

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Ciclagem do nitrogênio em uma cronosequência formada por florestas restauradas e floresta natural**

**Nino Tavares Amazonas**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Recursos Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas Florestais**

**Piracicaba  
2010**

Nino Tavares Amazonas  
Bacharel em Ciências Biológicas

**Ciclagem do nitrogênio em uma cronosequência formada por florestas restauradas e floresta natural**

Orientador:  
Prof. Dr. **RICARDO RIBEIRO RODRIGUES**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Recursos Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas Florestais**

**Piracicaba  
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Amazonas, Nino Tavares

Ciclagem do nitrogênio em uma cronosequência formada por florestas restauradas e floresta natural / Nino Tavares Amazonas. - - Piracicaba, 2010.  
93 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.  
Bibliografia.

1. Ecossistemas florestais - Restauração 2. Florestas 3. Isótopos estáveis 4. Nitrogênio  
5. Nutrição vegetal 6. Reflorestamento I. Título

CDD 634.94  
A489c

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**

Dedico este trabalho a todos aqueles que admiram  
e reverenciam as florestas...



## AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre me apoiou em todas as etapas da minha vida, me acompanhando e incentivando a dar passos cada vez mais firmes em frente; obrigado pelo carinho, pelos maravilhosos finais de semana, pelos telefonemas e pela presença constante;

Aos amigos de longe e aos de perto, que fortuitamente são muitos e verdadeiros, por estarem ao meu lado sempre que preciso, e por fazerem da vida uma caminhada mais feliz; agradecimentos especiais a Eduardo Muxfeldt, um grande amigo que me apresentou a Floresta da Tijuca, que despertou meu interesse por restauração florestal;

Ao Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Rodrigues, pela oportunidade de realização desse mestrado e pela ideia inicial e pelo apoio ao projeto; pela estrutura do laboratório para realização das coletas, processamento e armazenamento das amostras; e pelas considerações na versão final da dissertação;

Ao Prof. Dr. Luiz Antônio Martinelli (Zebu), pela co-orientação no mestrado, pela prontidão em ajudar sempre que necessário, e por arcar com as análises isotópicas e ceder toda a estrutura do laboratório para processamento, armazenamento e análises das amostras; e pelas considerações na versão final da dissertação;

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marisa de Cássia Piccolo, pela co-orientação, pelas reuniões em sua agenda apertada, e por ceder a estrutura do laboratório, equipamentos e reagentes para análises relacionadas à mineralização do nitrogênio;

Ao Prof. Dr. Hilton Thadeu Zarate Couto, por me auxiliar com todo o delineamento estatístico e análises estatísticas da pesquisa;

Às pesquisadoras Gabriela Nardoto e Simone Vieira, pelo auxílio no delineamento experimental e ajustes na metodologia;

Ao Prof. Dr. Plínio Camargo, por revisar os resultados das análises isotópicas antes de me enviar;

Ao Prof. Dr. Sergius Gandolfi, pelas dicas valiosas, pelo envio de artigos e sugestões de leitura, além de ser um exemplo de pesquisador e de pessoa, sempre humilde e acessível em todas as horas;

Ao Marcelo Corrêa, pela ajuda com o SAS e pelas dicas de estatística;

Ao Departamento de Produção Vegetal, pelo empréstimo da estufa para secagem de algumas amostras;

Ao Prof. Dr. Fernando Martins, por ceder o banco de dados disponível de levantamento fitossociológico da Mata Ribeirão Cachoeira;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela concessão da bolsa de estudos;

Ao pessoal do LCF (Departamento de Ciências Florestais), pelo apoio à realização dessa pesquisa, especialmente à Catarina Germuts, por ser sempre tão solícita;

A todos os colegas do LERF (Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal), pela troca de experiências e conhecimento, pelo companheirismo no dia-a-dia, pelas boas risadas (muitas e muito boas risadas!), e pelo incentivo constante nessa etapa da minha formação pessoal e profissional; e por fazerem desses anos em Piracicaba uma época inesquecível;

Ao pessoal do LEI (Laboratório de Ecologia Isotópica), pelas dicas e ajuda na parte laboratorial trabalho, pelos cafezinhos nos intervalos, e pela animação do laboratório;

Aos colegas que ajudaram nas coletas, e formaram um verdadeiro mutirão, sem o qual esse trabalho jamais poderia ter sido realizado da maneira que foi. Desde os que ajudaram na saga da seleção das áreas de estudo bem no começo: Nilton de Carvalho Amazonas (meu pai), Rafael

Chaves, Pablo, Paulo Toledo, Fábria Andrade, Renata Gabriela, Michelle Pegorini Bordini, Francisco C. Antonioli (Chicão), Fabiano Farah (Stalonge), Larissa Veiga (Larissinha), Letícia Couto Garcia, entre outros;

Aos que participaram no levantamento fitossociológico: Marcelo Pinho (Pinus), Jeanne Bourlegat, Débora Rother, Ricardo Viani (Ricardinho), Larissa Veiga (Larissinha), Marta Muniz, Michelle Pegorini Bordini, Otávio Augusto, Lígia (Liginha), Juliano van Melis (Pequeno), entre outros;

Aos que ajudaram nas árduas coletas de amostras: Mateus Terceti, Gabriele Preiskorn, Iuri Tavares Amazonas (meu irmão), Milene Biancchi dos Santos, Juliana Feres, Larissa Veiga, Marcus Vinícius Gurgel do Amaral (Maverick), Ricardo Gomes César (Xau-lim), Marta Muniz, Allan Camatta Monico, Larissa Muniz, Ludmila, Caju, Marcus, Gabriela Tieko, Mayara Pessoa, entre outros;

Aos que participaram do trabalho no laboratório: Ricardo (Xau-lim), Allan Camatta Monico, Marcus Vinícius Gurgel do Amaral (Maverick), Juliana Feres, Leandro Aranha, Pedro de Sá, Marcele, entre outros; agradecimentos especiais a Ricardo Gomes César (Xau-lim), que não mediu esforços pra ajudar nas coletas e no trabalho de laboratório, abrindo mão até de finais de semana (Xau, você é “O melhor” estagiário de todos os tempos!);

À Elisângela, pelo cuidado com todos nós no LERF e pelos deliciosos bolos e cafés nos intervalos;

Ao Francisco C. Antonioli (Chicão), Fabiana Fracassi, Luiz Otávio, Graziela, Simoni e Toninha, pelo auxílio com todo o trabalho de laboratório no LEI;

À Juliana Feres (Ju), que mora no meu coração e tem sido uma ótima companheira, tendo participado inclusive das coletas e do trabalho de laboratório;

Às minhas queridas vizinhas, Natalia e Carol, que sempre foram ótimas amigas e sempre me fizeram sentir-me em casa na casa delas;

Aos colegas de república do Atlanta: Mateus, Gustavo, Amarildo, Paulo e Marcos; e aos colegas de república do Venezia (Eu, Tu, Eles): Leandro, Marta, Adriana e Allan. Conviver com todos vocês me ensinou bastante e me fez amadurecer com alegrias, bons momentos, responsabilidade e até brigas, como não poderia deixar de ser. Jamais vou esquecer vocês pessoal;

Finalmente, agradeço a todos os demais que de alguma forma participaram da realização desse trabalho e que não foram citados aqui.

**“Muita luz é como muita sombra: não deixa ver.”  
(Carlos Castañeda)**





## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	11
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>RESUMEN</b> .....	15
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	18
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	19
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	21
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b> .....	29
<b>2.1 Materiais e Métodos</b> .....	29
<b>2.1.1 Áreas de Estudo</b> .....	29
<b>2.1.1.1 Mata Ribeirão Cachoeira</b> .....	30
<b>2.1.1.2 Cosmópolis</b> .....	32
<b>2.1.1.3 Iracemápolis</b> .....	34
<b>2.1.2 Parâmetros indicadores</b> .....	36
<b>2.1.3 Delineamento Experimental, Amostragem e Preparo das Amostras</b> .....	36
<b>2.1.3.1 Mineralização do N</b> .....	37
<b>2.1.3.1.1 Amostragem</b> .....	37
<b>2.1.3.1.2 Preparo das amostras</b> .....	38
<b>2.1.3.1.3 Análises químicas</b> .....	38
<b>2.1.3.2 Solo</b> .....	39
<b>2.1.3.2.1 Caracterização do solo das áreas de estudo</b> .....	39
<b>2.1.3.2.2 Amostragem</b> .....	39
<b>2.1.3.2.3 Preparo das amostras e análise isotópica</b> .....	40
<b>2.1.3.3 Folhagem verde</b> .....	40
<b>2.1.3.3.1 Amostragem</b> .....	40
<b>2.1.3.3.2 Preparo das amostras e análise isotópica</b> .....	41
<b>2.1.3.4 Serrapilheira</b> .....	41
<b>2.1.3.4.1 Amostragem</b> .....	41
<b>2.1.3.4.2 Preparo das amostras e análise isotópica</b> .....	42
<b>2.1.3.5 Razão N:P da comunidade</b> .....	42
<b>2.1.4 Análises Estatísticas</b> .....	43
<b>2.2 Resultados</b> .....	43
<b>2.2.1 Taxas Líquidas de Mineralização e Nitrificação do N</b> .....	43
<b>2.2.2 Solo: teor de N e abundância natural de <math>^{15}\text{N}</math></b> .....	51
<b>2.2.3 Folhagem verde</b> .....	54
<b>2.2.4 Razão N:P da comunidade</b> .....	58
<b>2.3 Discussão</b> .....	61
<b>2.3.1 Mudanças na dinâmica do nitrogênio nos solos ao longo da cronosequência</b> .....	61
<b>2.3.2 Variações nos teores de N e valores de <math>\delta^{15}\text{N}</math> foliar ao longo da cronosequência</b> .....	64
<b>2.3.3 Mecanismos de acumulação de N nas florestas restauradas</b> .....	67
<b>3 CONCLUSÃO</b> .....	69
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71
<b>ANEXOS</b> .....	81



