste estudo utilizou-se imagens aéreas (Figura 8) obtidas e processadas por Ferraz et al. (2014). Com o uso das imagens foi possível identificar as áreas de estudo para a construção de uma sequência temporal de floresta fonte (FF), pastagem (PA50) e regeneração natural (FS12, FS30 e FS46) em diferentes estádios sucessionais (BRASIL, 1994b), sendo todas antecedidas por pastagem (Figura 7):

- FF (Floresta Fonte): fragmento de floresta estacional semidecidual, com idade estimada acima de 55 anos (assim denominada por ser o fragmento presente na imagem de 1962, a partir do qual se iniciou a regeneração).
- PA50: pastagem formada por *Brachiaria decumbens*, com idade estimada acima de 50 anos, sob manejo extensivo;
- FS12: floresta secundária em estágio médio de regeneração natural (entre 8 e 16 anos). Densidade: 21 indivíduos (DAP>5 cm), espécies mais abundantes: *Psidium guajava* L. *Luehea candicans* e *Moquiniastrum polymorphum* (Less.) G. Sancho.
- FS30: floresta secundária em estágio médio de regeneração natural (entre 21 e 38 anos). Densidade: 28 indivíduos (DAP>5 cm), espécies mais abundantes: *Machaerium nyctitans* (Vell.) Benth. e *Sebastiania brasiliensis* Spreng.
- FS46: floresta secundária em estágio avançado de regeneração natural (entre 38 e 54 anos). Densidade: 25 indivíduos (DAP>5 cm), espécies mais abundantes: *Trichilia pallida* Sw., *Trichilia claussoni* C.DC. e *Moquiniastrum polymorphum* (Less.) G. Sancho.

Figura 7. Esquema da sequência temporal avaliada neste estudo

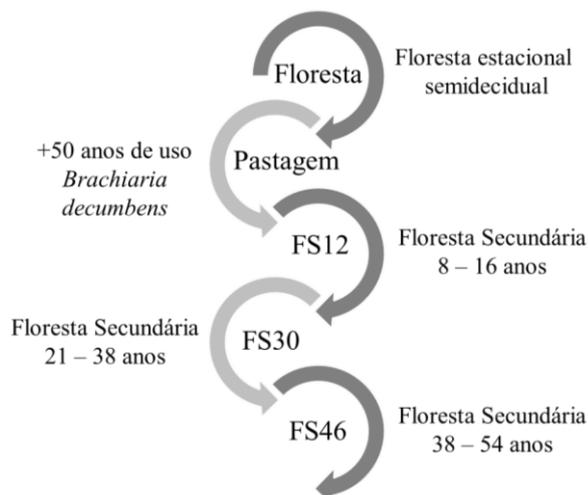
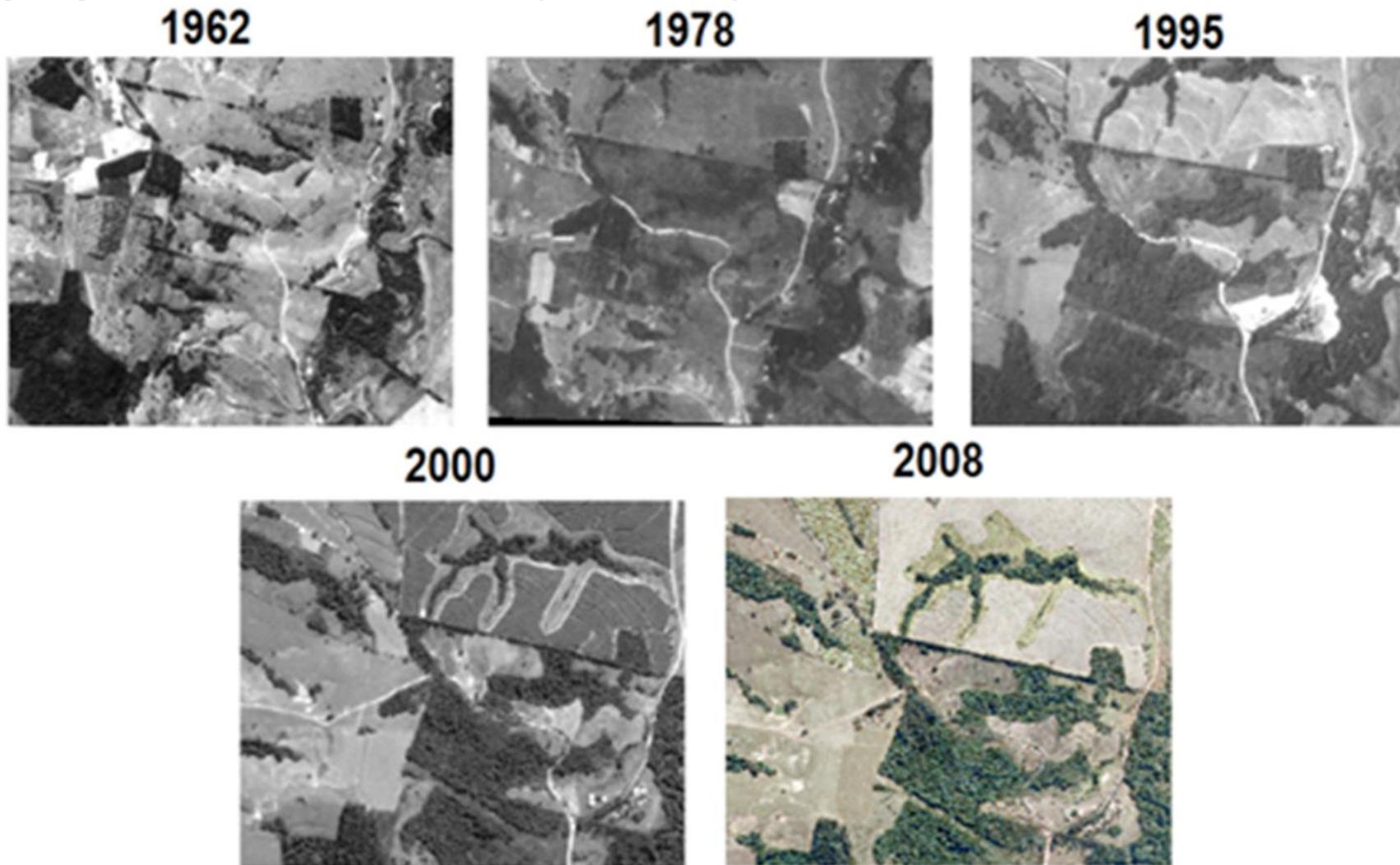


Figura 8. Imagens aéreas do fragmento florestal em estudo (Rio Claro – SP) referentes aos anos de 1962, 1978, 1995, 2000 e 2008, nas quais é possível observar no ano de 1978 a diminuição em área do fragmento e em 1995, 2000 e 2008 o aumento da área



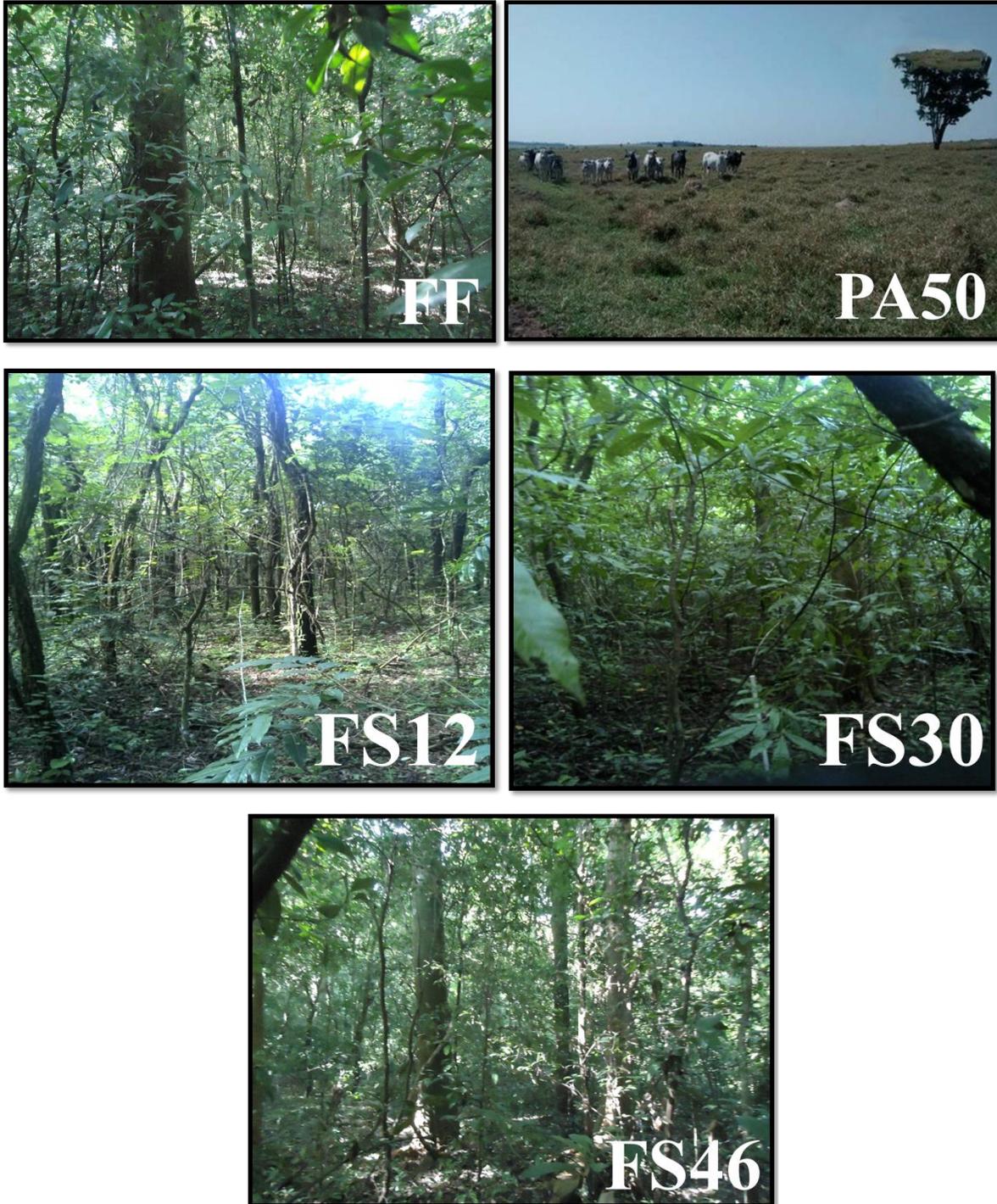
Fonte: Ferraz et al., 2014

A localização geográfica de cada uma das áreas de estudo está descrita na Tabela 1 e Figura 9. As parcelas foram estabelecidas em áreas de floresta estacional semidecidual, e possuem área de 900 m² (20 x 45m), buscando sempre manter uma distância mínima de 30 m entre a borda da parcela e a borda do remanescente; tendo sido definidas com base na acessibilidade e no tempo de regeneração.

Tabela 1. Localização das áreas de estudo, com as parcelas correspondentes, na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

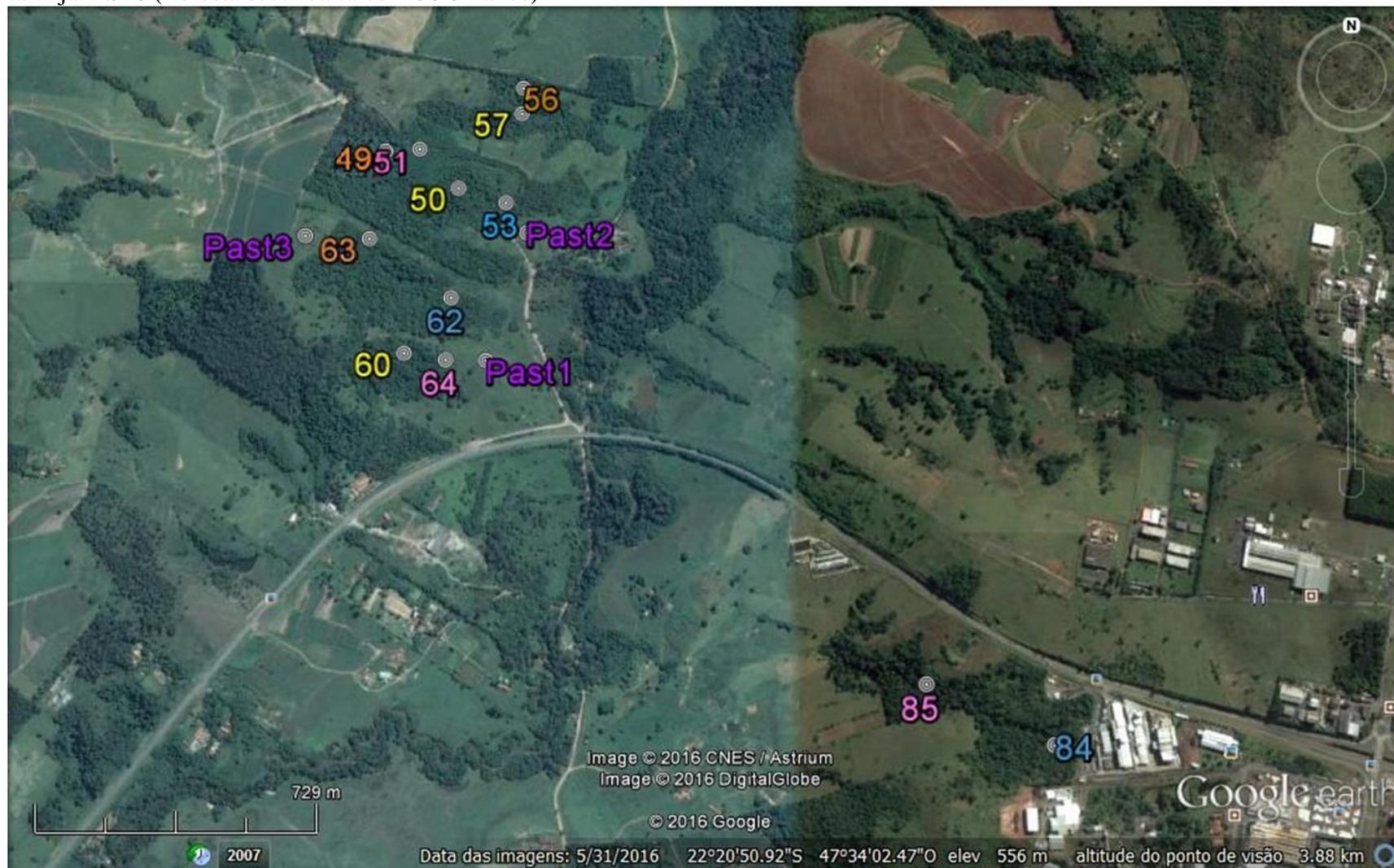
Área	Legenda	Parcela	Latitude	Longitude
Floresta Fonte	FF	50	22°20'44"S	47°34'24"O
Floresta Fonte	FF	57	22°20'32"S	47°34'20"O
Floresta Fonte	FF	60	22°20'33"S	47°34'41"O
Pastagem 50 anos	PA50	Past1	22°20'29"S	47°34'22"O
Pastagem 50 anos	PA50	Past2	22°20'38"S	47°34'27"O
Pastagem 50 anos	PA50	Past3	22°21'17"S	47°33'30"O
Floresta Secundária 8-16 anos	FS12	53	22°20'27"S	47°34'30"O
Floresta Secundária 8-16 anos	FS12	62	22°20'44"S	47°34'28"O
Floresta Secundária 8-16 anos	FS12	84	22°21'12"S	47°33'42"O
Floresta Secundária 21-38 anos	FS30	51	22°20'25"S	47°34'32"O
Floresta Secundária 21-38 anos	FS30	64	22°20'19"S	47°34'21"O
Floresta Secundária 21-38 anos	FS30	85	22°20'33"S	47°34'35"O
Floresta Secundária 38-54 anos	FS46	49	22°20'28"S	47°34'27"O
Floresta Secundária 38-54 anos	FS46	56	22°20'21"S	47°34'21"O
Floresta Secundária 38-54 anos	FS46	63	22°20'43"S	47°34'31"O

Figura 9. Áreas de floresta fonte (FF), pastagem (PA50) e florestas secundárias (FS12, FS30 e FS46) estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP)



Para cada área analisada foram definidas três parcelas, constituindo as repetições, totalizando assim 15 parcelas, alocadas em uma área total de aproximadamente 20 km². (Figura 10).

Figura 10. Distribuição das parcelas no fragmento florestal. Legenda amarela: FF (floresta fonte); roxa: PA50 (pastagem 50 anos); azul: FS12 (floresta secundária com 8-16 anos); rosa: FS30 (floresta secundária com 21-38 anos); e laranja: FS46 (floresta secundária com 38-54 anos)



O solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo de textura média (VALENTE, 2001), porém a análise granulométrica indicou diferenças nos teores de areia em determinadas parcelas na área analisada, conforme Tabela 2. Em relação ao relevo, a declividade média foi de 15% nas parcelas deste estudo.

Com o propósito de caracterizar o solo nas áreas de estudo, realizou-se análise granulométrica (Tabela 2) no Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) em Piracicaba (SP), e também análise química (Tabela 3) no Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) em Araras (SP).

A granulometria foi analisada por dispersão química, empregando-se o método do densímetro (EMBRAPA, 1997). As determinações químicas foram conduzidas de acordo com o método descrito por Camargo et al. (1986), cujos pontos fundamentais são apresentados a seguir: P através da extração dos teores disponíveis de P pela resina trocadora de íons e posterior quantificação por colorimetria; pH em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ usando relação solo-solução de 1:2,5; K, Ca e Mg com extração dos elementos trocáveis com solução normal de acetato de amônio 1N (pH 7,0) e determinação dos seus teores no extrato através da leitura no espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg) e fotômetro de chama (K e Na); acidez potencial através do pH SMP; Al trocável por meio de extração com solução de KCl 1N e titulação com NaOH $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, em presença de azul de bromotimol. Com os resultados das análises anteriores foram calculados: soma de bases (SB); capacidade de troca de cátions (CTC); saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%).

Tabela 2. Análise granulométrica no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP)

Prof.	FF	PA50	FS12	FS30	FS46
Argila (g kg^{-1})					
0 – 10 cm	299	285	275	256	170
10 – 20 cm	291	300	290	265	178
20 – 30 cm	282	281	255	257	194
Silte (g kg^{-1})					
0 – 10 cm	435	295	400	368	219
10 – 20 cm	411	315	363	439	247
20 – 30 cm	400	345	442	418	151
Areia (g kg^{-1})					
0 – 10 cm	266	420	325	374	611
10 – 20 cm	298	385	347	298	575
20 – 30 cm	318	374	303	325	655

FF: Floresta Fonte, PA50: Pastagem 50 anos, FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos, FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Em todas as camadas analisadas a área FS3 apresentou caráter mais arenoso do que as demais áreas, apresentando menores porcentagens de argila e maiores de areia, sendo diferente estatisticamente ($p < 0,1$). As demais áreas apresentaram resultados bastante semelhantes entre si quanto aos valores de argila, silte e areia, com estes 2 últimos representando mais de 70% da composição do solo, influenciando negativamente os estoques de carbono e nitrogênio devido à maior lixiviação dos nutrientes (DIAS et al., 2003).

Analisando-se as áreas de estudo separadamente, as áreas FF, FS1 e FS2 apresentaram maior porcentagem de silte e as áreas PA e FS3 maior porcentagem de areia. Para todas as áreas o teor de silte foi alto (em torno de 30 a 40%), devido à presença de siltitos roxos na região. Quanto à textura, os solos das áreas FF, PA, FS1 e FS2 foram classificados como franco argiloso e os solos da área FS3 como franco arenoso (EMBRAPA, 2006).

Tabela 3. Análises físico-química no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Prof.	FF	PA50	FS12	FS30	FS46
pH (Ca Cl₂)					
0 – 10 cm	5,4 ± 0,5	4,7 ± 0,1	3,5 ± 1,5	4,7 ± 0,1	4,9 ± 0,2
10 – 20 cm	5,3 ± 0,6	4,3 ± 0,1	4,7 ± 0,1	4,6 ± 0,1	4,7 ± 0,3
20 – 30 cm	5,1 ± 0,6	4,6 ± 0,3	4,5 ± 0,2	4,4 ± 0,1	5,0 ± 0,5
P (mg dm⁻³)					
0 – 10 cm	9 ± 5	10 ± 1	12 ± 4	6 ± 2	7 ± 3
10 – 20 cm	12 ± 2	5 ± 2	8 ± 3	6 ± 2	27 ± 19
20 – 30 cm	6 ± 1	7 ± 2	7 ± 3	12 ± 6	30 ± 2
K (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	6,3 ± 1,1	2,2 ± 0,3	3,9 ± 0,8	4,5 ± 0,3	4,4 ± 1,0
10 – 20 cm	6,0 ± 0,8	3,6 ± 2,1	3,4 ± 0,8	4,3 ± 0,3	2,6 ± 0,8
20 – 30 cm	5,5 ± 1,0	2,4 ± 0,9	2,7 ± 0,8	3,4 ± 0,4	3,1 ± 0,2
Ca (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	66 ± 21	31 ± 13	42 ± 16	33 ± 10	17 ± 6
10 – 20 cm	65 ± 26	30 ± 14	34 ± 12	29 ± 12	13 ± 5
20 – 30 cm	57 ± 24	31 ± 15	33 ± 12	26 ± 14	19 ± 5
Mg (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	34 ± 2	25 ± 12	26 ± 8	31 ± 6	15 ± 6
10 – 20 cm	39 ± 8	21 ± 12	26 ± 9	26 ± 6	10 ± 2
20 – 30 cm	36 ± 7	22 ± 11	25 ± 10	29 ± 8	12 ± 1

(Continuação Tabela 3)

Prof.	FF	PA50	FS12	FS30	FS46
H+Al (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	33 ± 8	30 ± 6	35 ± 3	38 ± 4	37 ± 10
10 – 20 cm	38 ± 14	45 ± 7	37 ± 1	43 ± 5	33 ± 7
20 – 30 cm	41 ± 13	36 ± 5	43 ± 3	50 ± 10	32 ± 10
Al (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	2,0 ± 1	9,4 ± 4	1,8 ± 0,6	3,1 ± 1	3,3 ± 2
10 – 20 cm	2,7 ± 2	13,7 ± 3	4,7 ± 1	6,1 ± 2	6,7 ± 3
20 – 30 cm	6,9 ± 4	6,1 ± 2	9,2 ± 3	15,8 ± 4	6,1 ± 5
SB (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	106,3 ± 20	57,8 ± 26	72,2 ± 24	68,5 ± 17	36,8 ± 12
10 – 20 cm	110,7 ± 35	54,6 ± 27	64,0 ± 22	59,6 ± 17	25,6 ± 8
20 – 30 cm	98,9 ± 31	55,8 ± 28	60,4 ± 23	58,4 ± 23	33,8 ± 6
CTC (mmol_c kg⁻¹)					
0 – 10 cm	139,3 ± 12	87,5 ± 31	107,6 ± 21	106,5 ± 15	73,8 ± 22
10 – 20 cm	148,7 ± 26	99,6 ± 33	100,7 ± 22	102,3 ± 14	58,3 ± 15
20 – 30 cm	140,2 ± 22	92,1 ± 29	103,7 ± 19	109,1 ± 21	65,8 ± 15
V (%)					
0 – 10 cm	75,2 ± 7	57,4 ± 14	62,6 ± 11	62,7 ± 6	49,0 ± 3
10 – 20 cm	71,7 ± 10	44,1 ± 15	58,3 ± 12	56,0 ± 8	43,0 ± 6
20 – 30 cm	67,6 ± 11	49,1 ± 18	53,3 ± 13	50,0 ± 11	53,4 ± 5
m (%)					
0 – 10 cm	2,2 ± 2	18,4 ± 6	3,3 ± 1	4,7 ± 2	6,6 ± 2
10 – 20 cm	3,0 ± 2	32,9 ± 16	11,1 ± 6	11,4 ± 4	20,4 ± 8
20 – 30 cm	8,2 ± 5	26,8 ± 16	20,2 ± 12	23,8 ± 10	11,8 ± 9

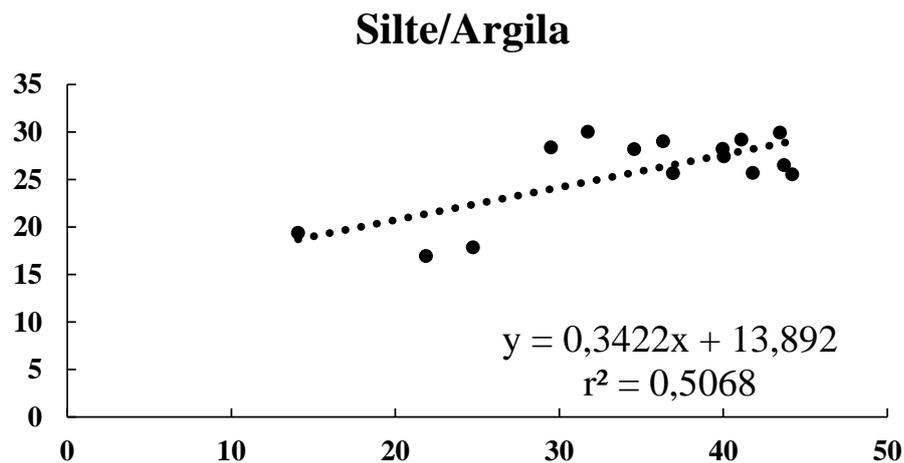
FF: Floresta Fonte, PA50: Pastagem 50 anos, FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos, FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos. H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio

Quanto à análise química, os valores encontrados de P podem ser classificados como médio a muito alto para solos florestais; para a camada 0 – 10 cm não houve grande variação entre as áreas, entretanto nas camadas 10 – 20 e 20 – 30 cm a área FS3 apresentou valores consideravelmente mais altos do que as outras áreas. Os valores de pH variaram pouco entre as áreas, apresentando valores entre 3,5 e 5,4, denotando solos acidificados, característica comum aos solos florestais tropicais, em razão do maior intemperismo e da ausência de minerais primários e secundários devido ao processo de pedogênese. Os valores de K para as áreas PA, FS1, FS2 e FS3 se mantiveram na faixa entre 2,2 mmol_c kg⁻¹ e 4,4 mmol_c kg⁻¹, no entanto a área FF apresentou valores mais altos, próximos de 6 mmol_c kg⁻¹, se destacando das

demais áreas. O Ca e o Mg variaram entre as áreas, porém apresentaram valores similares em profundidade. Os valores para acidez potencial e Al variaram pouco tanto entre as áreas quanto em profundidade, com a área PA apresentando maiores valores para Al nas camadas 0 -10 e 10 – 20 cm. Os maiores valores de CTC e SB foram observados na área FF e os menores valores na área FS3, apresentando o mesmo comportamento estatístico para todas as camadas analisadas. A percentagem de saturação por bases apresentou no geral valores considerados médios (entre 51 e 70), indicando solos férteis (eutróficos), com a CTC armazenando mais da metade dos cátions básicos, sendo para todas as camadas os maiores valores encontrados na área FF e os menores na área FS3. A percentagem de saturação por alumínio foi maior na área PA e menor na área FF, em todas as profundidades; em todas as áreas os menores valores foram observados na camada 0 – 10 cm (RAIJ et al., 1996).