## RESUMO

### **Ciclagem do nitrogênio em uma cronosequência formada por florestas restauradas e floresta natural**

A recuperação de funções e processos ecossistêmicos, entre outros atributos, é um dos indicadores mais importantes no processo de retorno de um ecossistema à sua trajetória histórica. A ciclagem de nutrientes é um atributo fundamental do ecossistema, e relaciona-se diretamente à regulação do funcionamento e do desenvolvimento dos ecossistemas e inclui, em um modelo geral, as entradas de nutrientes, as transferências internas entre plantas e solo e as saídas do sistema. A compreensão das mudanças nos processos biogeoquímicos durante a sucessão secundária em áreas em restauração ecológica ainda é incipiente, principalmente em áreas de florestas tropicais. Esse estudo tem por objetivo elucidar a dinâmica do nitrogênio ao longo do processo de restauração ecológica em áreas reflorestadas com espécies nativas da Mata Atlântica. A questão norteadora deste estudo é a seguinte: “A restauração florestal com alta diversidade de espécies e predominância de espécies arbóreas nativas regionais restaura a dinâmica original do nitrogênio?” Esse estudo visa investigar o funcionamento da ciclagem de nutrientes, com foco no nitrogênio, que é um elemento limitante à sucessão secundária, especialmente em florestas tropicais. Para tal, alguns indicadores da ciclagem do nitrogênio foram mensurados em uma cronosequência florestal formada por uma floresta natural preservada e florestas restauradas de diferentes idades (21 e 52 anos) reflorestadas com alta diversidade de espécies e predominância de nativas regionais. Os indicadores utilizados foram:  $\delta^{15}\text{N}$  e teor de N da vegetação, serrapilheira e solo; razão N:P da vegetação e da serrapilheira; taxas líquidas de mineralização e nitrificação; teor de amônio, nitrato, N mineral e razão nitrato:amônio. As florestas foram amostradas entre agosto de 2008 e abril de 2009, nas seguintes estações: seca, transição entre seca e chuvosa, chuvosa, e transição entre chuvosa e seca. Foram encontrados padrões claros de mudanças na ciclagem do N ao longo da cronosequência estudada, incluindo diferenças nos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar, teor de N, razão N:P, N mineral e taxas líquidas de mineralização e nitrificação, caracterizadas por um aumento de valores médios dessas variáveis ao longo da cronosequência. Os resultados encontrados sugerem que as florestas em processo de restauração, mesmo a de 52 anos, ainda não possuem uma ciclagem de N característica de uma floresta madura e, portanto, a recuperação da ciclagem de N ainda não foi completamente atingida. Entretanto, é possível afirmar que as florestas em processo de restauração estudadas estão seguindo uma trajetória de desenvolvimento caracterizada por uma ciclagem de N cada vez mais parecida com a de uma floresta natural madura, como a da floresta natural madura utilizada como referência. Através dos modelos de restauração utilizados para as florestas da cronosequência estudada, os processos da ciclagem do N são recuperados à medida que a floresta desenvolve-se, com uma clara tendência de mudança na economia de N para economia de P típica de florestas tropicais maduras.

Palavras-chave: Restauração ecológica; Ciclo do nitrogênio; Abundância natural de  $^{15}\text{N}$ ; Mineralização do N



## ABSTRACT

### **Nitrogen cycling in a chronosequence formed by restored forests and a natural forest**

The recuperation of ecosystem processes and functions, among other attributes, is one of the most important indicators in the process of return of an ecosystem to its historic trajectory. Nutrient cycling is a fundamental ecosystem attribute, and relates directly to regulation of functioning and development of ecosystems and includes, in a general model, nutrients entering, being transferred internally between plants and soil, and leaving the system. The comprehension of changes in biogeochemical processes during secondary succession in areas in ecological restoration is still incipient, mainly in tropical forests. This study aims to elucidate nitrogen dynamics along the process of ecological restoration in areas reforested with Atlantic Forest native species. The question driving this study is: “Does ecological restoration with high diversity of species and predominance of regional native tree species restore nitrogen original dynamics?” This research investigated nutrients cycling functioning, focusing on nitrogen, which is a limiting nutrient in secondary succession, particularly in tropical forests. In order to do so, some indicators of nutrient cycling were assessed in a forest chronosequence formed by a preserved natural forest and restored forests of different ages (21 and 52 years) reforested using high species diversity and predominance of regional native species. The indicators used were:  $\delta^{15}\text{N}$  and N content in green foliage, litter and soil; N:P ratio of green foliage and litter; net mineralization and net nitrification rates; content of ammonium, nitrate, inorganic N, and nitrate:ammonium ratio. The forests were sampled between August 2008 and April 2009, in the following seasons: dry, dry-rainy transition, rainy, rainy-dry transition. Clear patterns of change in the N cycling along the studied chronosequence were found, including differences in green foliage  $\delta^{15}\text{N}$  values, N content, N:P ratio, inorganic N and net mineralization and nitrification rates, characterized by an increase in the mean values of these variables along the chronosequence. The results found suggest that the forests in restoration process, even the 52 years old one, still do not present a N cycling characteristic of a mature forest and, therefore, the recuperation of the N cycling was not completely reached yet. However, it is possible to state that the forests in restoration process studied here are following a development trajectory characterized by a N cycling progressively more similar to what is common to a mature native forest, as the one used as the reference ecosystem in this study. Through the restoration models used for the forests studied, the N cycle processes are recovered as the forests develop, as they present a clear tendency of changing from N economy to P economy, typical to mature tropical forests.

Keywords: Ecological Restoration; Nitrogen cycle;  $^{15}\text{N}$  natural abundance; N mineralization



## RESUMEN

### **Reciclaje del nitrógeno en una cronosecuencia formada por bosques restaurados y un bosque natural**

La recuperación de las funciones y procesos ecosistémicos, entre otros atributos, es uno de los indicadores más importantes en el proceso de retorno de un ecosistema a la suya trayectoria histórica. El reciclaje de nutrientes es un atributo esencial del ecosistema que está directamente relacionado a la regulación del funcionamiento y desarrollo de los ecosistemas. En un modelo general, el reciclaje de nutrientes incluye: entradas de nutrientes, transferencias internas entre plantas y suelo, y salidas del sistema. La comprensión de los cambios en los procesos biogeoquímicos a lo largo de la sucesión secundaria en ambientes que están en proceso de restauración ecológica es todavía incipiente, en especial para los bosques tropicales. La aproximación que proponemos es evaluar la dinámica del nitrógeno a lo largo del proceso de restauración ecológica en ambientes reforestados con especies nativas del Bosque Atlántico. La cuestión central de este estudio es: “¿La restauración forestal con alta diversidad de especies y predominio de especies arbóreas nativas regionales restaura la dinámica original del nitrógeno?” Este estudio tiene como objetivo investigar el funcionamiento del ciclo de los nutrientes con foco en el nitrógeno, elemento limitante de la sucesión secundaria de los bosques tropicales. Algunos indicadores han sido evaluados en una cronosecuencia forestal formada por un bosque natural preservado y bosques con diferentes edades de restauración (21 y 52 años). Los indicadores utilizados fueron:  $\delta^{15}\text{N}$  y contenido de N de la vegetación, hojarasca y suelo; razón N:P de la vegetación y de la hojarasca; tasas líquidas de mineralización y nitrificación; contenido de amonio, nitrato, N mineral y razón nitrato:amonio. Los datos fueron documentados entre los meses de agosto y abril de 2009 en las estaciones seca, transición seca y lluviosa, lluviosa y transición lluviosa y seca. Patrones claros de cambios en el ciclo del N fueron encontrados a lo largo de la cronosecuencia estudiada. Entre los patrones se incluyen diferencias en los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  de las hojas, contenido de N, razón N:P, N mineral y tasas líquidas de mineralización y nitrificación y aumento de los valores medios de esas variables a lo largo de la cronosecuencia. Los resultados indican que bosques en proceso de restauración, aunque para el más antiguo con 52 años, no poseen un reciclaje de N característico de bosque maduro, luego la recuperación del reciclaje de N aun no ha sido concluida. Mientras tanto, es posible afirmar que los bosques en proceso de restauración estudiados están siguiendo una trayectoria de desarrollo que atingirá el reciclaje de N más cerca de lo de un bosque natural maduro. Por los modelos de restauración utilizados, los procesos de reciclaje de N son restablecidos a medida que el bosque se desarrolla, tendiendo a un cambio de la economía de N para la economía de P que es una característica típica de bosques tropicales maduros.

Palabras-llave: Restauración ecológica; Ciclo del nitrógeno; Abundancia natural de  $^{15}\text{N}$ ; Mineralización del N





## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO DESTACADAS EM PRETO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. O MUNICÍPIO DE IRACEMÁPOLIS ESTÁ LOCALIZADO À ESQUERDA NO MAPA. O MUNICÍPIO DE COSMÓPOLIS ESTÁ LOCALIZADO À DIREITA DE IRACEMÁPOLIS. O MUNICÍPIO DE CAMPINAS CORRESPONDE À ÁREA MAIOR E MAIS À DIREITA NO MAPA.....30
- FIGURA 2 - VISTA AÉREA DA MATA RIBEIRÃO CACHOEIRA, PARTE DA APA DO MUNICÍPIO DE CAMPINAS, SP. A FLORESTA ESTÁ INSERIDA NAS PROPRIEDADES DO CONDOMÍNIO COLINAS DO ATIBAIA, NO DISTRITO DE SOUSAS. FONTE: GOOGLE EARTH™ 2009.....32
- FIGURA 3- VISTA AÉREA DA FLORESTA DE 52 ANOS NO MUNICÍPIO DE COSMÓPOLIS, SP. OBSERVA-SE O RIO JAGUARI, QUE CORRE DE LESTE PARA OESTE. A PORÇÃO DA FLORESTA ESTUDADA CORRESPONDE AO MACIÇO FLORESTAL NO CENTRO DA IMAGEM, NA MARGEM NORTE DO RIO. AS ÁREAS ADJACENTES CORRESPONDEM A TALHÕES DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR. FONTE: GOOGLE EARTH™ 2009 .....34
- FIGURA 4- VISTA AÉREA DA FLORESTA DE 21 ANOS NO MUNICÍPIO DE IRACEMÁPOLIS, SP. A PORÇÃO DA FLORESTA ESTUDADA CORRESPONDE À FAIXA CONTÍNUA NA MARGEM SUL DA REPRESA. A ÁREA ADJACENTE EM MARROM, ENTRE A FLORESTA ESTUDADA E A ESTRADA, CORRESPONDE A UM TALHÃO DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR. ABAIXO SE OBSERVA PARTE DE MUNICÍPIO DE IRACEMÁPOLIS. FONTE: GOOGLE EARTH™ 2009 .....36

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA PARA O MUNICÍPIO DE CAMPINAS ENTRE O PERÍODO 1890-2007. FONTE: IAC – SEÇÃO DE CLIMATOLOGIA AGRÍCOLA. ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CAMPINAS (22°54'S 47°05'O, ALTITUDE: 694 M) .....	31
GRÁFICO 2- PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA PARA O MUNICÍPIO DE COSMÓPOLIS ENTRE O PERÍODO 1943-2006. FONTE: SIAGRH – SISTEMA INTEGRADO PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. POSTO: USINA ESTER (22°40'S 47°13'O, ALTITUDE: 560 M) .....	33
GRÁFICO 3- PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA PARA O MUNICÍPIO DE IRACEMÁPOLIS ENTRE O PERÍODO 1967-1971. FONTE: SIAGRH – SISTEMA INTEGRADO PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. POSTO: IRACEMÁPOLIS (22°35'S 47°33'O, ALTITUDE: 610 M) .....	35
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DO TEOR DE AMÔNIO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). <i>N</i> = 20.....	46
GRÁFICO 5 - VARIAÇÃO DO TEOR DE NITRATO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). <i>N</i> = 20.....	47
GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DO TEOR DE N INORGÂNICO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). <i>N</i> = 20 ...	48
GRÁFICO 7 - VARIAÇÃO DA TAXA LÍQUIDA DE MINERALIZAÇÃO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). <i>N</i> = 20 .....	49
GRÁFICO 8 - VARIAÇÃO DA TAXA LÍQUIDA DE NITRIFICAÇÃO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). <i>N</i> = 20 .....	51
GRÁFICO 9 - VARIAÇÃO DO $\Delta^{15}\text{N}$ ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO (0-50 CM) NAS FLORESTAS DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). AS BARRAS VERTICAIS REPRESENTAM OS DESVIOS PADRÕES DE CADA MÉDIA .....	53
GRÁFICO 10 - VARIAÇÃO DO TEOR DE N ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO (0-50 CM) NAS FLORESTAS DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). AS BARRAS VERTICAIS REPRESENTAM OS DESVIOS PADRÕES DE CADA MÉDIA .....	54
GRÁFICO 11 - RAZÕES N:P FOLIAR E DA SERRAPILHEIRA DE CADA COMUNIDADE FLORESTAL DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). OS VALORES ENTRE PARÊNTESES CORRESPONDEM AOS ÍNDICES N:P FOLIAR/N:P DA SERRAPILHEIRA. <i>n</i> AMOSTRAL = 10 AMOSTRAS COMPOSTAS .....	60

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DO SOLO NAS DIFERENTES FLORESTAS DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). $n = 1$ AMOSTRA COMPOSTA .....	44
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO NAS DIFERENTES FLORESTAS DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). $n = 1$ AMOSTRA COMPOSTA.....	44
TABELA 3 - N INORGÂNICO TOTAL NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	47
TABELA 4 - TAXA LÍQUIDA DE MINERALIZAÇÃO PARA A CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	49
TABELA 5 - TAXA LÍQUIDA DE NITRIFICAÇÃO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	50
TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE $\Delta^{15}\text{N}$ E %N ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO (0-50 CM) NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), COM DESTAQUE PARA O TIPO DE SOLO DE CADA ÁREA .....	52
TABELA 7 - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ NO SOLO ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO DE 0-50 CM EM CADA FLORESTA NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	53
TABELA 8 - VALORES MÉDIOS DE PORCENTAGEM DE N NO SOLO ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO DE 0-50CM EM CADA FLORESTA NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	54
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ FOLIAR PARA A COMUNIDADE NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL) E VALOR-P PARA O TESTE DE KRUSKAL-WALLIS.....	55
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE N FOLIAR NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	56
TABELA 11 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE N FOLIAR NO AUGE DA ESTAÇÃO SECA E CHUVOSA PARA A FLORESTA RESTAURADA DE 21 ANOS, VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	56
TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ FOLIAR NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P, CHI-QUADRADO E AGRUPAMENTO DO TESTE DE KRUSKAL-WALLIS.....	57
TABELA 13 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE N FOLIAR NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P PARA A MÉDIA DOS MÍNIMOS QUADRADOS, E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	57
TABELA 14 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE P FOLIAR NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	58

TABELA 15 - RAZÕES N:P FOLIAR E DA SERRAPILHEIRA, E ÍNDICE N:P FOLIAR/N:P SERRAPILHEIRA CALCULADAS EM BASE MOLAR PARA A COMUNIDADE VEGETAL EM CADA FLORESTA NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL) .....	59
--	----

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE DO SOLO, TEORES DE AMÔNIO, NITRATO E N MINERAL, RAZÃO NITRATO:AMÔNIO, E TAXAS LÍQUIDAS DE MINERALIZAÇÃO E NITRIFICAÇÃO.....	82
ANEXO B - UMIDADE DO SOLO NAS DIFERENTES ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	82
ANEXO C - UMIDADE DO SOLO NAS DIFERENTES FLORESTAS NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	82
ANEXO D - TEOR DE AMÔNIO NO SOLO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	83
ANEXO E - TEOR DE NITRATO NO SOLO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	83
ANEXO F - N INORGÂNICO TOTAL NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	83
ANEXO G - TEORES DE AMÔNIO, NITRATO E N INORGÂNICO TOTAL NO SOLO (0-5 CM), E TAXAS LÍQUIDAS DE MINERALIZAÇÃO E NITRIFICAÇÃO DO N EM CADA ESTAÇÃO NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). OS APRESENTADOS REPRESENTAM A MÉDIA DE CADA ESTAÇÃO ± DESVIO PADRÃO. N = 20 .....	84
ANEXO H - RAZÃO NO <sub>3</sub> :NH <sub>4</sub> NO SOLO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	84
ANEXO I - RAZÃO NO <sub>3</sub> :NH <sub>4</sub> NO SOLO NAS DIFERENTES ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	84
ANEXO J - VARIAÇÃO DA RAZÃO NITRATO:AMÔNIO NO SOLO AO LONGO DAS ESTAÇÕES NA CRONOSEQUÊNCIA FLORESTAL ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). N = 20 .....	85
ANEXO K - VARIAÇÃO DA TAXA LÍQUIDA DE MINERALIZAÇÃO AO LONGO DO ANO EM CADA FLORESTA NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL).....	85
ANEXO L - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ DO SOLO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	85
ANEXO M - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO DE 0-50 CM NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	86
ANEXO N - VALORES MÉDIOS DE PORCENTAGEM DE N NO SOLO DA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	86

ANEXO O - VALORES MÉDIOS DE PORCENTAGEM DE N NO SOLO ATRAVÉS DO PERFIL DO SOLO DE 0-50 CM NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	87
ANEXO P - VALORES MÉDIOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ E TEOR DE N (%) NA FOLHAGEM VERDE POR ESPÉCIE EM CADA FLORESTA NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL). SÃO APRESENTADOS O NOME CIENTÍFICO DE CADA ESPÉCIE, A FLORESTA ONDE A ESPÉCIE CORRE, A ORIGEM N (NATIVA) OU E (EXÓTICA), FAMÍLIA BOTÂNICA E NÚMEROS DE INDIVÍDUOS AMOSTRADOS (N AMOSTRAL)	88
ANEXO Q - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE N FOLIAR POR GRUPO NA CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA MÉDIA DOS MÍNIMOS QUADRADOS, E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	92
ANEXO R - RAZÃO N:P FOLIAR PARA A CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY .....	92
ANEXO S - RAZÃO N:P DA SERRAPILHEIRA PARA A CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY.....	92
ANEXO T - ÍNDICE N:P FOLIAR/N:P SERRAPILHEIRA PARA A CRONOSEQUÊNCIA ESTUDADA (REFLORESTAMENTOS DE 21 ANOS E 52 ANOS, E FLORESTA NATURAL), VALOR-P DA ANOVA E AGRUPAMENTO DO TESTE DE TUKEY ..	93

## 1 INTRODUÇÃO

A restauração ecológica é definida como “o processo de assistir à recuperação de um ecossistema que tenha sido degradado, danificado, ou destruído” (SER, 2004). Desde seu surgimento, os principais objetivos da restauração ecológica foram mudando ao longo dos anos em todo o mundo, de acordo com avanços técnicos e o desenvolvimento de novas teorias (WHITE e WALKER, 1997; YOUNG et al., 2005; CHAZDON, 2008). Esse processo de mudança no referencial teórico da restauração ecológica também ocorreu no Brasil, onde a prática da restauração ecológica passou por mudanças significativas ao longo do tempo, principalmente na última década (RODRIGUES et al., 2009).

Atualmente, o objetivo da restauração ecológica é o “retorno de um ecossistema à sua trajetória histórica” (SER, 2004). A recuperação de alguns atributos do ecossistema pode ser utilizada para determinar se a restauração do ecossistema em questão foi efetiva. Entre estes atributos, está a recuperação das funções e dos processos ecossistêmicos (SER, 2004). As funções do ecossistema são refletidas principalmente nos atributos dinâmicos que afetam mais diretamente o metabolismo, especialmente a captação e transformação de energia, nutrientes e água (SER, 2004). Em escalas espaciais e temporais mais abrangentes, o funcionamento do ecossistema inclui a retenção de nutrientes e água em longo prazo, e a sustentabilidade do ecossistema como um todo (SER, 2004). A preocupação com a inclusão dos processos ecossistêmicos, como, por exemplo, a ciclagem de nutrientes, já havia sido apontada como essencial por Ehrenfeld e Toth (1997) em uma perspectiva ecossistêmica da restauração ecológica.

A restauração é uma medida cada vez mais necessária e difundida devido à destruição em grandes proporções que as florestas têm sofrido em escala global (FAO, 2007). A restauração ecológica faz uso de técnicas que desencadeiam e/ou aceleram a sucessão secundária. A sucessão ecológica é um processo de mudança gradual na estrutura do ecossistema, na composição das espécies, nos processos da comunidade, nas características físicas do ambiente, e no funcionamento do ecossistema (ODUM, 1988; PRIMACK e RODRIGUES, 2001). A evolução da comunidade no processo sucessional ocorre de forma lenta, e é caracterizada por um aumento do número de espécies e da complexidade do ecossistema (RODRIGUES, 1995; SWAINE,



1995), podendo seguir trajetórias variadas e chegar a diferentes estágios finais estáveis (PICKETT e CADENASSO, 2005).