Os teores de silte e argila apresentaram uma correlação linear positiva altamente significativa ($r^2 = 0,50$) (Figura 11). Devido aos altos teores de silte, a relação silte/argila foi superior a 0,7 em todas as áreas analisadas, caracterizando um solo pouco intemperizado quando comparado aos solos tropicais de textura média (EMBRAPA, 2006).

Figura 11. Correlação entre os teores de silte e argila das amostras de solo para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



3.2.2. Coleta e preparo das amostras de serapilheira

A coleta das amostras de serapilheira foi realizada com a utilização de molduras de 25 cm X 25 cm ($6,25 \times 10^{-6}$ ha), as quais foram alocadas em pontos próximos à coleta de solo. A amostragem foi realizada utilizando-se três repetições por parcela, com o propósito de caracterizar a serapilheira acumulada nas diferentes áreas do estudo. Para as áreas de pastagem toda a gramínea delimitada pela moldura foi removida e coletada.

Após a coleta as amostras foram secas em estufa (60°C por 72 horas), retiradas com pincel a terra, moídas e passadas em peneiras com malha de 0,15 mm para análise isotópica, elementar e de qualidade.

3.2.3. Coleta e preparo das amostras de solo

A profundidade estabelecida para coleta de amostras de solo foi de 30 cm com base na recomendação do Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC), devido ao maior acúmulo de matéria orgânica e maior atividade microbiana na camada superficial (IPCC, 1997).

A coleta das amostras de solo deformadas para análise da composição elementar de carbono e nitrogênio e abundância natural de C ($\delta^{13}\text{C}$) foi realizada com o auxílio de trado holandês, sendo coletadas três amostras compostas (constituídas por três amostras simples) para cada uma das profundidades (0 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 30 cm) em cada parcela.

As amostras foram secas ao ar (sob temperatura ambiente), separados o material vegetal, homogeneizadas (com a utilização de quarteador de Jones), destorroadas, moídas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para análise química e granulométrica, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente uma alíquota da amostra foi passada em peneira com malha de 0,15 mm para análise isotópica.

3.2.4. Densidade do solo

Para determinação da densidade do solo foram abertas minitrincheiras (30 cm de profundidade), e a coleta foi realizada a partir de amostra indeformada, coletada com auxílio de anel volumétrico (Kopecky) com diâmetro e altura de 5 cm, nas profundidades 0 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 30 cm. Após a coleta as amostras foram secas em estufa a 105°C

por 72 horas e determinadas as massas em balança analítica (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo foi então definida a partir da Equação 1:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

D_s = densidade do solo (g cm^{-3})

M_s = massa da amostra de solo seca a 105°C (g)

V_t = volume total do anel (cm^3)

3.2.5. Estoque da biomassa da serapilheira

O cálculo do estoque da biomassa da serapilheira foi efetuado dividindo-se a massa de matéria seca das amostras pela área da moldura utilizada na coleta ($6,25 \times 10^{-6}$ ha).

3.3. Análises químicas

3.3.1. Qualidade da serapilheira

As amostras de serapilheira foram analisadas quanto aos teores de hemicelulose, celulose e lignina. Para cada parcela foi analisada uma amostra composta (obtida pela mistura das três repetições), totalizando 15 amostras.

A fibra insolúvel em detergente neutro (FDN), a fibra insolúvel em detergente ácido (FDA) e o teor de lignina foram determinados segundo método proposto por AOAC 2011 (ID 973.18 e ID 2002.04) no Laboratório de Nutrição Animal do CENA/USP.

3.3.2. Teores elementares de C e N e composição isotópica de C ($\delta^{13}\text{C}$) da serapilheira e do solo

A determinação dos teores de carbono, nitrogênio total e carbono isotópico das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP, com a utilização do analisador elementar Carlo Erba (modelo CHN1110; Milão, Itália) acoplado ao espectrômetro de massa Thermo Scientific (modelo Delta Plus; Bremen, Alemanha). Os resultados isotópicos foram expressos na forma de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) em relação ao padrão internacional VPDB. Os valores isotópicos de C ($\delta^{13}\text{C}$) da serapilheira também foram quantificados pelo método acima descrito.

Os dados obtidos quanto ao do solo e da serapilheira tiveram seus valores comparados ao intervalo de variação típico para vegetação de floresta (C₃, na faixa de -22 a -32‰) e de pastagem (C₄, na faixa de -9 a -17‰).

Os teores de carbono da serapilheira foram analisados pelo método da mufla (GOLDIN, 1987), com secagem prévia das amostras em estufa a 55°C, por um período de 24 horas, visando eliminar toda a água presente nas amostras. Após esse período, os cadinhos de cerâmica com as amostras foram acondicionados em forno do tipo mufla e incinerados em uma temperatura de 550°C por 3 horas. Posteriormente acondicionou-se o conjunto (cadinho + resíduos) em dessecador e, em seguida, foi aferida a massa. O teor de matéria orgânica foi determinado em razão da perda de massa do material incinerado, considerando-se o material perdido pela queima conforme a equação 2:

$$MO (\%) = \frac{(M - (T - C) \times 100)}{M} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

M = massa inicial da amostra sem o cadinho (g)

C = tara do cadinho (g);

T = peso da cinza + cadinho (g)

A partir dos teores de matéria orgânica foram calculados os teores de carbono com utilização da Equação 3:

$$C = \frac{MO}{1,8} \quad \text{Equação (3)}$$

3.3.3. Estoques de C e N da serapilheira e do solo

O cálculo do estoque de carbono e nitrogênio na serapilheira foi realizado em função do teor total de C ou N (%), da massa de matéria seca e da área da moldura utilizada na coleta (625 cm² ou 6,25×10⁻⁶ ha), multiplicando-se a massa por unidade de área pela concentração do carbono e nitrogênio.

Os estoques de carbono e nitrogênio do solo foram calculados em função do teor total do elemento (%), da densidade do solo (g cm^{-3}) e da espessura da camada amostrada, utilizando-se a Equação 4 (BERNOUX et al., 1998; NEILL et al., 1997; VELDKAMP, 1994):

$$E = \frac{ds \times h \times T}{10} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

E = estoque de carbono ou nitrogênio (Mg ha^{-1})

ds = densidade do solo (g cm^{-3})

h = espessura da camada amostrada (cm)

T = teor de carbono ou nitrogênio do solo (%)

3.3.4. Estimativa da contribuição do tipo de vegetação C_3 e C_4 no carbono do solo

Para as áreas de pastagem e floresta secundária foram calculadas também a contribuição relativa de carbono (Equação 5) oriundo da vegetação nativa (C_3) e da vegetação da pastagem (C_4), a partir do modelo de diluição isotópica (ALVES et al., 2006; MARTINELLI et al., 2009):

$$\%MOS_f = \left[\frac{(\delta^{13}C_B - \delta^{13}C_A)}{(\delta^{13}C_F - \delta^{13}C_A)} \right] \times 100 \quad \text{Equação (5)}$$

$$\%MOS_A = 100 - \%MOS_f$$

Onde:

$\%MOS_f$ = proporção da matéria orgânica do solo derivada da vegetação nativa (C_3), que possui uma marcação natural $\delta^{13}C_F$

$\delta^{13}C_A$ = marcação natural da vegetação C_4 (‰)

$\delta^{13}C_B$ = marcação natural do C do solo sob a nova vegetação (‰)

$\delta^{13}C_F$ = marcação natural da vegetação C_3 (‰)

$\%MOS_A$ = proporção da matéria orgânica do solo derivada da vegetação C_4

3.3.5. Correção dos estoques de C e N do solo

Os estoques de C e N do solo podem ser corrigidos utilizando-se o método da última camada proposto por Bernoux, nos casos em que as densidades apresentam diferenças significativas (BERNOUX et al., 1998). Na discussão dos resultados e conclusão deste estudo foi descartada esta correção, por não haver diferença significativa entre as densidades e conseqüentemente entre os estoques com e sem correção (Apêndice A).

3.4. Análise Estatística dos dados

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com o propósito de conhecer as diferenças significativas entre as áreas de estudo para as variáveis analisadas. Posteriormente realizou-se Tukey a 10% de probabilidade ($p < 0,1$), a fim de identificar diferenças entre as áreas. Também foi aplicada a análise de componentes principais (PCA) para determinar as correlações entre as variáveis. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa Statistical Analysis Systems (SAS) 9.3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

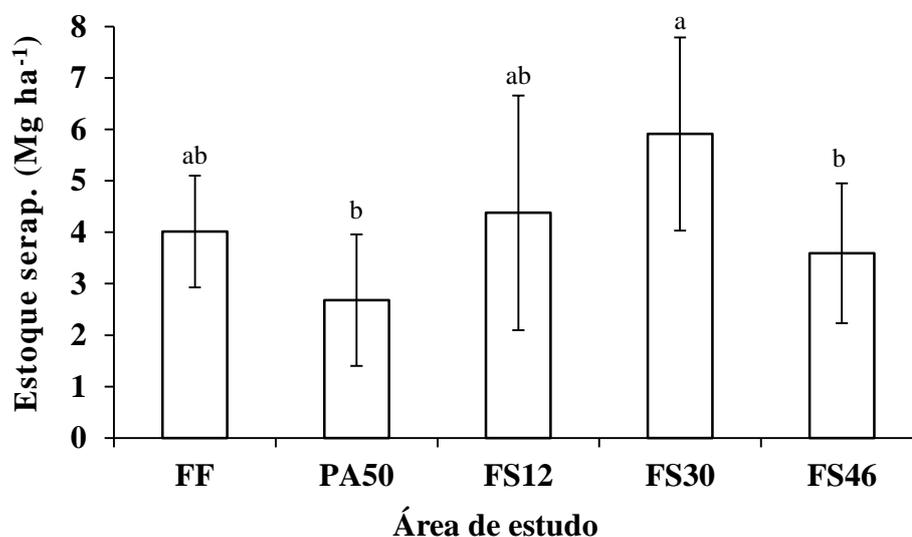
4.1. Caracterização da serapilheira

4.1.1. Estoque da biomassa da serapilheira

O estoque da biomassa da serapilheira é um dado importante por indicar a quantidade de material vegetal depositado sobre o solo e disponível para a decomposição, influenciando diretamente a liberação dos nutrientes e o aporte destes no solo.

Foi observado que o estoque de serapilheira entre as áreas de regeneração natural foi maior na FS30 (aproximadamente 6 Mg ha^{-1}), sendo semelhante a FS12 e diferindo da FS46 ($4,4$ e $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), conforme Figura 12. A área FS30 também diferiu da pastagem ($2,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), apresentando um estoque de serapilheira 50% maior em relação a PA50. Ressalta-se que todas as áreas de estudo apresentaram valores semelhantes à floresta fonte ($4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), reflexo da homogeneidade das condições climáticas observadas nas áreas de estudo, localizadas relativamente próximas (estando em uma área total de 20 km^2). A PA50, que foi constituída somente de gramíneas, apresentou apenas diferença em relação ao aporte de massa da regeneração de 30 anos, apesar da qualidade do material vegetal ser distinto em relação à floresta fonte (FF) e regenerações (PS12 e PS50), que são constituídas de plantas do ciclo fotossintético C_3 . Analisando apenas as regenerações nota-se que as em estágio médio (FS12 e FS30) obtiveram maiores estoques de serapilheira do que a no estágio avançado (FS46), o que pode ser explicado pela estabilização no padrão de deposição de serapilheira e diminuição da produtividade primária ocorrida com a substituição gradual das espécies pioneiras (as quais depositam maiores quantidades de serapilheira) em espécies não pioneiras no decorrer do processo de regeneração (BIANCHIN et al., 2016).

Figura 12. Estoque da biomassa da serapilheira (Mg ha^{-1}) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte ; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Os estoques obtidos foram relativamente baixos considerando outros estudos realizados em floresta estacional. No Parque Tecnológico de Viçosa (MG), em fragmento florestal naturalmente regenerado sob pastagem e eucalipto (floresta estacional semidecidual, regeneração com 20 anos) os estoques da biomassa foram iguais a $11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $11,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ (TORRES et al., 2013; AMARO, 2010). No Rio Grande do Sul, na comparação entre floresta secundária e nativa (floresta estacional) os estoques foram iguais a $5,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ para as florestas secundárias e $7,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a nativa (BRUN et al., 2001).

Entretanto, ressalta-se que a deposição de serapilheira sofre influência de diversos fatores, entre eles as espécies vegetais presentes, a qualidade da serapilheira, o estágio sucessional, a época da coleta, a formação florestal, as condições edafoclimáticas, o manejo e a taxa de decomposição (CALDEIRA et al., 2008).

4.1.2. Teores de C e N, relação C/N e composição isotópica do C ($\delta^{13}\text{C}$) na serapilheira

Os teores de C da serapilheira variaram de 452,3 g kg⁻¹ (PA50) a 491,1 g kg⁻¹ (FS46), estando acima da média estabelecida pelo IPCC, que sugere 370 g kg⁻¹ para a serapilheira (IPCC, 2006). O teor de C na serapilheira da FS46 foi superior às demais, diferindo estatisticamente das demais áreas. As áreas FF, PA50 e FS12 apresentaram resultados semelhantes entre si (Tabela 4).

Os teores de N da serapilheira variaram de 14,7 g kg⁻¹ (PA50) a 21,5 g kg⁻¹ (FS46). O teor de N na serapilheira foi semelhante entre a floresta fonte e todas as áreas em regeneração natural (Tabela 4). As áreas FS46 e FS30 apresentaram valores semelhantes, porém ambas diferiram da FS12, que é a área com menor de tempo de regeneração. A menor concentração de nitrogênio foi identificada na serapilheira da pastagem, porém sendo semelhante à FS12. Não houve diferença significativa entre todas as áreas de estudo para a relação C/N (Tabela 4).

Quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ a área PA50 diferiu estatisticamente das outras áreas, conforme era esperado, uma vez que apresenta plantas do ciclo fotossintético C₄. As áreas FF e as áreas de regeneração (FS12, FS30 e FS46) apresentaram valores típicos de vegetação florestal (intervalo médio de plantas do ciclo fotossintético C₃: -22 a -32 ‰), com valores entre -28,3‰ e -29,1‰, enquanto que a PA50 indicou valor típico de gramíneas (intervalo médio de plantas do ciclo fotossintético C₄: -9 a -17 ‰), com valor igual a -14,3‰ (BOUTTON, 1991).

Tabela 4. Teores de carbono e nitrogênio (g kg⁻¹), relação C/N e abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Área de Estudo	Teor C ----- (g kg ⁻¹)-----	Teor N	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
FF	463,6 ± 1,3 c	19,0 ± 1,7 ab	24 ± 1,9 a	-28,4 ± 0,1 b
PA50	452,3 ± 3,7 c	14,7 ± 0,5 c	29 ± 2,1 a	-14,3 ± 0,4 a
FS12	458,9 ± 2,2 c	16,5 ± 1,3 b	28 ± 1,7 a	-28,9 ± 0,2 b
FS30	470,8 ± 1,3 b	20,1 ± 1,0 a	23 ± 2,3 a	-28,3 ± 0,1 b
FS46	491,1 ± 0,7 a	21,5 ± 0,7 a	24 ± 1,7 a	-29,1 ± 0,3 b

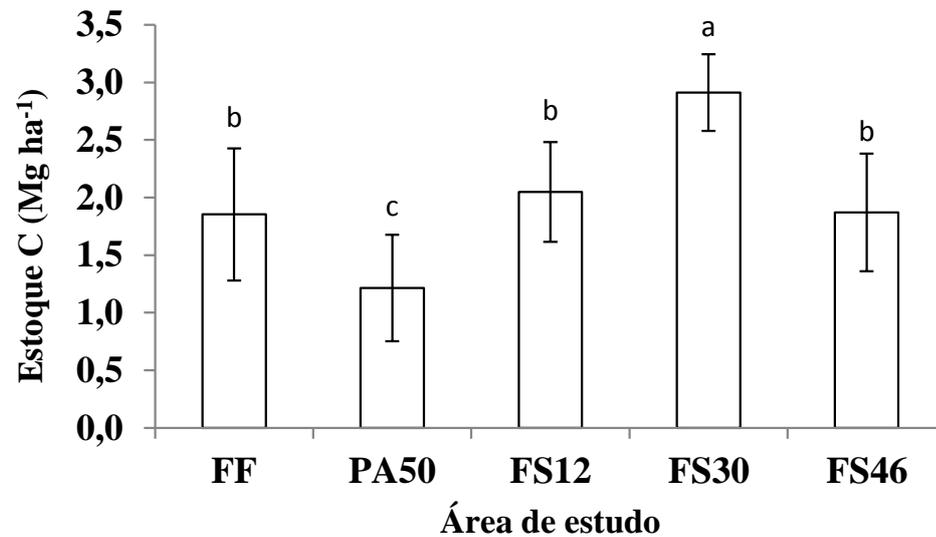
Os valores representam a média (n=9) ± erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, p<0,1). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Os teores de C e N obtidos neste estudo se aproximam dos resultados de outros trabalhos analisando pastagens e florestas tropicais. Em Viçosa (MG), em floresta estacional semidecidual os teores de C e N da serapilheira foram de 515 g kg^{-1} e $19,8 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente, e a relação C/N foi igual a 26 (PINTO et al., 2009). Em Cachoeiro de Itapemirim (ES), sob floresta estacional semidecidual submontana, os teores de carbono foram de $505,8 \text{ g kg}^{-1}$ e nitrogênio de $17,2 \text{ g kg}^{-1}$, com relação C/N igual a 30, sendo este valor um pouco maior do que o observado no presente trabalho (GODINHO et al., 2014). Outro estudo, realizado em São Gabriel (RS), analisando floresta estacional semidecidual encontrou teor de N igual a $15,7 \text{ g kg}^{-1}$ (VOGEL; SCHUMACHER, 2010). Enquanto que para pastagem, em André da Rocha (RS), os teores obtidos foram $413,1 \text{ g kg}^{-1}$ de C e $21,5 \text{ g kg}^{-1}$ de N, com relação C/N igual a 22 (DICK et al., 2008).

4.1.3. Estoques de C e N na serapilheira

O estoque de carbono na serapilheira foi bastante próximo entre as áreas de regeneração natural (FS12: $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, FS30: $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ e FS46: $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo a FS30 diferente das demais áreas. O menor estoque de carbono foi identificado na serapilheira da pastagem ($1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$), diferindo estatisticamente de todas as demais áreas (Figura 13). O valor médio estabelecido pelo IPCC para estoque de carbono em serapilheira para florestas tropicais é de $2,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor bastante semelhante ao encontrado neste trabalho nas áreas de floresta fonte e de floresta secundária (IPCC, 2006).

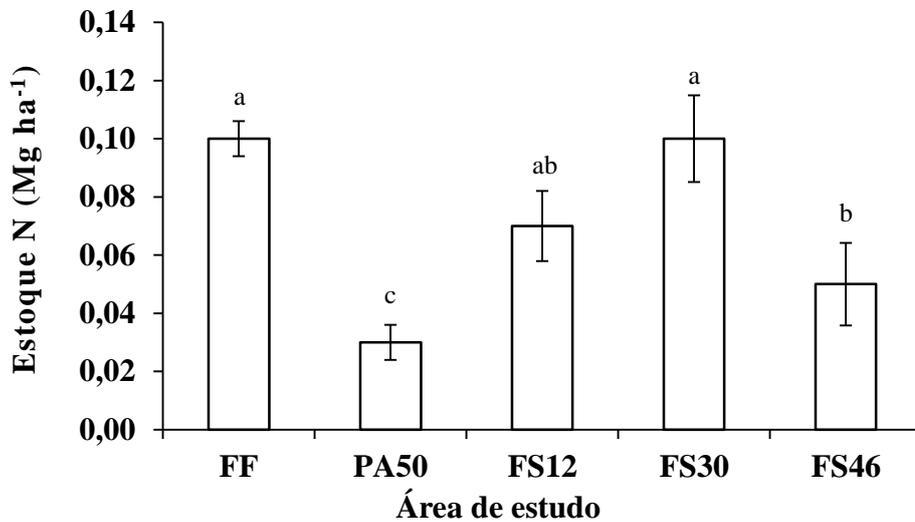
Figura 13. Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Quanto aos estoques de nitrogênio o menor valor encontrado foi na área PA50 ($0,03 \text{ Mg ha}^{-1}$), estatisticamente diferentes das demais áreas estudadas (Figura 14). As áreas FF e FS30 apresentaram valores semelhantes entre si, representando os maiores estoques ($0,10$ e $0,11 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

Figura 14. Estoque de nitrogênio (Mg ha^{-1}) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Os estoques de carbono e nitrogênio da serapilheira encontrados neste estudo se comportaram ambos de forma bastante semelhante entre as áreas. Em estudo realizado sob floresta ombrófila densa montana (Santa Maria Madalena – RJ) em dois fragmentos de floresta nativa (Mata Atlântica), os estoques de carbono foram de $3,51$ e $3,67 \text{ Mg ha}^{-1}$ e de nitrogênio $0,14$ e $1,56 \text{ Mg ha}^{-1}$, para cada um dos fragmentos (CUNHA et al., 2009). No Parque Tecnológico de Viçosa (MG), em fragmento florestal naturalmente regenerado sob pastagem e eucalipto (floresta estacional semidecidual montana) o estoque de carbono foi igual a $5,82 \text{ Mg ha}^{-1}$ (TORRES et al., 2013). Estudo comparando diferentes estádios sucessionais de florestas secundárias em General Carneiro (PR), em floresta ombrófila mista montana, encontrou estoques de carbono mais próximos ao presente estudo, com valores iguais a $2,9$, $3,3$ e $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente no estágio inicial, intermediário e avançado na floresta (WATZLAWICK et al., 2002).

4.1.4. Qualidade da serapilheira

Os valores de hemicelulose variaram de 138,0 g kg⁻¹ (FS12) a 230,6 g kg⁻¹ (PA50), sendo a área PA50 estatisticamente diferente das demais áreas. Quanto à celulose, os valores encontrados não diferiram estatisticamente, variando de 208,8 g kg⁻¹ (FF) a 258,7 g kg⁻¹ (PA50). Para a lignina a área PA50 novamente foi diferente estatisticamente das demais, com valor igual a 59,3 g kg⁻¹, enquanto as outras áreas apresentaram valores próximos entre si, com valores indicando que o material vegetal proveniente de florestas é mais rico em lignina e, portanto mais recalcitrante, refletindo em menores taxas de decomposição, menor labilidade do carbono e maior tempo de permanência no solo. Estes resultados estão dentro do esperado, uma vez que gramíneas e vegetação florestal possuem composições diferentes (Tabela 5).

Tabela 5. Teores de hemicelulose, celulose e lignina (g kg⁻¹) da serapilheira para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Área de estudo	Hemicelulose	Celulose	Lignina
	----- (g kg ⁻¹)-----		
FF	152,4 ± 12,1 b	208,8 ± 6,3 a	309,1 ± 11,2 a
PA50	230,6 ± 38,7 a	258,7 ± 36,9 a	59,3 ± 3,5 b
FS12	138,0 ± 59,6 b	229,3 ± 1,5 a	312,7 ± 41,1 a
FS30	150,4 ± 12,0 b	231,7 ± 7,7 a	318,2 ± 17,7 a
FS46	145,3 ± 15,5 b	233,2 ± 26,5 a	322,6 ± 24,2 a

Os valores representam a média (n=3) ± erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, p<0,1). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Em estudo conduzido no Parque Estadual do Desengano (RJ), em floresta ombrófila densa, a serapilheira coletada apresentou teor de celulose entre 150 e 200 g kg⁻¹ e de lignina entre 250 e 300 g kg⁻¹, estando estes valores bastante próximos aos obtidos neste estudo (MONTEIRO; GAMA-RODRIGUES, 2004). Para o caso das pastagens, em Viçosa (MG) analisando-se capim-gordura, capim-braquiária, capim-sapé e capim-jaraguá, o valor da celulose também foi muito maior do que a lignina, apresentando teor médio de lignina de 58 g kg⁻¹ e de celulose 300 g kg⁻¹ na matéria seca (BAUER et al., 2008). Em Prudente Morais (MG), a análise de capim-braquiária revelou teor de hemicelulose igual a 304 g kg⁻¹, de lignina igual a 57,3 g kg⁻¹ e de celulose 345 g kg⁻¹ (VIANA et al., 2010).

4.2. Análise do solo

4.2.1. Teores de C e N e relação C/N no solo

Em todas as camadas de solo analisadas apenas a Floresta Fonte apresentou resultados quanto ao teor de C significativamente diferentes das demais áreas, apresentando os maiores valores (Tabela 6). Os valores de C variaram de 10,5 a 23,3 g kg⁻¹ na camada de 0 – 10 cm, de 8,6 a 19,0 g kg⁻¹ na camada de 10 – 20 cm e de 6,6 a 12,3 g kg⁻¹ na camada de 20 – 30 cm, sendo os maiores valores identificados na FF e os menores na FS46, devido à sua textura arenosa (Tabela 2). Semelhante ao comportamento observado para os teores de carbono, os teores de nitrogênio foram maiores na FF, diferindo significativamente dos valores observados nas outras áreas (Tabela 6) Os valores de N variaram de 1,0 a 2,3 g kg⁻¹ na camada de 0 – 10 cm, de 0,9 a 1,9 g kg⁻¹ na camada de 10 – 20 cm e de 0,7 a 1,3 g kg⁻¹ na camada de 20 – 30 cm.