Nos ecossistemas florestais dos trópicos, a maior parte dos nutrientes está contida na biomassa, sendo reciclada dentro do componente orgânico do ecossistema (ODUM, 1988). Florestas tropicais, de maneira geral, ocorrem em solos pobres e intemperizados, e ciclam os nutrientes rapidamente (MONTAGNINI e JORDAN, 2002). Apesar disso, são ecossistemas de alta produtividade e elevado conteúdo de biomassa, cuja manutenção só é possível devido a várias adaptações biológicas que conservam nutrientes, como, por exemplo, simbioses mutualísticas entre microrganismos e plantas (MONTAGNINI e JORDAN, 2002). Esses mecanismos tornam a ciclagem de nutrientes mais eficiente (VITOUSEK, 1982) e minimizam as perdas com saídas de elementos do sistema.

A perturbação do ecossistema florestal gera desequilíbrios na ciclagem e conservação de nutrientes, além de resultar em perda de biodiversidade. A supressão da vegetação, como o desflorestamento através de corte raso, resulta em declínio na fertilidade do solo e mudanças nas suas características físicas, químicas e biológicas (REINERS et al., 1994; NEILL et al., 2006). O que resta em termos de nutrientes, no solo, fica sujeito a perdas por erosão, lixiviação e volatilização (VITOUSEK e MATSON, 1984). Essas perturbações, dependendo do grau de distúrbio, podem resultar na perda dos mecanismos mantenedores da ciclagem de nutrientes em diferentes proporções (JORDAN, 1985). Perdas significativas de nutrientes, com redução significativa dos reservatórios dos elementos no ecossistema, e destruição dos mecanismos mantenedores da ciclagem biogeoquímica resultam em limitação nutricional da vegetação, e são sérias barreiras à expressão da regeneração natural ou mesmo para ações mais efetivas da restauração ecológica (BROWN e LUGO, 1994). Em situações extremas, a recuperação do solo pode ser necessária como uma etapa anterior à recuperação da cobertura vegetal da área. Nesse contexto, uma etapa essencial da recuperação do solo é a reacumulação dos nutrientes perdidos (REIS-DUARTE e CASAGRANDE, 2006). Em situações em que grandes volumes de nutriente são perdidos, a limitação nutricional passa a ser uma das principais barreiras à sucessão secundária.

No decorrer da sucessão em florestas tropicais, observa-se um aumento da quantidade de nutrientes armazenados nos reservatórios do ecossistema, um aumento do tempo de reposição dos elementos, além de um acúmulo de biomassa e matéria orgânica (CHAPIN III et al., 2002), juntamente com a lenta recuperação dos mecanismos mantenedores da ciclagem desses nutrientes. Os padrões de ciclagem de N e P durante a sucessão secundária em florestas tropicais são similares aos da sucessão primária (WALKER e SYERS, 1976; DAVIDSON et al., 2007). Modificações importantes no funcionamento da comunidade ao longo do processo de sucessão são relacionadas aos nutrientes disponíveis. Em seu estudo, Mellinger e McNaughton (1975) apontaram o P como o elemento mais limitante à sucessão em uma cronosequência vegetacional na zona temperada, com as plantas ficando mais limitadas por P com o avanço da sucessão. As florestas tropicais, por sua vez, são especialmente limitadas por N em etapas iniciais da sucessão secundária. Nessas etapas, as florestas tropicais exibem um ciclo de N conservativo típico, com maiores taxas de ciclagem interna, e perdas reduzidas de N. À medida que a sucessão secundária progride, as propriedades da ciclagem de N são recuperadas (HEDIN et al., 2003; DAVIDSON et al., 2007).

Apenas nas florestas em estádios avançados de sucessão e florestas maduras, as árvores reabsorveram mais P do que N antes da abscisão foliar. Apesar de tanto o N como o P serem reabsorvidos antes da abscisão foliar, o balanço da comunidade muda, durante a sucessão secundária, de economia de N, nas fases iniciais, para economia de P, nas fases finais da sucessão, como foi descrito para florestas tropicais de terras baixas (DAVIDSON et al., 2007). Parâmetros indicadores da ciclagem biogeoquímica como a razão N:P da vegetação têm se mostrado uma importante ferramenta para compreensão do estado nutricional da comunidade vegetal (GÜSEWELL, 2004), podendo ser utilizada como um indicativo de limitação nutricional (KOERSELMAN e MEULEMAN, 1996; AERTS e CHAPIN, 2000). Padrões globais foram descritos para N e P em relação a grandes gradientes latitudinais e de temperatura, além da razão N:P das folhas de plantas superiores (REICH e OLEKSYN, 2004).

O balanço entre as entradas e saídas de N de um dado sistema pode ser avaliado através da abundância natural de  $^{15}\text{N}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ), que fornece medidas integradoras da dinâmica de N ao longo do tempo (HANDLEY e RAVEN, 1992; NADELHOFFER e FRY, 1994; HOGBERG, 1997). A

aplicação da metodologia isotópica no estudo da ciclagem biogeoquímica do N tem permitido identificar diferentes padrões que refletem os processos envolvidos na ciclagem. À medida que o ecossistema desenvolve-se, o sistema como um todo se torna mais enriquecido em  $^{15}\text{N}$  (VITOUSEK et al., 1989; MARTINELLI et al., 1999). Alguns estudos em regiões tropicais verificaram variação do  $\delta^{15}\text{N}$  ao longo do perfil de solo (BUSTAMANTE et al., 2004; NARDOTO, 2005). As causas do enriquecimento isotópico com a profundidade do solo foram investigadas por vários autores (WADA et al., 1984; NADELHOFFER e FRY, 1988; PICCOLO et al., 1994; PICCOLO et al., 1996). Um padrão global da relação entre o  $\delta^{15}\text{N}$  do solo e das plantas foi descrito por Amundson et al. (2003).

A abundância natural de  $^{15}\text{N}$  foliar tem sido utilizada com sucesso em comparações entre ecossistemas em escala global. Os valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar de florestas tropicais são maiores que os de florestas temperadas (MARTINELLI et al., 1999). Esse padrão indica que florestas tropicais são mais ricas em N, e apresentam uma ciclagem de N mais aberta em comparação às florestas temperadas. No Brasil, alguns estudos investigaram a abundância natural de  $^{15}\text{N}$  foliar em diferentes biomas como na Mata Atlântica do sudeste brasileiro (AIDAR et al., 2003; SILVA, 2005); em florestas de terra firme da Amazônia (NARDOTO, 2005; OMETTO et al., 2006); e em áreas de Cerrado (SPRENT et al., 1996; BUSTAMANTE et al., 2004; NARDOTO, 2005; SILVA, 2005). Esses e outros estudos têm relatado que o teor de N foliar é maior em espécies de leguminosas do que em espécies de não-leguminosas (MCKEY, 1994). O mesmo padrão foi observado em savanas australianas (SCHMIDT e STEWART, 2003), e em florestas tropicais úmidas da Guiana Francesa (ROGGY et al., 1999A, B). Maiores valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar são indicadores de uma maior disponibilidade de N, como pode ser demonstrado através de estimativas de mineralização do N (CRAINE et al., 2009).

A mineralização da matéria orgânica é outro processo importante na compreensão da ciclagem biogeoquímica. Nas florestas tropicais, as taxas de mineralização de N são altas (PICCOLO et al., 1994; LUIZÃO et al., 2004). A mineralização do N foi estudada em diferentes biomas, como o Cerrado brasileiro (NARDOTO e BUSTAMANTE, 2003; SILVA, 2005), a floresta tropical seca e a savana (SINGH et al., 1989).

Apesar das limitações do método apontadas por Vitousek et al. (1989), estimativas laboratoriais de mineralização de N são bem correlacionadas com a real disponibilidade de N no solo (BINKLEY e HART, 1989; WEDIN e PASTOR, 1993), caracterizando esse processo como um bom indicador da ciclagem do nitrogênio. O teor de  $\text{NO}_3^-$  e a razão  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  no solo também têm sido utilizados como indicadores da ciclagem do N, com resultados apontando um aumento na disponibilidade de N na floresta com o avanço da sucessão em direção à floresta madura (DAVIDSON et al., 2007).

A composição de espécies das florestas pode influenciar marcadamente a recuperação da ciclagem de nutrientes, especialmente no que se refere à proporção de espécies potencialmente fixadoras de N (SIDDIQUE et al., 2008). Espécies fixadoras de N podem aumentar consideravelmente a disponibilidade local desse elemento (MONTAGNINI et al., 1986). Estudos sobre a influência de espécies exóticas nos processos ecossistêmicos, marcadamente a ciclagem de nutrientes, com destaque especial para a ciclagem do N (EHRENFELD, 2003), têm demonstrado a magnitude das possíveis alterações ecossistêmicas causadas por espécies exóticas invasoras.

A influência da composição de espécies, diversidade e estrutura da comunidade sobre os ciclos biogeoquímicos ainda é um assunto muito pouco explorado e que demanda mais estudos, principalmente para florestas em processo de restauração. Apesar da carência de pesquisas que enfatizem essa faceta da restauração ecológica, a correlação positiva entre biodiversidade e serviços ambientais em áreas restauradas já foi constatada em escala global (BENAYAS et al., 2009). Especialmente em biomas terrestres tropicais, as ações de restauração ecológica focadas no aumento da biodiversidade aumentam a provisão de serviços ambientais, embora tanto a biodiversidade como a provisão de serviços ambientais sejam menores em ecossistemas restaurados em comparação a ecossistemas naturais de referência, o que reforça a importância de uma política eficiente de conservação das florestas remanescentes, além da restauração das áreas degradadas (RODRIGUES et al., 2009).

Dado o destaque em escala mundial que a restauração ecológica possui atualmente, e a importância da ciclagem biogeoquímica como função ecossistêmica, faz-se necessário

compreender como se dá a recuperação dos ciclos dos elementos ao longo da sucessão secundária em áreas restauradas. Nesse contexto, a ciclagem de N e o P merecem destaque especial por serem, como ressaltado anteriormente, os dois elementos mais limitantes ao crescimento da floresta tropical nas etapas iniciais da sucessão secundária. Esse estudo tem por objetivo elucidar a dinâmica do nitrogênio ao longo do processo de restauração ecológica em áreas reflorestadas com espécies nativas da Mata Atlântica. A questão norteadora deste estudo é a seguinte: “A restauração florestal com alta diversidade de espécies e predominância de espécies arbóreas nativas regionais restaura a dinâmica original do nitrogênio?” Baseado no exposto acima, e tendo como referência o trabalho de Davidson et al. (2007) com uma cronosequência de florestas em regeneração natural na Amazônia brasileira, a seguinte hipótese foi formulada: à medida que a idade da área restaurada avança, a intensidade da dinâmica do nitrogênio no ecossistema aumenta em direção a valores encontrados em florestas nativas maduras.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Materiais e Métodos**

#### **2.1.1 Áreas de Estudo**

Para atender ao objetivo proposto, foram selecionadas duas florestas restauradas, com idades diferentes, e uma floresta natural, formando uma cronosequência florestal. As florestas restauradas possuem 21 e 52 anos, e foram ambas reflorestadas com alta diversidade de espécies arbóreas e predominância de espécies nativas regionais. A floresta natural é um remanescente bem preservado selecionado como ecossistema de referência. As três florestas estudadas estão inseridas no bioma Mata Atlântica, e pertencem à formação Floresta Estacional Semidecidual (FES) (IBGE, 1992). As florestas restauradas de 21 e 52 anos têm um histórico semelhante, pois ambas permaneceram por vários anos sem cobertura florestal, antes do reflorestamento, e estão atualmente inseridas em uma matriz de cultivo de cana-de-açúcar. Cada floresta pertence a um município, cuja situação geográfica é apresentada na Figura 1. Uma caracterização mais detalhada de cada área é apresentada abaixo.

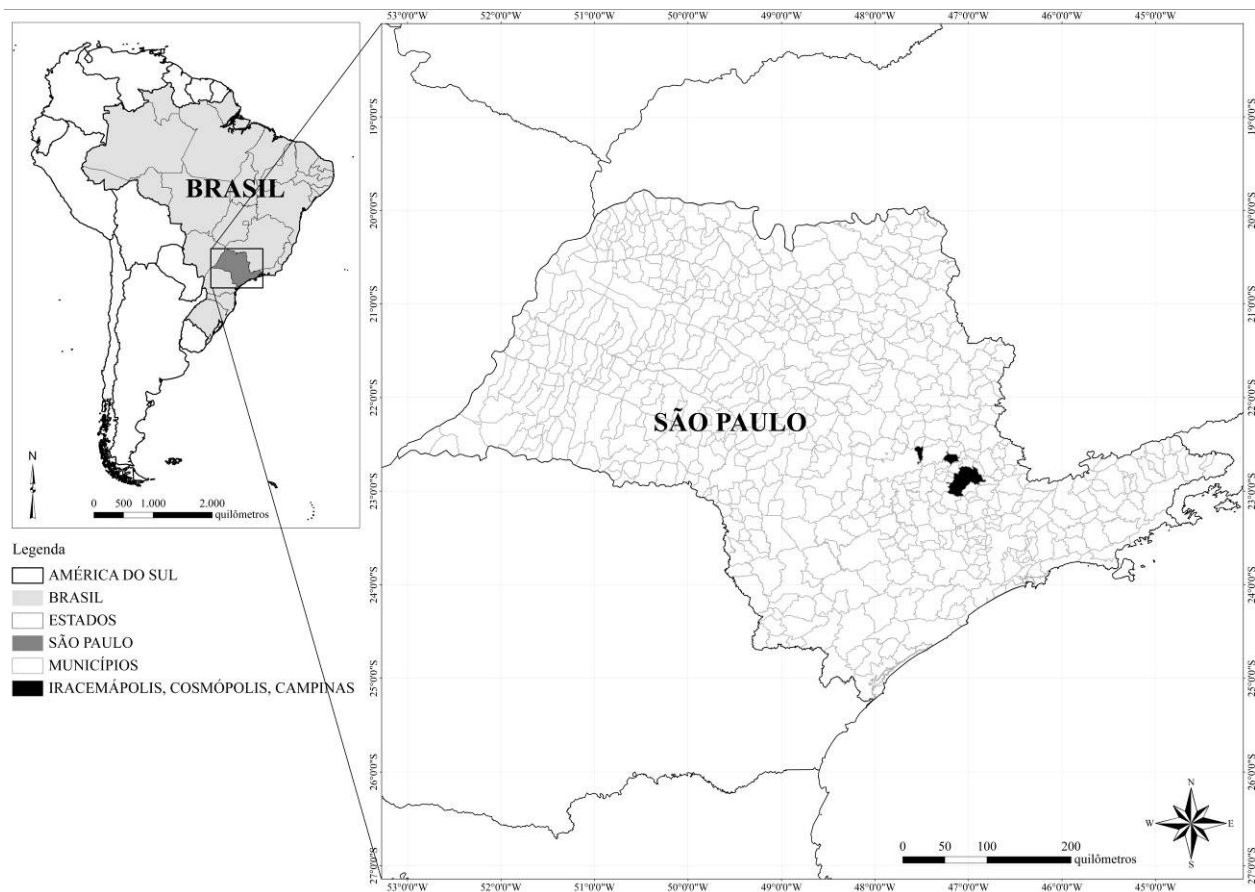


Figura 1 - Situação geográfica das áreas de estudo destacadas em preto no estado de São Paulo, Brasil. O município de Iracemápolis está localizado à esquerda no mapa. O município de Cosmópolis está localizado à direita de Iracemápolis. O município de Campinas corresponde à área maior e mais à direita no mapa

### 2.1.1.1 Mata Ribeirão Cachoeira

O município de Campinas é situado a  $22^{\circ}31'S$  de latitude e  $47^{\circ}02'W$  de longitude, e fica a 680 m de altitude. O clima do município é do tipo Cwa (Köppen, 1948), caracterizado como clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média anual é de  $21,4^{\circ}C$ , com médias máximas de  $27,1^{\circ}C$  e médias mínimas de  $15,6^{\circ}C$ . A precipitação média anual é de 1.372 mm, com registros mínimos de 30,6 mm e máximos de 243,3 mm (CEPAGRI, 2009a). As médias históricas da precipitação mensal estão representadas no Gráfico 1.

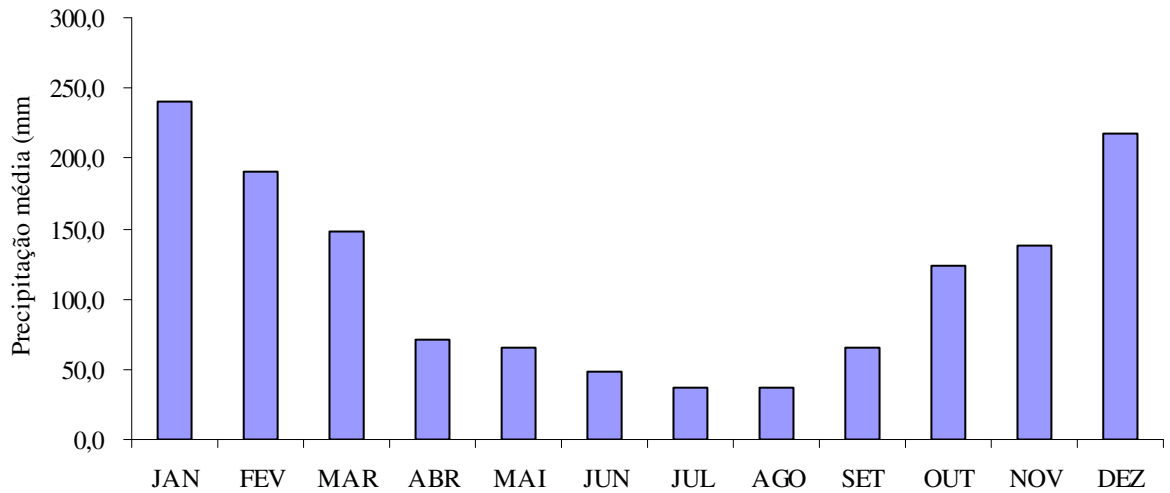


Gráfico 1 - Precipitação mensal média para o município de Campinas entre o período 1890-2007. Fonte: IAC – Seção de Climatologia Agrícola. Estação Experimental de Campinas (22°54'S 47°05'O, Altitude: 694 m)

A Mata Ribeirão Cachoeira é um dos maiores e mais bem preservados remanescentes florestais do município de Campinas, SP (SANTOS e KINOSHITA, 2003). O fragmento, com aproximadamente 233 hectares, está situado na APA (Área de Proteção Ambiental), no distrito de Sousas, dentro da área do Condomínio Colinas do Atibaia (Figura 2). O remanescente é cortado pelo ribeirão Cachoeira. A floresta possui uma vegetação densa, com a altura do dossel variando entre 15 e 25 metros, com árvores emergentes, e está sobre Solo Podzólico Vermelho-Amarelo (SANTOS e KINOSHITA, 2003). Para uma caracterização geral do solo da área de estudo, foi realizada uma análise granulométrica e química do solo.





Figura 2 - Vista aérea da Mata Ribeirão Cachoeira, parte da APA do município de Campinas, SP. A floresta está inserida nas propriedades do condomínio Colinas do Atibaia, no distrito de Sousas. Fonte: Google Earth™ 2009

### 2.1.1.2 Cosmópolis

O município de Cosmópolis está situado a 22°22'S de latitude e 47°06'W de longitude, e está a 585 m de altitude. O clima do município é do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köeppen (1948). A temperatura média anual é de 21,6°C, com máximas médias de 28,1°C e mínimas médias de 15,2°C. A precipitação média anual é de 1.323 mm, com registros mínimos de 29,8 mm e máximos de 238,5 mm (CEPAGRI, 2009b). As médias históricas da precipitação mensal estão representadas no Gráfico 2.