Tabela 6. Teores de carbono e nitrogênio (g kg⁻¹) e relação C/N no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Prof.	FF	PA50	FS12	FS30	FS46
C (g kg⁻¹)					
0 – 10 cm	23,3 ± 1,6 a	13,6 ± 1,0 b	13,7 ± 0,6 b	14,3 ± 0,9 b	10,5 ± 1,4 b
10 – 20 cm	19,0 ± 1,5 a	10,0 ± 0,6 b	10,9 ± 0,6 b	11,3 ± 1,0 b	8,6 ± 1,1 b
20 – 30 cm	12,3 ± 1,7 a	6,7 ± 0,4 b	7,1 ± 0,7 b	6,6 ± 0,5 b	7,5 ± 1,4 b
N (g kg⁻¹)					
0 – 10 cm	2,3 ± 0,1 a	1,3 ± 0,1 bc	1,4 ± 0,1 bc	1,5 ± 0,1 b	1,0 ± 0,1 c
10 – 20 cm	1,9 ± 0,1 a	1,0 ± 0,1 b	1,1 ± 0,1 b	1,2 ± 0,1 b	0,9 ± 0,1 b
20 – 30 cm	1,3 ± 0,1 a	0,7 ± 0,1 b	0,8 ± 0,1 b	0,8 ± 0,1 b	0,7 ± 0,1 b
Relação C/N					
0 – 10 cm	10 ± 0,2	11 ± 0,4	10 ± 0,3	10 ± 0,2	10 ± 0,3
10 – 20 cm	10 ± 0,2	10 ± 0,4	10 ± 0,2	9 ± 0,2	9 ± 0,3
20 – 30 cm	9 ± 0,3	9 ± 0,4	9 ± 0,1	8 ± 0,1	10 ± 0,3

Os valores representam a média (n=9) ± erro padrão. Letras diferentes nas linhas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas para a mesma camada (Tukey, p<0,1). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Observa-se um ligeiro aumento nos teores de C e N de acordo com o tempo de regeneração, sendo menores nas pastagens e aumentando conforme a floresta secundária torna-se mais antiga (porém não foi observada diferença estatística). Ressalta-se que a área FS46 apresentou os menores valores devido ao caráter mais arenoso do solo, o que resulta em maior lixiviação e menor tempo de permanência no solo (OLIVEIRA et al., 2015).

A relação C/N, assim como na análise da serapilheira, não variou estatisticamente entre as áreas (Tabela 6), apresentando valores entre 8 e 11, indicando ocorrência de mineralização da matéria orgânica e taxas semelhantes de decomposição entre as áreas.

No perfil do solo ocorre uma diminuição nos valores de C e N, devido à maior concentração de matéria orgânica, raízes e material em decomposição na superfície, além da maior atividade biológica e alta intensidade do processo de mineralização (LUIZÃO et al., 2007). Em solos florestais (Argissolo Amarelo Distrófico, teor de areia: 700 g kg⁻¹, teor de argila: 200 g kg⁻¹) ao longo de uma cronossequência de florestas secundárias (6, 20 e 40 anos), localizadas no Estado do Pará, observou a mesma tendência de diminuição dos teores em profundidade (FIGUEIRA, 2006).

Na comparação entre mata nativa e pastagem na bacia do rio Corumbataí, os teores de carbono e nitrogênio observados no solo (Latossolo textura arenosa a muito argilosa, 0 – 20 cm, com teores de areia variando de 300 a 800 g kg⁻¹ e de argila de 200 a 600 g kg⁻¹) foram menores aos do presente estudo, e também foi observada diminuição nos valores no perfil do solo. Os teores de carbono foram iguais a 18,9 g kg⁻¹ (mata nativa) e 9,5 g kg⁻¹ (pastagem) na camada 0 – 10 cm e 10,7 g kg⁻¹ (mata nativa) e 7,5 g kg⁻¹ (pastagem) na camada 10 – 20 cm. E os teores de nitrogênio iguais a 1,55 g kg⁻¹ (mata nativa) e 0,8 g kg⁻¹ (pastagem) na camada 0 – 10 cm e 0,9 g kg⁻¹ (mata nativa) e 0,6 g kg⁻¹ (pastagem) na camada 10 – 20 cm (MUNIZ, 2014).

4.2.2. Densidade do solo

Os valores de densidade encontrados não variaram significativamente entre as áreas (Tabela 7), porém observa-se em todas as áreas que na camada mais superficial (0 – 10 cm) a densidade é menor, ocorrendo um aumento na densidade em profundidade devido principalmente à diminuição na incorporação de matéria orgânica e sobre peso das camadas superiores.

Tabela 7. Densidade do solo (g cm^{-3}) para as diferentes camadas (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Área	0 - 10 cm	10 - 20 cm	20 - 30 cm
FF	$1,33 \pm 0,06$	$1,38 \pm 0,06$	$1,44 \pm 0,03$
PA50	$1,35 \pm 0,04$	$1,42 \pm 0,04$	$1,37 \pm 0,04$
FS12	$1,30 \pm 0,07$	$1,37 \pm 0,08$	$1,34 \pm 0,07$
FS30	$1,42 \pm 0,06$	$1,49 \pm 0,04$	$1,52 \pm 0,04$
FS46	$1,32 \pm 0,06$	$1,37 \pm 0,05$	$1,46 \pm 0,06$

Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas linhas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas para a mesma camada (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Tarré et al. (2001) comparando áreas de pastagem com 9 anos de uso e matas nativas adjacentes no sul do estado da Bahia (Latossolo, 0 – 20 cm) também não verificaram diferenças significativas entre as áreas, apesar da tendência de os maiores valores serem encontrados em pastagens. Muniz (2014), analisando solos de mata nativa e pastagem (Latossolo textura arenosa a muito argilosa, 0 – 20 cm, com teores de areia variando de 300 a 800 g kg^{-1} e de argila de 200 a 600 g kg^{-1}) na bacia do rio Corumbataí não verificou diferenças significativas entre as áreas, porém encontrou valores maiores de densidade do que o presente estudo, iguais a 1,31 g cm^{-3} (mata nativa) e 1,51 g cm^{-3} (pastagem) para a camada 0 - 10 cm e 1,46 g cm^{-3} (mata nativa) e 1,67 g cm^{-3} (pastagem) para a camada 10 – 20 cm.

4.2.3. Estoques de C e N no solo

Devido à ausência de variação significativa nos valores da densidade do solo entre as áreas desconsiderou-se a correção quanto aos estoques de carbono e nitrogênio. A tabela com os valores dos estoques de carbono e nitrogênio corrigidos e sem correção pode ser consultada no Apêndice A.

De maneira geral, os aportes de carbono e de nitrogênio foram maiores na camada superficial de todas as áreas. A área FF apresentou os maiores valores de estoque de C e N em todas as camadas, diferindo das demais áreas de estudo (Tabela 8).

Tabela 8. Estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm), para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

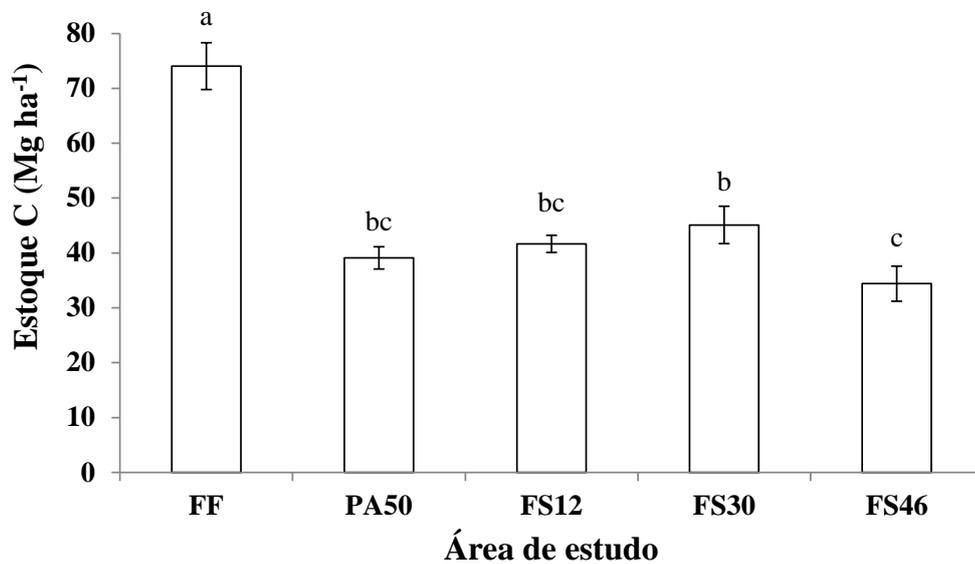
Prof.	FF	PA50	FS12	FS30	FS46
Estoque C (Mg ha^{-1})					
0 – 10 cm	$30,7 \pm 2,0$ a	$18,2 \pm 1,2$ b	$17,6 \pm 0,8$ b	$20,3 \pm 1,3$ c	$13,5 \pm 1,2$ bc
10 – 20 cm	$25,6 \pm 1,5$ a	$14,1 \pm 0,8$ b	$14,7 \pm 0,8$ b	$17,0 \pm 1,6$ b	$11,6 \pm 1,1$ b
20 – 30 cm	$17,7 \pm 2,3$ ab	$9,1 \pm 0,5$ ab	$9,3 \pm 0,7$ bc	$10,1 \pm 0,7$ a	$10,5 \pm 1,2$ c
Estoque N (Mg ha^{-1})					
0 – 10 cm	$3,0 \pm 0,2$ a	$1,7 \pm 0,1$ b	$1,8 \pm 0,1$ b	$2,1 \pm 0,1$ c	$1,4 \pm 0,1$ bc
10 – 20 cm	$2,6 \pm 0,1$ a	$1,4 \pm 0,1$ b	$1,6 \pm 0,1$ b	$1,9 \pm 0,1$ b	$1,2 \pm 0,1$ b
20 – 30 cm	$1,9 \pm 0,2$ a	$1,0 \pm 0,1$ ab	$1,1 \pm 0,1$ bc	$1,3 \pm 0,1$ ab	$1,1 \pm 0,1$ c

Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas linhas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas para a mesma camada (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Ao avaliar a camada do solo de 0 - 30 cm o estoque de C foi maior na FF ($74,1 \text{ Mg ha}^{-1}$), diferindo das demais (Figura 15). As áreas PA50, FS12 e FS30 foram semelhantes entre si ($41,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, $41,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, $47,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). A área FS46 ($35,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou semelhança apenas com a PA50.

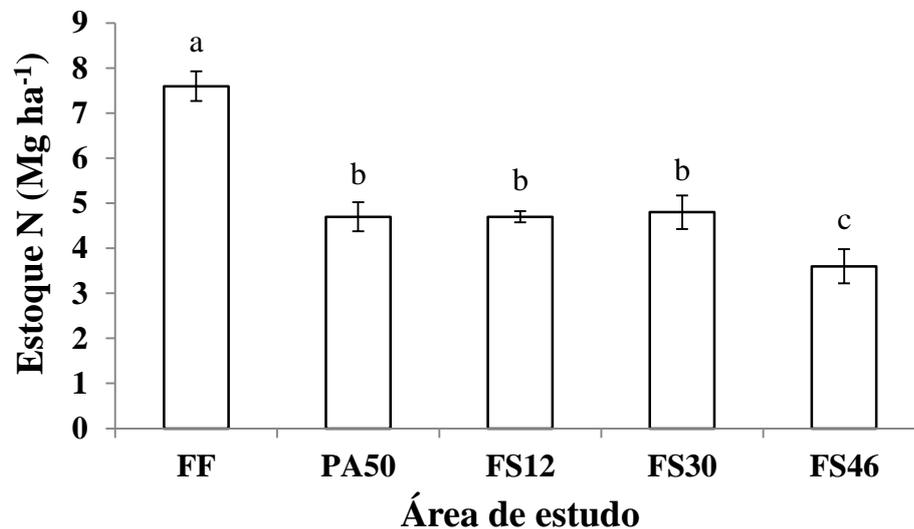
Quanto ao estoque de N na camada 0 - 30 cm de solo, a área FF também apresentou o maior valor ($7,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), e a área FS46 o menor valor ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo que ambas diferiram das demais (Figura 16). As áreas PA50, FS12 e FS30 apresentaram estoques de N semelhantes entre si ($4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, $4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

Figura 15. Estoques de carbono (Mg ha^{-1}) na camada total (0 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Figura 16. Estoques de nitrogênio (Mg ha^{-1}) na camada total (0 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

A área FS46 apresentou os menores valores tanto para o estoque de carbono quanto para o de nitrogênio, o que pode ser explicado pelo maior teor de areia, fator que influencia o

menor acúmulo de carbono na área devido proporcionar maiores perdas de matéria orgânica por lixiviação ou por percolação ao longo do perfil do solo (OLIVEIRA et al., 2015). Da mesma forma, Bayer et al. (2006) destacaram que o estoque de carbono no solo tende a ser maior em áreas com maior teor de argila, pois esta característica favorece estabilidade física da matéria orgânica. Vale ressaltar também que a área FS46 está em estágio sucessional avançado, quando comparada às áreas FS12 e FS30, logo suas entradas e saídas de C e N pela serapilheira estão em equilíbrio dinâmico, influenciando também no aporte de carbono no solo (DICKOW et al., 2012).

De maneira geral, os estoques de C e N foram semelhantes entre as áreas, com a floresta fonte apresentando resultados, em média, 40% superiores às demais áreas. Em uma revisão de literatura englobando mais de 80 áreas de floresta nativa tropical, os estoques de carbono (0 - 30 cm) observados foram de 79,9 Mg ha⁻¹, estando este valor próximo ao encontrado no presente estudo (MARIN-SPIOTTA; SHARMA, 2013). É válido ressaltar que ao comparar a floresta fonte e a pastagem, foi observada uma diferença de 32 Mg C ha⁻¹ da FF em relação à PA50 (Figura 15), confirmando os benefícios da regeneração natural em áreas anteriormente antropizadas.