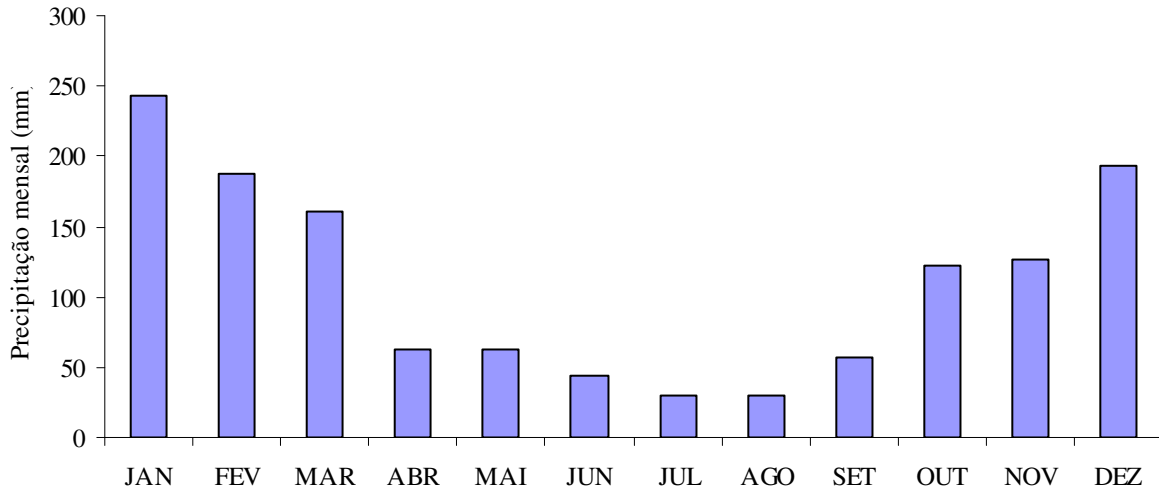


Gráfico 2- Precipitação mensal média para o município de Cosmópolis entre o período 1943-2006. Fonte: SIAGRH – Sistema Integrado para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Posto: Usina Ester (22°40’S 47°13’O, Altitude: 560 m)

Situada na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, a floresta restaurada da Usina Ester é o resultado de um projeto de reflorestamento, com a implantação realizada entre 1955 e 1960, e idade aproximada de 52 anos atualmente. Esse reflorestamento foi realizado com objetivo de refazer a mata ciliar para proteger as margens do Rio Jaguari (Figura 3). Foram plantadas 71 espécies arbustivas e arbóreas, privilegiando as espécies nativas regionais, mas também usando nativas não-regionais e até mesmo espécies exóticas. O plantio foi realizado sem critérios de espaçamento ou alinhamento, com aproximadamente uma muda a cada 10 m<sup>2</sup>. O solo do local é predominantemente Latossolo Roxo, com afloramentos basálticos e duas pequenas manchas de litossolo, com substrato de argilito (NOGUEIRA, 1977). Para uma caracterização geral do solo da área de estudo, foi realizada uma análise granulométrica e química do solo. Segundo Nogueira (1977), o local onde hoje existe a floresta restaurada foi desmatado por volta de 1900, e permaneceu “quase sem árvores”, com um “*pasto ralo e de má qualidade*”, até o plantio em 1955.

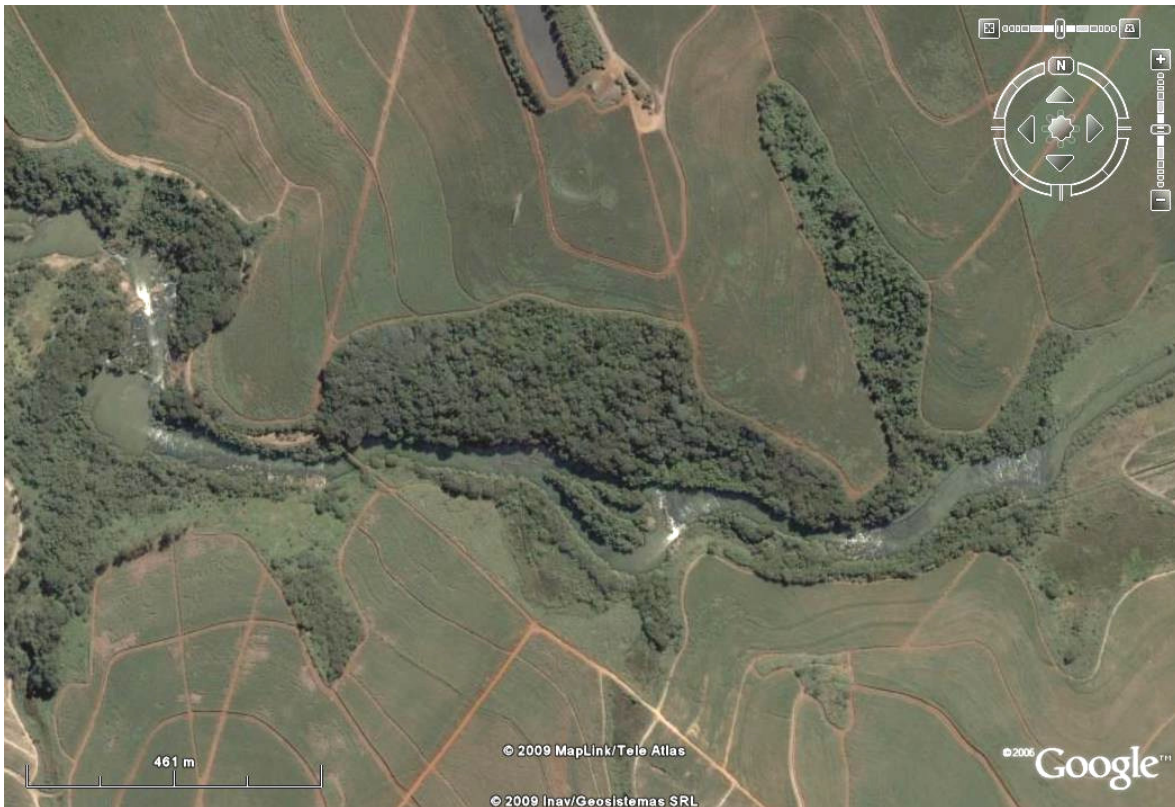


Figura 3- Vista aérea da floresta de 52 anos no município de Cosmópolis, SP. Observa-se o rio Jaguarí, que corre de leste para oeste. A porção da floresta estudada corresponde ao maciço florestal no centro da imagem, na margem norte do rio. As áreas adjacentes correspondem a talhões de cultivo de cana-de-açúcar. Fonte: Google Earth™ 2009

### 2.1.1.3 Iracemápolis

O município de Iracemápolis está situado a 22°21'S de latitude e 47°18'W de longitude, e está a 605 m de altitude. O clima do município é do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köeppen (1948). A temperatura média anual é de 21,5°C, com médias máximas de 28°C e médias mínimas de 15,2°C. A precipitação média anual é de 1.360 mm, com registros mínimos de 30 mm e máximos de 236 mm (SIGRH, 2009c). As médias históricas da precipitação mensal estão representadas no Gráfico 3.

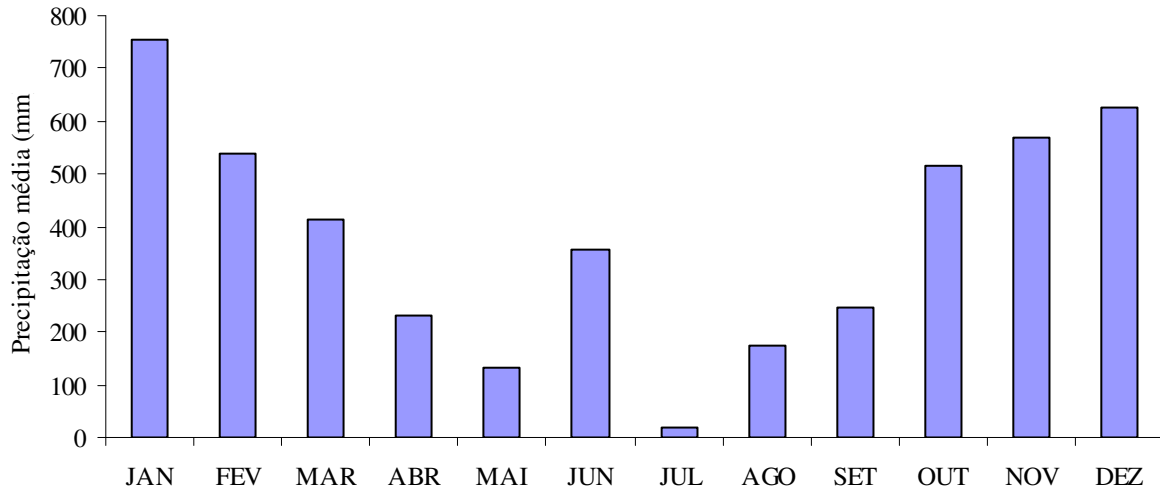


Gráfico 3- Precipitação mensal média para o município de Iracemápolis entre o período 1967-1971. Fonte: SIAGRH – Sistema Integrado para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Posto: Iracemápolis (22°35'S 47°33'O, Altitude: 610 m)

A área de estudo está situada na microbacia do ribeirão Cachoeirinha, às margens do reservatório de abastecimento público do município de Iracemápolis. O reflorestamento está delimitado de um lado pelo reservatório, e de outro por uma estrada de terra, que o separa de um plantio de cana-de-açúcar (Figura 4). Foram identificados cinco tipos de solo na área: Latossolo Vermelho-Amarelo húmico; Latossolo Roxo eutrófico; Latossolo Roxo distrófico; Terra Roxa Estruturada; e solo Podzólico Vermelho-Amarelo. O solo sob a floresta estudada é do tipo Latossolo Roxo (BELLINAZZI JÚNIOR et al., 1987). Para uma caracterização geral do solo da área de estudo, foi realizada uma análise granulométrica e química do solo. Esse reflorestamento foi iniciado em 1988, tendo em torno de 21 anos atualmente. No processo de restauração florestal, foram plantadas 140 espécies arbóreas, privilegiando espécies nativas regionais, entretanto, foram plantadas também espécies nativas não-regionais e espécies exóticas (RODRIGUES et al., 1992). As mudas foram implantadas em módulos, com espaçamento 4x4 m, na tentativa de repetir a estrutura de matas ciliares da região, com base em levantamentos fitossociológicos. Anteriormente à execução do projeto de reflorestamento, a área era utilizada para cultivo de cana-de-açúcar (RODRIGUES et al., 1987).





Figura 4- Vista aérea da floresta de 21 anos no município de Iracemápolis, SP. A porção da floresta estudada corresponde à faixa contínua na margem sul da represa. A área adjacente em marrom, entre a floresta estudada e a estrada, corresponde a um talhão de cultivo de cana-de-açúcar. Abaixo se observa parte de município de Iracemápolis. Fonte: Google Earth™ 2009

### 2.1.2 Parâmetros indicadores

Em cada floresta da cronosequência florestal estudada, a ciclagem do N foi avaliada através da composição de N e a abundância natural de  $^{15}\text{N}$ , da razão N:P da vegetação, e da mineralização do N no solo. Tais parâmetros são indicadores da maturidade do ciclo do N e do aumento da quantidade de N no ecossistema (adaptado de DAVIDSON et al., 2007). Todos os parâmetros indicadores são derivados de análises químicas da folhagem verde, da serrapilheira e do solo. As variáveis relacionadas aos parâmetros selecionados são detalhadas mais adiante.

### 2.1.3 Delineamento Experimental, Amostragem e Preparo das Amostras

Em cada floresta da cronosequência, uma área ciliar de 2,5 hectares foi selecionada para sorteio das parcelas. Um total de 30 parcelas medindo 10 x 10 m cada uma foram alocadas

aleatoriamente em cada floresta, utilizando o Delineamento Inteiramente Aleatorizado, e totalizando 0,3 ha. Foram também estabelecidas sistematicamente cinco transecções, com 10 pontos de amostragem de serrapilheira por transecção, em cada floresta. Quatro pontos para amostragem do perfil do solo foram selecionados sistematicamente em cada floresta.

O experimento é composto por três tratamentos (idade): 1) floresta natural; 2) floresta restaurada de 21 anos; e 3) floresta restaurada de 52 anos. Para as análises isotópicas, houve duas repetições no tempo (auge da estação seca de 2008 e auge da estação chuvosa de 2009), quando os compartimentos solo, folhagem verde e serrapilheira foram amostrados e reamostrados. Para o compartimento solo, há quatro repetições no espaço, que correspondem a quatro perfis de solo em cada área. Há 80 repetições no espaço para a folhagem verde de cada comunidade, que correspondem a 80 indivíduos arbóreos. Há cinco repetições no espaço para a serrapilheira, que correspondem às cinco transecções. Para os experimentos de Mineralização do N, foram realizadas quatro repetições no tempo (estação seca; transição estação seca-chuvosa; estação chuvosa; transição estação chuvosa-seca), com 20 repetições no espaço por floresta em cada estação de coleta.

A composição isotópica de N de folhas, serrapilheira e solo foi expressa em  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), calculada segundo a fórmula:  $\delta^{15}\text{N} = (\text{Ramostra/Rpadrão} - 1) \times 1000$ , onde R é a razão  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ . O padrão isotópico adotado foi o ar atmosférico, com abundância natural de  $^{15}\text{N}$  próxima a zero.

### **2.1.3.1 Mineralização do N**

#### **2.1.3.1.1 Amostragem**

Para as análises das Taxas Líquidas de Mineralização e Taxas Líquidas de Nitrificação, foram coletadas 20 amostras de solo da camada de 0-5 cm de profundidade, em cada área de estudo, em cada uma das quatro estações de amostragem, totalizando 240 amostras coletadas. As amostras foram coletadas aproximadamente no centro das respectivas parcelas, tomando-se o cuidado de não reamostrar exatamente o mesmo ponto em estações distintas. Cada amostra consistiu-se de um volume de aproximadamente 500 cm<sup>3</sup> (10 x 10 x 5 cm). Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e colocadas em recipientes de isopor assim que retiradas do solo. O transporte das amostras para o laboratório foi realizado em caixas de

isopor contendo gelo no fundo e material isolante evitando o contato direto das amostras com o gelo.

### **2.1.3.1.2 Preparo das amostras**

No laboratório, as amostras foram mantidas sob refrigeração a aproximadamente 5°C durante a noite. No dia seguinte, as amostras foram peneiradas em peneira com malha de 2 mm, para homogeneização do solo e remoção das raízes, e mantidas à temperatura ambiente, acondicionadas em caixa de isopor sem gelo. Cada amostra foi subdividida em três subamostras: 1) 10 g para determinação da porcentagem de água; 2) 10 g para extração no “Tempo Zero” (T0); e 3) o restante para incubação por sete dias e posterior extração no “Tempo Sete” (T7).

### **2.1.3.1.3 Análises químicas**

Para determinação das Taxas Líquidas de Mineralização e Nitrificação, foi adotada uma metodologia adaptada de Piccolo et al. (1994), com tempo de incubação em laboratório de sete dias, considerada a mais efetiva pelos autores. Subamostras de 10 g de cada amostra foram pesadas e colocadas em estufa de circulação de ar a 105° C durante três dias e depois novamente pesadas para determinação da porcentagem de água no solo através do método gravimétrico. Para a etapa de extração imediata em T0, subamostras de 10 g de cada amostra foram pesadas e acondicionadas em recipientes plásticos com tampa, onde foram adicionados 50 ml de uma solução de Cloreto de Potássio (KCl) 1M ( $\text{mol L}^{-1}$ ) (Merck®). Após adição do KCl, as amostras foram agitadas e incubadas durante 24 horas. Após a incubação, as amostras foram filtradas em papel filtro quantitativo N°42 125 mm (Whatman®), e acondicionadas em frascos âmbar. As amostras foram preservadas com a adição de Fenil Acetato de Mercúrio (PMA) ( $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ ), e mantidas sob refrigeração. Após sete dias de incubação o mesmo procedimento foi repetido para a extração e filtragem das subamostras do T7.

As concentrações de nitrogênio extraível do solo foram determinadas através de duas etapas de análise das amostras; uma etapa para quantificação de  $\text{N-NH}_4^+$ , e outra para  $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ . Essas análises foram realizadas com a utilização do sistema automático de Injeção de Fluxo Contínuo (FIA) (RUZICA e HANSEN, 1981).  $\text{N-NH}_4^+$  foi determinado por

condutivimetria, após a reação de Nessler.  $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$  foram determinados como  $\text{N-NO}_2^-$ , após redução com catalisador Cádmio, por espectrofotometria. Os resultados são dados em  $\mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA (Terra Fina Seca ao Ar).

A Taxa Líquida de Mineralização do N foi obtida subtraindo-se a concentração inicial (T7) de  $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$  da concentração final (T7) de  $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ , dividido pelo número de dias de incubação (sete dias). A Taxa Líquida de Nitrificação foi obtida subtraindo-se a concentração final de  $\text{N-NO}_3^-$  da concentração inicial  $\text{N-NO}_3^-$  dividido pelo número de dias de incubação (sete dias). Os resultados são apresentados com base no peso do solo seco a  $105^\circ\text{C}$ . Os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$  foram calculados a partir dos valores em ppm (partes por milhão) mensurados para a extração em T0, divididos pelo peso seco do solo, e multiplicados pelo volume de KCl.

A umidade do solo foi avaliada juntamente com os parâmetros relacionados às taxas líquidas de mineralização e nitrificação do N, devido à correlação positiva entre capacidade de retenção da água do solo, N total e mineralização do N (ROBERTSON e VITOUSEK, 1981). A correlação entre a umidade do solo e as demais variáveis foi testada através do coeficiente de correlação de Pearson.

### **2.1.3.2 Solo**

#### **2.1.3.2.1 Caracterização do solo das áreas de estudo**

Foi realizada uma caracterização geral do solo de cada floresta estudada através de análises granulométricas e químicas. Em cada área foram sorteados cinco pontos onde amostras do solo foram coletadas em três camadas ao longo do perfil: 0-10 cm; 10-30 cm; e 30-50 cm. Uma amostra composta por camada foi formada para cada área. Os métodos utilizados para análise de solo são descritos em Raij et al. (2001).

#### **2.1.3.2.2 Amostragem**

Para as análises da razão isotópica e a concentração de N total no solo, foram amostrados quatro perfis de solo com trado aberto. Em cada perfil, foram amostradas separadamente as



camadas de 0-2,5 cm; 2,5-5 cm; 5-10 cm; 10-30 cm; e 30-50 cm, e, depois de removidas as raízes e restos de serrapilheira, foram moídas e tiveram a razão isotópica e a concentração de N Total determinadas.

### **2.1.3.2.3 Preparo das amostras e análise isotópica**

As amostras de solo foram secas à temperatura ambiente. Após secas, as amostras foram destorroadas e peneiradas em peneiras com malha de 2 mm, descartando as rochas retidas na peneira. O material peneirado foi quarteado até obtenção de um volume com massa aproximada de 50 g. Esse volume de solo foi triado para retirada de restos de animais e restos vegetais incluindo particulados de troncos, galhos e raízes, assim como pedaços de carvão, e algumas partículas orgânicas não-identificáveis. Após a triagem, o material foi moído com a utilização de um cadinho até que todo o material passasse por uma peneira com malha de 0,250 mm. Alíquotas de diferentes massas (25-40 mg) foram estabelecidas para cada área e altura do perfil, devido a diferentes concentrações de N. O material foi pesado em cápsulas de estanho e enviado para o Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP para determinação da razão isotópica e concentração elementar de N através do Analisador Elementar de Combustão (EA-Carlo Erba) em linha com Espectrômetro de Massa (Delta Plus, Finnigan Mat, San José, CA, USA). O padrão utilizado para N foi o ar atmosférico. O erro analítico aceitável para N e  $^{15}\text{N}$  foi de 0,03% e 0,30‰, respectivamente.

### **2.1.3.3 Folhagem verde**

#### **2.1.3.3.1 Amostragem**

O primeiro passo para a amostragem da comunidade florestal foi a realização de um levantamento fitossociológico com o intuito de definir a distribuição da comunidade estudada em classes de diâmetro. Esse levantamento foi realizado nas três áreas de estudo, através do método de parcelas. Todos os indivíduos arbóreos com Circunferência à Altura do Peito (CAP)  $\geq 15$  cm foram incluídos no levantamento. Cada comunidade amostrada foi dividida em classes de diâmetro, com intervalos de 5 cm entre classes distintas. Após obter a representação de cada

classe de diâmetro na comunidade em termos de porcentagem, foi planejada uma amostragem aleatória estratificada baseada na distribuição da comunidade dentro das classes de diâmetro, com  $n$  amostral = 80 indivíduos arbóreos por área.

Para os indivíduos sorteados, foram coletados ramos externos (ramos de sol) de cada quadrante, do terço médio da copa. Em cada ramo, foram selecionadas folhas maduras, totalmente expandidas e saudáveis, evitando folhas muito jovens ou muito velhas. Tomou-se o cuidado de sempre observar se as folhas apresentavam algum sinal de presença de fungos, evitando assim a contaminação das amostras, pois o sinal isotópico de tais organismos é muito diferente do das plantas. Os pecíolos das folhas selecionadas foram removidos, de modo a amostrar preferencialmente o limbo da folha.