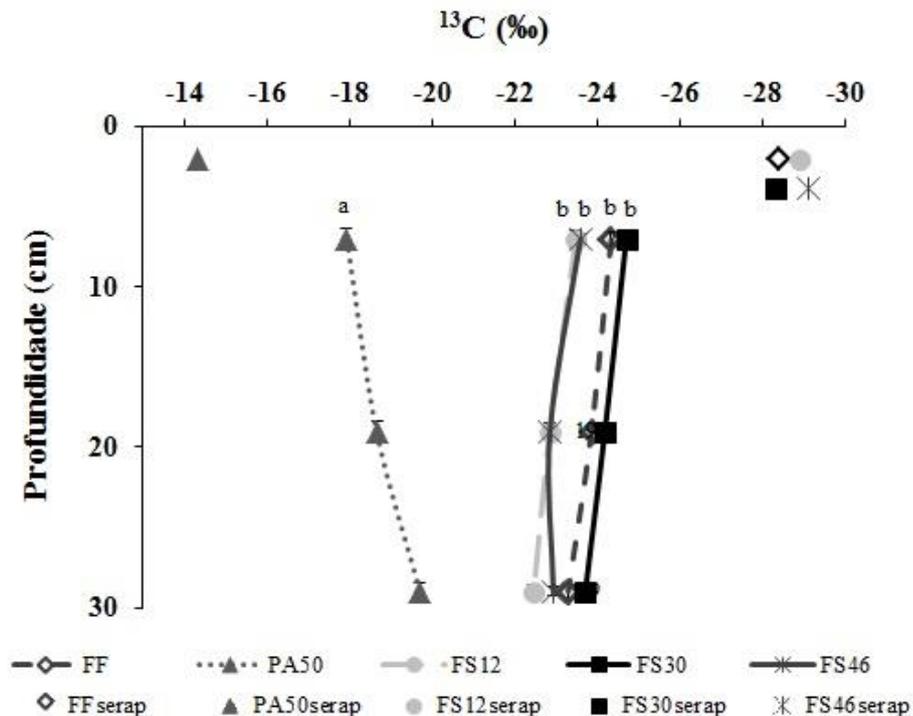
No Panamá, na análise do estoque de C no solo (Argissolo, 0 – 10 cm) em florestas secundárias com diferentes idades os valores obtidos foram iguais a 26,0, 27,5 e 34,1 Mg ha⁻¹ para as regenerações com 5, 12 e 100 anos, respectivamente, concluindo que os primeiros 15 anos de regeneração são restauraram a dinâmica do carbono (NEUMANN-COSEL et al., 2011). Na comparação entre mais de 100 áreas compostas por pastagem e mata nativa os estoques de C no solo (0 – 30 cm) obtidos para floresta nativa foram iguais a 72,3 Mg ha⁻¹, valor bastante próximo ao encontrado na floresta fonte deste estudo, e 59,5 Mg ha⁻¹ para pastagem, ficando este valor um pouco acima da pastagem utilizada neste trabalho (ASSAD et al., 2013).

Os valores de estoque de C nas florestas secundárias de até 30 anos foram semelhantes aos valores da pastagem deste trabalho, corroborando com os resultados encontrados por Coutinho et al. (2017). Tal resultado foi influenciado, principalmente, pelo fato do estudo ter sido conduzido apenas até a 30 cm do solo, camada onde está concentrado o sistema radicular das gramíneas, diferente do que acontece com o sistema radicular das espécies arbóreas. Sabe-se que o sistema radicular das pastagens, por ser fasciculado, apresenta caráter agressivo e abundante, favorecendo o aumento dos teores de C e de MOS (CORDEIRO et al., 2015), porém este não atinge camadas profundas do solo, ficando concentrado em até 30 cm a partir da superfície (SANTOS et al., 2007).

4.2.4. $\delta^{13}\text{C}$ no solo

Quanto aos valores obtidos para o $\delta^{13}\text{C}$ no solo as áreas de pastagem apresentaram valores típicos de vegetação C_4 , em torno de -18‰ , diferindo significativamente das áreas de floresta fonte e secundárias, que apresentaram valores entre -24 e -26 , intervalo também típico de vegetação C_3 . Nas áreas de floresta fonte e secundárias ocorreu um enriquecimento em profundidade, devido à maior atividade biológica na superfície do solo, comportamento este também observado em outros trabalhos (MARTINS, 2010; NARDOTO, 2005; TELLES, 2002). Pode-se notar a ocorrência do fracionamento a partir do aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira para o solo nas áreas de floresta fonte e floresta secundária (Figura 17).

Figura 17. Abundância natural de ^{13}C na serapilheira e no perfil do solo (0 – 10, 10 – 20 e 20 – 30 cm) para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)



As linhas representam os valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos para solo e os pontos os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira. Os valores representam a média ($n=9$) \pm erro padrão. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p<0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

A partir da análise do gráfico observa-se que a conversão de floresta nativa para pastagem incorpora ao solo uma matéria orgânica nova, proveniente de plantas do ciclo fotossintético C_4 , ocorrendo assim uma mistura entre C_3 (nativa) e C_4 (pastagem) e apresentando valores próximos de -18‰ . Ao decorrer da regeneração a incorporação da matéria orgânica proveniente dos regenerantes ocasiona um sinal isotópico típico de floresta

(em torno de -24‰), com as florestas secundárias apresentando valores muito próximos da floresta fonte, mesmo a floresta secundária mais jovem, com 8 a 16 anos. A área FS30 apresentou, embora não seja diferente estatisticamente, valor inferior ao obtido para FF, provavelmente devido à incorporação de novas espécies arbóreas.

Os resultados obtidos quanto ao carbono isotópico neste estudo coincide com outros trabalhos prévios. Na análise de mais de 100 áreas compostas por pastagem, mata nativa e plantio direto, nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, os valores isotópicos médios do solo (0 – 30 cm) obtidos foram -25,4‰ para mata nativa e -17,7‰ para pastagem (ASSAD et al., 2013). Na bacia do rio Corumbataí (Latosolo textura arenosa a muito argilosa, 0 – 20 cm, com teores de areia variando de 300 a 800 g kg⁻¹ e de argila de 200 a 600 g kg⁻¹) os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ para a camada 0 – 10 cm foram -26,5 e -25,8‰ para mata nativa e -15,5 e -16,9‰ para pastagem, e para a camada 10 – 20 cm os valores foram iguais a -25,8 e -24,8‰ para mata nativa e -18,4 e -20,6‰ para pastagem (MUNIZ, 2014).

Com o objetivo de investigar a origem do carbono presente nas áreas de estudo, utilizou-se o modelo de diluição isotópica (eq. 3). Com isso, estimou-se a contribuição do carbono oriundo de plantas de ciclo fotossintético C₃ e C₄ na composição da matéria orgânica do solo das áreas de pastagem, visando identificar o quanto ainda há de carbono remanescente da floresta nativa (C₃) no solo atualmente utilizado para pastagem, caracterizando assim a condição inicial do solo no qual ocorreram as regenerações (Tabela 9)

Para o cálculo das contribuições (%) foram utilizados os valores obtidos quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira na área de floresta fonte (-28,4‰) e na área de pastagem (-14,3‰), além do $\delta^{13}\text{C}$ da amostra de solo.

Tabela 9. Contribuição das vegetações C₃ e C₄ quanto ao carbono total para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro - SP)

Área de estudo	Prof	Estoque C (Mg ha ⁻¹)	$\delta^{13}\text{C}$ solo (‰)	Contribuição		Contribuição	
				C ₃	C ₄	C ₃	C ₄
				----- % -----		-----Mg ha ⁻¹ -----	
FF	0 – 10 cm	30,7	-24,3	100	0	30,7	0
FF	10 – 20 cm	25,6	-23,8	100	0	25,6	0
FF	20 – 30 cm	17,7	-23,3	100	0	17,7	0
PA50	0 – 10 cm	18,2	-17,9	25	75	4,5	13,7
PA50	10 – 20 cm	14,1	-18,6	30	70	4,2	9,9
PA50	20 – 30 cm	9,1	-19,7	38	62	3,5	5,6
FS12	0 – 10 cm	17,6	-23,6	64	36	11,3	6,3
FS12	10 – 20 cm	14,7	-23,0	59	41	8,7	6,0
FS12	20 – 30 cm	9,3	-22,5	56	44	5,2	4,1
FS30	0 – 10 cm	20,3	-24,6	73	27	14,8	5,5
FS30	10 – 20 cm	17,0	-24,0	69	31	11,7	5,3
FS30	20 – 30 cm	10,1	-23,6	66	34	6,6	3,5
FS46	0 – 10 cm	13,5	-23,6	62	38	8,6	4,9
FS46	10 – 20 cm	11,6	-22,8	57	43	6,6	5,0
FS46	20 – 30 cm	10,5	-23,0	58	42	6,1	4,4

Os valores representam a média (n=9) \pm erro padrão. Letras diferentes nas linhas indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas para a mesma camada (Tukey, $p < 0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

Em todas as camadas do solo da área de pastagem foi observada a contribuição significativa de material proveniente de vegetação C₃, não sendo assim suficiente o período de 50 anos para substituição completa da matéria orgânica proveniente da floresta nativa pela matéria orgânica proveniente da pastagem, principalmente nas camadas mais profundas, devido à migração da matéria orgânica mais antiga no perfil do solo e da maior profundidade alcançada pelas raízes de vegetação florestal em comparação às raízes de gramíneas.

Em 50 anos de uso da pastagem a contribuição de C oriundo da vegetação nativa (C₃) representa ainda 30% do carbono presente. Nas áreas de floresta secundária a contribuição da vegetação C₃ foi maior devido à presença da vegetação nativa remanescente somada à entrada da vegetação após a regeneração, representando de 56 a 73% do carbono total, porém ainda nota-se a contribuição da pastagem (entre 27 e 44%).

A substituição da matéria orgânica proveniente do uso anterior do solo (pastagem ou floresta nativa) após a regeneração é influenciada por diversos fatores, tais como tipo de solo, cobertura vegetal, decomposição da serapilheira, entre outros, sendo, portanto muito variável o tempo necessário para que isto ocorra. Em Camboriú (SC), na análise de Argissolos, Cambissolos e Gleissolos (1 m) foi observado que o período de 25 anos de pastagem não foi

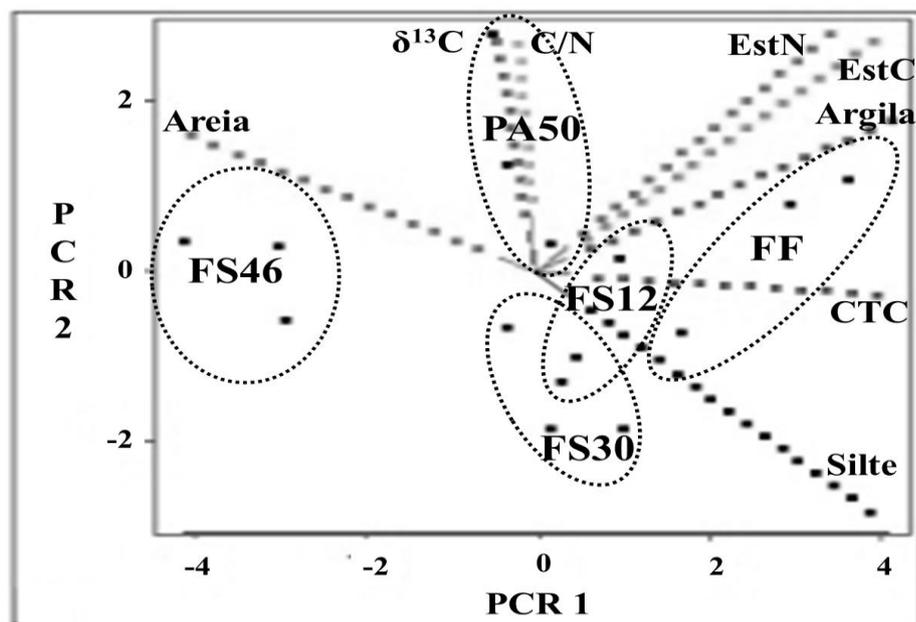
suficiente para substituir o carbono proveniente da floresta nativa, com a vegetação C₃ contribuindo em mais de 90%. Após 50 anos de pastagem nota-se uma maior contribuição da vegetação C₄ (em torno de 20 a 40%) sendo maior nas camadas mais superficiais, devido à incorporação da nova matéria orgânica, resultado influenciado pelo alto teor de areia na área, que favorece a perda de matéria orgânica quando comparado a um solo argiloso. Mesmo depois de decorridos mais de 70 anos de uso do solo para pastagem ainda há presença de C₃, principalmente nas camadas mais profundas, as quais contêm a matéria orgânica mais antiga proveniente da floresta nativa (DORTZBACH et al., 2015). Em contrapartida, foi observada na Costa Rica a substituição do carbono proveniente da pastagem em florestas secundárias após 10 anos do abandono da pastagem e recolonização pelas espécies florestais (SCHELDBAUER et al., 2007).

4.3. Análise multivariada

4.3.1. Análise de Componentes Principais no solo

Os resultados da análise de componentes principais estão ilustrados na Figura 18. Foram selecionados 8 atributos do solo, dentre eles: estoque de carbono, estoque de nitrogênio, ¹³C, relação C/N, CTC, areia, silte e argila, os quais estão representados no diagrama por retas. Os dois eixos da ACP, em conjunto, explicaram 76% da variância total dos elementos analisados, sendo levados em conta, portanto estes dois eixos para a discussão.

Figura 18. Diagrama da análise de componentes principais para os atributos do solo nas áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP) obtido com auxílio do programa SAS 9.3



FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

O eixo PCR1 apresentou maior correlação entre as variáveis CTC (0,93), argila (0,83) e silte (0,87), caracterizando uma estreita associação entre esses elementos. Enquanto que no eixo PCR 2 os maiores valores positivos foram observados para as variáveis C/N (0,85) e $\delta^{13}\text{C}$ (0,61), correlacionando assim estes atributos e destacando as diferenças entre as vegetações encontradas na pastagem (ciclo C_3 , com relação $\text{C/N}=24$ e $\delta^{13}\text{C}=-14,3\%$) e na floresta (ciclo C_4 , com relação $\text{C/N}=22$ e $\delta^{13}\text{C}=-28,4\%$).

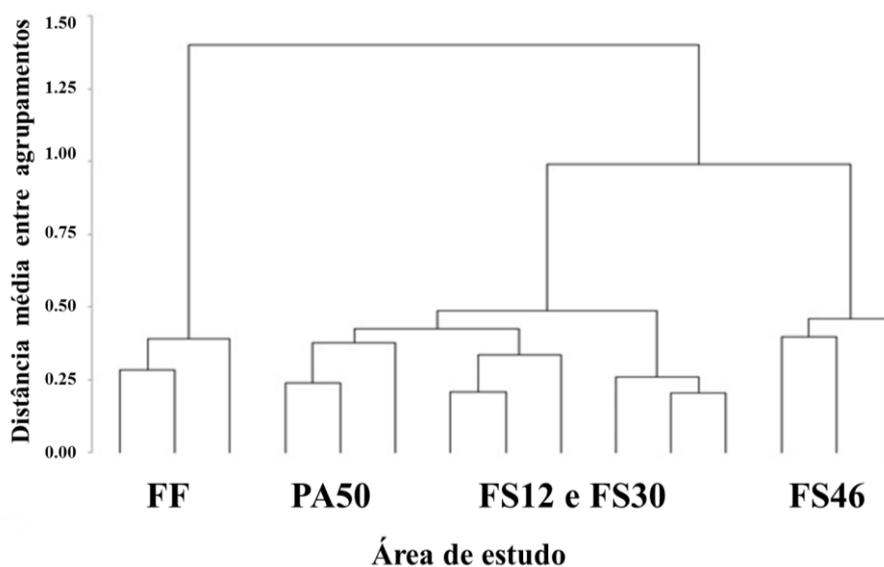
O agrupamento ocorreu de acordo com as diferentes áreas de estudo, permitindo uma boa distinção a partir do diagrama entre as áreas analisadas. A área FF apresentou maior correlação entre os valores de argila, estoque de carbono, estoque de nitrogênio e CTC, o que pode ser explicado pelo fato de que maiores teores de argila garantem uma maior estabilidade da matéria orgânica, elevando os valores dos estoques e da CTC (BAYER et al., 2006). A área PA apresentou consistente correlação com o $\delta^{13}\text{C}$ e a relação C/N, ressaltando a diferença entre o material vegetal presente nas áreas de pastagem (mais lábil, por haver menor teor de lignina e, portanto mais rápida decomposição pelos microrganismos presentes no solo) com relação às demais áreas. É importante destacar o posicionamento dos pontos referentes às áreas de pastagem (PA50) e à regeneração mais nova (FS12) bastante próximos à origem no diagrama, representando assim os menores valores para as variáveis analisadas.

As áreas FS12 e FS30 se posicionaram próximos no diagrama, denotando valores aproximados entre seus resultados, com influência do teor de silte. A área FS46 apresentou forte influência do teor de areia, sendo este um fator importante para diferenciar as áreas além de justificar o menor estoque de carbono, conforme Figura 17.

4.3.2. Análise de agrupamento

Para a realização da análise de agrupamento foram selecionados oito atributos do solo, dentre eles: estoque de carbono, estoque de nitrogênio, $\delta^{13}\text{C}$, relação C/N, CTC, areia, silte e argila, utilizando-se o método do vizinho mais próximo. Interpretando o dendrograma (Figura 19) obtido através da análise de agrupamento pode-se diferenciar as áreas FF, PA50 e FS46. Com relação às regenerações FS12 e FS30, o comportamento foi diferente do observado para as outras áreas, tendo sido agrupadas na mesma chave, demonstrando resultados muito próximos entre si. Além disso, para a distância média de 0.50 há maior similaridade entre os valores obtidos para as áreas FS12, FS30 e PA50, resultando em um agrupamento entre estas três áreas, o que indica condições mais próximas entre a área de pastagem e as regenerações mais novas. Aumentando a distância é possível ainda observar que a área FF apresenta um maior distanciamento das demais áreas, indicando que as condições encontradas nas regenerações ainda não retornaram às condições iniciais encontradas nas áreas de floresta fonte.

Figura 19. Dendrograma obtido através da análise de agrupamento realizada no programa SAS 9.3



FF Floresta Fonte; PA50: Pastagem 50 anos; FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos; FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos

O comportamento dos resultados observados nas áreas tende a agrupar inicialmente pastagem e regenerações mais novas (PA50, FS12 e FS30), e então a regeneração mais antiga (FS46), a qual apresenta solo com maior teor de areia em comparação às outras áreas, está localizada mais distante das outras regenerações, e por fim a área de floresta fonte (FF).

Este resultado evidencia a alteração do uso do solo ocorrido na área, sendo inicialmente floresta nativa, passando por um período de pastagem e então após o abandono da área a ocorrência do processo de regeneração natural.

5. CONCLUSÃO

Os fragmentos de floresta fonte, em relação às demais áreas de estudo, apresentaram maiores estoques de C e N no solo. A dinâmica do carbono e do nitrogênio não foi reestabelecida mesmo após 54 anos de regeneração, sendo necessário um maior período de tempo para observar diferenças significativas. Entretanto, ressalta-se que as regenerações proporcionaram ganhos de C superiores às áreas ocupadas por pastagem. Caso a área FS46 não apresentasse caráter tão arenoso e tivesse granulometria semelhante aos solos das outras parcelas, os estoques de carbono e nitrogênio poderiam ter sido maiores do que os observados. Portanto a textura, principalmente o teor de areia, influenciou a dinâmica do C e N nas áreas estudadas.

Embora os estoques de C no solo entre a área de pastagem e as áreas de floresta secundária tenham apresentado semelhança, vale ressaltar que a serapilheira da pastagem apresenta menor concentração de lignina, indicando maior susceptibilidade à decomposição, originando portanto um carbono com menor recalcitrância e tempo de permanência quando comparado às áreas de floresta.

REFERÊNCIAS

- ADUAN, R. E. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do Cerrado Brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p.
- AIDE, T. M.; ZIMMERMAN, J. K.; HERRERA, L.; ROSARIO, M.; SERRANO, M. Forest recovery in abandoned tropical pastures in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.77, p.77-86, 1995.
- ALVES, B. J. R. et al. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. In: ALVES, B. J. R. et al. **Emprego do isótopo estável ¹³C para o estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. cap. 13, p. 133-161.
- 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, 2011.
- ARYAL, D. R.; DE JONG, B. H. J.; OCHOA-GAONA, S.; ESPARZA-OLGUIN, L. Carbon stocks and changes in tropical secondary forest of southern Mexico. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 220-230, 2014.
- ASSAD, E. D. et al. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 10, n. 10, p. 6141-6160, 2013.
- ATLAS Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro: CEAPLA/IGCE/UNESP, 2011. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlas>>. Acesso em: 14 maio 2015.
- BASILE, A. **Caracterização estrutural e física de fragmentos florestais no contexto da paisagem da bacia do rio Corumbataí, SP**. 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 151-163, 1996.
- BAUER, M. O.; GOMIDE, J. A.; SILVA, E. A. M.; REGAZZI, A. J.; CHICHORRO, J. F. Características anatômicas e valor nutritivo de quatro gramíneas predominantes em pastagem natural de Viçosa, MG. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 9-17, 2008.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006.
- BERNOUX, M. et al. Modeling vertical distribution of carbon in Oxisols of the western Brazilian Amazon (Rondônia). **Soil Science**, Baltimore, v. 163, n. 12, p. 941-951, 1998.

BERNOUX, M. B. et al. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 888–896, 2002.

BIANCHIN, J. E.; MARQUES, R.; BRITZ, R. M.; CAPRETZ, R. L. Deposição de fitomassa em formações secundárias na Floresta Atlântica do Paraná. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 524-533, 2016.

BOENI, A. F. **Caracterização florística e fitossociológica de uma área em processo de restauração florestal comparada a uma área em sucessão secundária (regeneração natural) no Sul do Brasil**. 2016. 210 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BOUTTON, T. W. Stable carbon isotope ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine and freshwater environments. In: COLEMAN, D. C.; FRY, B. (Ed.). **Carbon isotope techniques**. New York: Academic Press, 1991. p. 173-185.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. cap. 1, p. 3-39.

BRAY, J. R.; GHORAN, E. Litter production in forest of the world. **Advances in Ecological Research**, London, v. 2, n. 1, p. 101-157, 1964.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 28, de 7 de dezembro de 1994a. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 248, de 30 dez. 1994a. Seção 1, p. 21348-21349. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 002, de 18 de março de 1994. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 59, de 28 mar. 1994b. p. 4513-4514. 1994b. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

BROWN, S. Tropical forests and the global carbon cycle: the need for sustainable land-use patterns. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 46, p. 31-44, 1993.

BRUN, E. J.; SCHUMACHER, M. V. ; VACCARO, S.; LONGHI, S. J.; KOENIG, F. G.; VARGAS, C. O. Decomposição da serapilheira produzida em três fases sucessionais de floresta estacional decidual no RS. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2001.

CALDEIRA, M. V. W.; VITORINO, M. D.; SCHAADT, S. S.; MORAES, E.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma floresta ombrófila densa. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 53-68, 2008.

CALVI, G. P.; PEREIRA, M. G.; ESPÍNDULA JÚNIOR, A. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes em áreas de floresta atlântica em Santa Maria de Jequitibá, ES. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 131-138, 2009.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CAMARGO, P. B.; TRUMBORE, S.E.; MARTINELLI, L.A.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VICTORIA, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forests of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, Oxford, v. 5, p. 693–702, 1999.

CANADELL, J. G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M. R.; FIELD, C. B.; BUITENHUIS, E. T.; CIAIS, P.; CONWAY, T. J.; GILLETT, N. P.; HOUGHTON, R. A.; MARLAND, G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 104, n. 47, p. 18866-18870, 2007.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CARDOSO, E. L. et al. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, p. 631-637, 2009.

CARVALHO, J. L. N. et al. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 183, p. 167-175, 2014.

CHAZDON, R. L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **Science**, Washington, DC, v. 320, n. 5882, p. 1458–1460, 2008.

CHAZDON, R. L.; BROADBENT, E. N.; ROZENDAAL, D. M. A. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, Washington, DC, v. 2, n. 5, p. 1-10, 2016.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, 2015.

COUTINHO, F. S.; PEREIRA, M. G.; MENEZES, C. E. G.; GUARESCHI, R. F.; ASSUNÇÃO, S. A. Atributos edáficos em áreas de agricultura, pastagem e três estágios sucessionais de floresta. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, e00091914, 2017.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; VELLOSO, A. C. X. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas montanas da Mata Atlântica na região norte do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1175-1185, 2009.

DAVIDSON, E. A. et al. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. **Nature**, London, v. 447, p. 995-998, 2007.

DE KONING, G. H. J.; VELDKAMP, E.; LÓPEZ-ULLOA, M. Quantification of carbon sequestration in soils following pasture to forest conversion in northwestern Ecuador. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC, v. 17, n. 4, p. 1098-1100, 2003.

DIAS, H. C. T. et al. Caracterização de solos altimontanos em dois transectos no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 469-481, 2003.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. ed. Belém: Edição do autor, 2011. 216 p.

DICK, D. P.; MARTINAZZO, R.; DALMOLIN, R. S. D.; JACQUES, A. V. A.; MIELNICZUK, J.; ROSA, A. S. Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 5, p. 633-640, 2008.

DICKOW, K. M. C.; MARQUES, R.; PINTO, C. B.; HOFER, H. Produção de serapilheira em diferentes fases sucessionais de uma floresta subtropical secundária, em Antonina, PR. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p.75-86, 2012.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: a meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, p. 1658–1670, 2011.

DORTZBACH, D. et al. Estoque de C e abundância natural de ^{13}C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1643-1660, 2015.

ECLESIA, R. P.; JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B.; BIGANZOLI, F.; PIÑEIRO, G. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, p. 3237–3251, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNCS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FASSBENDER, H. W. Ciclos da matéria orgânica e dos nutrientes em ecossistemas florestais dos trópicos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO: Reciclagem de Nutrientes e Agricultura de Baixos Insumos nos Trópicos, 16., 1985, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 1985.

FEARNSIDE, P. M.; GUIMARÃES, W. M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, p. 35-46, 1995.

FEHSE, J.; HOFSTEDÉ, R.; AGUIRRE, N.; PALADINES, C.; KOOIJMAN, A.; SEVINK, J. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 163, p. 9-25, 2002.

FELDPAUSCH, T. R. et al. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 14, n. 4, p. 164-176, 2004.

FERRAZ, S. F. B. et al. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 29, n. 2, p. 187-200, 2014.

FIGUEIRA, A. M. S. **Mudanças no uso e cobertura do solo na Amazônia e suas implicações no ciclo de nitrogênio**. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **Glossário de ciência do solo**. Viçosa: UFV-DPS, 1992. 142 p.

FAO. **Global forest resources Assessment 2010**. Rome: FAO, 2015. 378 p. (Forestry Paper, 163).

GODINHO, T. O.; CALDEIRAS, M. V. W.; ROCHA, J. H. T.; CALIMAN, J. P.; TRAZZI, P. A. Quantificação de biomassa e nutrientes na serapilheira acumulada em trecho de Floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 11-20, 2014.

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 18, p. 1111-1116, 1987.

GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de; BOEIRA, R. C.; TOLEDO, L. D. de. **Nutrientes vegetais no meio ambiente: ciclos bioquímicos, fertilizantes e corretivos**. 2. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 62 p.

HAAG, H. P. **Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 144 p.

HUGHES, R. F.; KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L. Dynamics of aboveground and soil carbon and nitrogen stocks and cycling of available nitrogen along a land-use gradient in Rondônia, Brazil. **Ecosystems**, New York, v. 5, n. 3, p. 244-259, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 275 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TerraClass: Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia**. São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2012.php>. Acesso em: 12 jun. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use**. Geneva: IPCC, 2006.

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000.

JOHN, B.; YAMASHITA, T.; LUDWIG, B.; FLESSA, H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. **Geoderma**, Amsterdam, v. 128, p. 63-79, 2005.

KOFFLER, N. F. Uso das terras da bacia do rio Corumbataí em 1990. **Geografia**, Rio Claro, v. 18, n. 1, p. 135-150, 1993.

KRONKA, F. J. N. O verde em São Paulo. Mapa Suplemento. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, v. 91, p. 48-53, 2003.

LAJTHA, K.; MARSHALL, J. D. Sources of variation in the stable isotopic composition of plants. In: LAJTHA, K.; MICHENER, R. H. (Ed.). **Stable isotopes in ecology and environmental science**. Oxford: Blackwell Scientific, 1994. cap. 1, p. 1-21.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global carbon budget 2015. **Earth System Science Data**, New York, v. 7, p. 349-396, 2015.

LOSS, A. et al. Carbon, nitrogen and the natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in macro and microaggregates. **Idesia**, Arica, v. 32, n. 4, p. 15-21, 2014.

LOURENÇO, L. S. **Traços de história de vida de três espécies de peixes em riachos da bacia do rio Corumbataí-SP**. 93 p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2013.

LUIZÃO, F. J. Ciclos de nutrientes na Amazônia: respostas às mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 57, p. 31-36, 2007.

LUO, Y. et al. Transient dynamics of terrestrial carbon storage: mathematical foundation and numeric examples. **Biogeosciences Discussions**, Katlenberg-Lindau, v. 5, n. 8, p. 1-47, 2016.

MARÍN-SPIOTTA, E.; SHARMA, S. Carbon storage in successional and plantation forest soils: a tropical analysis. **Global Ecology and Biogeography**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 105-117, 2013.

MARTINELLI, L. A. et al. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144 p.

MARTINELLI, L. A.; ALMEIDA, S.; BROWN, I. F.; MOREIRA, M. Z.; VICTORIA, R. L.; STERNBERG, L. S. L.; FERREIRA, C. A. C.; THOMAS, W. W. Stable carbon isotope ratio of tree leaves, boles and fine litter in a tropical forest in Rondônia, Brazil. **Oecologia**, Berlin, v. 114, p. 170-179, 1998.

MARTINELLI, L.A.; PESSENDA, L.C.R.; ESPINOZA, E.; CAMARGO, P.B.; TELLES, E.C.; CERRI, C.C.; VICTORIA, R.L.; ARAVENA, R.; RICHEY, J.; TRUMBORE, S. Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate change during the quaternary. **Oecologia**, Berlin, v. 106, n. 3, p. 376-381, 1996.

MARTINS, S. C. **Caracterização dos solos e serapilheira ao longo do gradiente altitudinal da Mata Atlântica, estado de São Paulo**. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MASON, C. F. **Decomposição**. São Paulo: EPU, 1980.

MEERSMANS, F. R.; CANTERS, F.; DE BAETS, S.; VAN MOLLE, M. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders Belgium). **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, p. 1-13, 2008.

MELILLO, J. M.; ABER, J. D.; MURATORE, J. F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. **Ecology**, Washington, DC, v. 63, p. 621-623, 1982.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 71, p. 149-154, 2006.

MONTEIRO, M. T.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 819-826, 2004.

MOORE, T. R. et al. Litter decomposition rates in Canadian forests. **Global Change Biology**, Oxford, v. 5, p. 75-82, 1999.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon rain forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 70, p. 63-81, 1996.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. S. Degradação de pastagens na região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, 2001.

MUNIZ, R. A. **Integridade do ecossistema, avaliada a partir da dinâmica de temperatura de superfície e estoque de carbono no solo, na bacia do rio Corumbataí, SP**. 137 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

NARDOTO, G. B. **Abundância natural de ^{15}N na Amazônia e Cerrado: implicações para a ciclagem de nitrogênio**. 2005. 99 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NAVARRETE, D.; SITCH, S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; PEDRONI, L. Conversion from forests to pastures in the Colombian Amazon leads to contrasting soil carbon dynamics depending on land management practices. **Global Change Biology**, Oxford, v. 22, p. 3503-3517, 2016.

NAVROSKI, M. C.; BIALI, L. J.; CAMARGO, L.; SCHUMACHER, M. V. Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Eucalyptus cloenziana*. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 535-540, 2010.

NEILL, C.; MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L.; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 7, p. 1216-1225, 1997.

NEUMANN-COSEL, L.; ZIMMERMANN, B.; HALL, J. S.; VAN BREUGEL, M.; ELSENBEEER, H. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures: a case study from Panama. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261, p. 1625-1633, 2011.

NUNES, S. S. S. **Estimativas de biomassa e carbono e indicadores para restauração de florestas secundárias em Paragominas, Pará**. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 71-93, 2015.

PARSONS, S. A.; CONGDON, R. A.; LAWLER, I. R. Determinants of the pathways of litter chemical decomposition in a tropical region. **New Phytologist**, New York, v. 203, n.3, p.873-882, 2014.

PAUL, S.; VELDKAMP, E.; FLESSA, H. Soil organic carbon in density fractions of tropical soils under forest-pasture-secondary forest land use changes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 59, n. 2, p. 359-371, 2008.

PEREIRA, L. H.; PINTO, S. A. F. Utilização de imagens aerofotográficas no mapeamento multitemporal do uso da terra e cobertura vegetal na bacia do rio Corumbataí – SP, com o suporte de sistemas de informações geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1321-1328.

PINTO, S. I. C.; MARTINS, S. V.; BARROS, N. F. de; DIAS, H. C. T. Ciclagem de nutrientes em dois trechos de floresta estacional semidecidual na reserva florestal mata do paraíso em Viçosa, MG, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 653-663, 2009.

POORTER, L. et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, London, v. 530, n. 7589, p. 211-214, 2016.

POST, W. M.; PASTOR, J.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Global patterns of soil nitrogen storage. **Nature**, London, v. 317, p. 613–616, 1985.

PUIG, C. J. **Carbon sequestration potential of land-cover types in the agricultural landscapes of eastern Amazonia, Brazil**. Göttingen: Cuvillier, 2005. 75 p. (Ecology and Development Series).

RAIJ, B. van et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, Barking, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RODRIGUES, R. R. A. **Vegetação de Piracicaba e municípios do entorno**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1989. 20 p.

ROSOLEN, V. et al. Impactos da substituição da vegetação original do cerrado brasileiro em sistemas agrícolas: alteração do carbono orgânico do solo e $\delta^{13}\text{C}$. **Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía**, Ciudad de México, v. 79, p. 39-47, 2012.

SANTANA, J. A. S.; SOUTO J. S. Produção de serapilheira na Caatinga da região semiárida do Rio Grande do Norte, Brasil. **Idesia**, Arica, v. 29, p. 87-94, 2011.

SANTOS, R.S.M. dos; OLIVEIRA, I.P. de; MORAIS, R.F. de; URQUIAGA, S.C.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.2, p.119-124, 2007.

SCHEDLBAUER, J. L.; KAVANAGH, K. L. Soil carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 1326-1335, 2008.

SCHMALENSEE, R.; STOCKER, T. M.; JUDSON, R. A. World carbon dioxide emissions: 1950-2050. **Review of Economics and Statistics**, Cambridge, v. 80, p. 15-27, 1998.

SILVA, A. M.; NOGUEIRA, D. P.; IKEMATSU, P.; SILVEIRA, F. M.; BOMBACK, M.; ALVES, S. H.; PAULA, F. P.; CAMARGO, P. B. Carbon stocks and isotopic composition of the organic matter in soils covered by native vegetation and pasture in Sorocaba, SP, Brazil. **International Journal of Environmental Research**, Tehran, v. 3, n. 3, p. 435-440, 2009.

SILVER, W. L.; OSTERTAG, R.; LUGO, A. E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. **Restoration Ecology**, New York, v. 8, n. 4, p. 394-407, 2000.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2015-2016**. São Paulo: SOS Mata Atlântica, 2017. 69 p. (Relatório Técnico).

TARRÉ, R. M.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; REZENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 234, p. 15-26, 2001.

TELLES, E. C. C. **Dinâmica de carbono no solo influenciada pela textura, drenagem, mineralogia e carvões em florestas primárias na região centro-oriental da Amazônia.** 114 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

TELLES, E. C. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; COSTA, E. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC, v. 17, n. 2, p. 9.1-9.12, 2003.

TORRES, C. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SANTOS, R. D.; CASTRO NETO, F.; Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma Floresta Estacional semidecidual, no Parque Tecnológico de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n. 4, p. 647-655, 2013.

VALENTE, R. O. A. **Análise da estrutura da paisagem na bacia do rio Corumbataí, SP.** 161 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

VALENTE, R. O. A.; VETTORAZZI, C. A. **Mapeamento de uso e cobertura do solo da bacia do rio Corumbataí, SP.** Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2003. 11 p.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 175-180, 1994.

VIANA, M. C. M.; FREIRE, F. M.; FERREIRA, J. J.; MACÊDO, A. R.; CANTARUTTI, R. B.; MASCARENHAS, M. H. T. Adubação nitrogenada na produção e composição química do capim-braquiária sob pastejo rotacionado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 7, p. 1497-1503, 2011.

VITAL, A. R. T.; GUERRINI, I. A.; FRANKEN, W. K.; FONSECA, R. C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 793-800, 2004.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD JUNIOR, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 17, p. 137-167, 1986.

VOGEL, H. L. M.; SHUMACHER, M. V. Quantificação dos nutrientes na serapilheira em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em São Gabriel-RS, Brasil. In: FERTBIO, 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: FERTBIO, 2010.

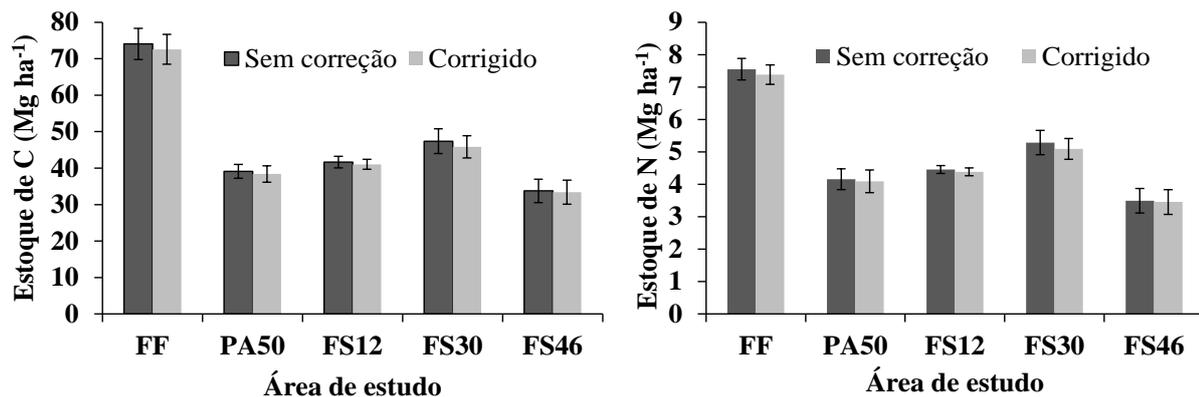
WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; VIEIRE, M.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana, Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 353-362, 2012.

ZAMPIN, I. C.; RIBEIRO, S. L. Análise ambiental, sustentabilidade e recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Corumbataí-SP. **Gestão em Foco**, Rio Claro, v. 6, n. 1, p. 37-57, 2013.

APÊNDICE

APÊNDICE A. Comparativo entre os estoques de carbono e nitrogênio sem correção e corrigidos para a camada 0-30 cm em todas as áreas estudadas.

Estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) na camada total analisada (0 – 30 cm), sem correção e corrigidos para as áreas estudadas na bacia do rio Corumbataí (Rio Claro – SP)



Os valores representam a média \pm erro padrão, Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as áreas estudadas (Tukey, $p < 0,1$). FF: Floresta Fonte; PA50: Pastagem, FS12: Floresta Secundária com 8 – 16 anos, FS30: Floresta Secundária com 21 – 38 anos e FS46: Floresta Secundária com 38 – 54 anos