#### **2.1.3.3.2 Preparo das amostras e análise isotópica**

As amostras de folhagem verde foram secas em estufa de circulação de ar a 60 °C por aproximadamente 48 horas e trituradas a fino pó em moinho tipo Wiley (Marconi®) com malha de 20 *mesh* em inox. Foram pesados aproximadamente 2 mg em cápsulas de estanho e enviadas para o Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura) da USP para determinação da razão isotópica e da concentração elementar de N através do Analisador Elementar de Combustão (EA-Carlo Erba) em linha com Espectrômetro de Massa (Delta Plus, Finnigan Mat, San José, CA, USA). O padrão utilizado para N foi o ar atmosférico. O erro analítico aceitável para N e  $^{15}\text{N}$  foi de 0,03% e 0,30‰, respectivamente.

#### **2.1.3.4 Serrapilheira**

##### **2.1.3.4.1 Amostragem**

Para cada área de estudo, foram estabelecidas cinco transecções com 10 pontos de amostragem ao longo de cada uma. As cinco transecções foram distribuídas perpendicularmente aos corpos hídricos, abrangendo possíveis gradientes microclimáticos resultantes de diferenças de declividade ou proximidade com a água, borda, etc. Em cada transecção, a distância entre pontos de coleta foi de três metros para a floresta de 21 anos; de sete metros para a floresta de 52 anos; e

de 4 metros na floresta natural, devido às diferenças nas extensões de cada área. Em cada ponto de coleta, todo o material vegetal não decomposto contido em parcelas de 50 x 50 cm foi coletado.

#### **2.1.3.4.2 Preparo das amostras e análise isotópica**

As amostras de serrapilheira fina foram secas em estufa de circulação de ar a 60 °C por aproximadamente 48 horas. Após secas, as amostras foram triadas, para retirada de restos de animais, partes de troncos e galhos com mais de 2 cm de diâmetro, para obtenção da serrapilheira fina (VITOUSEK, 1982). Após a triagem, todo o material foi peneirado em peneiras com malhas de 2 mm para separação de resquícios de solo mineral e partículas orgânicas não-identificáveis. Após esse processo, as amostras foram trituradas a fino pó em moinho tipo Wiley (Marconi®) com malha 20 *mesh* em inox. Foram pesados aproximadamente 2 mg em cápsulas de estanho e enviados para o Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP para determinação da razão isotópica e concentração elementar de N através do Analisador Elementar de Combustão (EA-Carlo Erba) em linha com Espectrômetro de Massa (Delta Plus, Finnigan Mat, San José, CA, USA). O padrão utilizado para N foi o ar atmosférico. O erro analítico aceitável para N e <sup>15</sup>N foi de 0,03% e 0,30‰, respectivamente.

#### **2.1.3.5 Razão N:P da comunidade**

Para a razão N:P da serrapilheira, cada transecção correspondeu a uma amostra composta. Para a folhagem verde, cinco amostras compostas de material vegetal foliar foram formadas por floresta, agrupando as parcelas mais próximas a cada uma das cinco transecções para coleta de serrapilheira. Para cada grupo de parcelas formando uma amostra composta, os indivíduos arbóreos que tiveram suas folhas amostradas para análises isotópicas de nitrogênio foram também utilizados na amostragem composta para a razão N:P foliar. O teor de N foi determinado através da metodologia isotópica, segundo descrito anteriormente. O teor de P foliar e da serrapilheira foram determinados através de digestão nitro-perclórica seguida de leitura por colorimetria (método metavanadato de amônio) (MALAVOLTA et al., 1989).

#### **2.1.4 Análises Estatísticas**

Os dados do experimento foram testados para homogeneidade de variância e para normalidade, e foram transformados quando necessário. Valores *outliers* foram identificados, com a exclusão de alguns valores mais discrepantes. As variáveis analisadas foram comparadas por ANOVA e, quando encontradas diferenças significativas, o Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) (ZAR, 1984), foi realizado para contrastar as médias e apontar diferenças entre pares de tratamentos. Para dados desbalanceados, a Média dos Mínimos Quadrados foi utilizada alternativamente ao Teste de Tukey. O Teste de Kruskal-Wallis foi aplicado a variáveis que não puderam ser analisadas através de testes paramétricos. A correlação entre variáveis foi testada através do Coeficiente de Correlação de Pearson. Todas as análises foram realizadas com a utilização do software SAS 9.1.

## **2.2 Resultados**

### **2.2.1 Taxas Líquidas de Mineralização e Nitrificação do N**

As análises do solo nas três florestas (Tabela 1 e Tabela 2) apresentam uma caracterização geral do solo de cada floresta, e revelam que a quantidade de argila é maior na floresta mais jovem, intermediária na floresta de 52 anos, e menor na floresta natural.

Tabela 1- Características granulométricas do solo nas diferentes florestas da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 1$  amostra composta

<i>Floresta</i>	<i>Profundidade (cm)</i>	<i>Areia Total (g/kg)</i>	<i>Areia Grossa (2,00-0,210 mm) (g/kg)</i>	<i>Areia Fina (0,210-0,053 mm) (g/kg)</i>	<i>Silte (0,053-0,002mm) (g/kg)</i>	<i>Argila (&lt;0,002mm) (g/kg)</i>
21 anos	0-10	340	150	190	179	481
21 anos	10-30	349	140	209	207	444
21 anos	30-50	350	160	190	227	423
52 anos	0-10	390	200	190	402	208
52 anos	10-30	399	209	190	282	319
52 anos	30-50	340	180	160	344	316
Flor. Nat.	0-10	590	450	140	270	140
Flor. Nat.	10-30	560	400	160	239	201
Flor. Nat.	30-50	490	340	150	306	204

Tabela 2 - Características químicas do solo nas diferentes florestas da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 1$  amostra composta

<i>Floresta</i>	<i>Profundidade (cm)</i>	<i>pH (CaCl<sub>2</sub>)</i>	<i>N (mg/Kg)</i>	<i>P resina (mg/dm<sup>3</sup>)</i>	<i>M.O. (g/dm<sup>3</sup>)</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>H+Al (mmolc /dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Al</i>	<i>S.B.</i>	<i>CTC</i>	<i>Sat.bases (V%)</i>	<i>Sat. Al (m%)</i>	<i>S (SO<sub>4</sub>) (mg/dm<sup>3</sup>)</i>
21 anos	0-10	4,6	700	12	32	0,8	19	9	58	4	29	87	33	12	15
21 anos	10-30	4,5	560	9	23	0,5	12	6	58	5	19	77	24	21	17
21 anos	30-50	4,7	560	5	21	0,3	13	5	47	3	18	65	28	14	25
52 anos	0-10	5,1	1680	17	44	1,5	79	32	47	3	113	160	71	3	12
52 anos	10-30	4,6	840	7	25	0,6	49	24	58	2	74	132	56	3	30
52 anos	30-50	4,7	630	14	20	0,5	55	24	52	3	80	132	60	4	37
Flor. Nat.	0-10	4,7	2380	16	53	3,0	41	12	52	2	56	108	52	3	10
Flor. Nat.	10-30	4,4	1400	11	36	2,5	24	9	52	4	36	88	41	10	10
Flor. Nat.	30-50	4,1	700	7	17	1,8	14	7	58	11	23	81	28	33	15

O coeficiente de correlação de Pearson revelou correlação positiva e altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre a umidade do solo e N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N mineral, Taxa Líquida de Nitrificação; e correlação positiva e significativa ( $p < 0,05$ ) entre a umidade do solo e a Taxa Líquida de Mineralização (Anexo A).

O padrão de variação no teor de água no solo, ao longo do ano, foi o mesmo nas três áreas de estudo. De uma maneira geral, a umidade do solo manteve-se constante ao longo do ano, apresentando um pico de aumento significativo (ANOVA,  $p < 0,01$ ; Tukey,  $\alpha = 0,05$ ) na estação chuvosa, para as três florestas (Anexo B). A média anual foi significativamente menor na floresta natural (ecossistema de referência), intermediária na floresta restaurada de 21 anos, e maior na floresta restaurada de 52 anos (Anexo C).

O teor de amônio no solo foi avaliado a fim de investigar diferenças entre as florestas estudadas. As florestas de 21 e 52 anos têm quantidades semelhantes de amônio no solo (8,37 e 7,13  $\mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA, respectivamente), e a floresta natural tem um teor de amônio no solo significativamente maior (11,14  $\mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA) (ANOVA,  $p < 0,01$ ; Tukey,  $\alpha = 0,05$ ) (Anexo D). A variação desse parâmetro ao longo do ano foi similar nas três florestas, com exceção do observado para a floresta de 21 anos na transição da estação seca para a chuvosa (Gráfico 4). Os maiores picos de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo ocorreram na estação chuvosa, tanto para a floresta natural, como para a floresta restaurada de 52 anos. Já a floresta de 21 anos apresentou os maiores picos de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo na transição estação seca-chuvosa e na estação chuvosa.

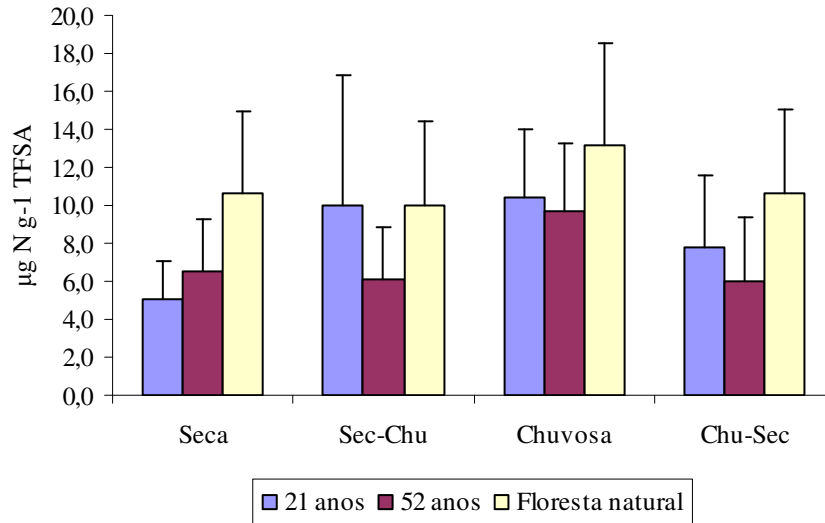


Gráfico 4 - Variação do teor de amônio no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

Na cronosequência estudada, foram encontradas diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) entre as florestas para teores de nitrato no solo, com evidências de que o teor de nitrato no solo aumenta com o aumento da idade da floresta. O Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) separou a floresta restaurada de 21 anos do grupo formado pela floresta restaurada de 52 anos e a floresta natural, consideradas estatisticamente semelhantes (Anexo E). O padrão de variação de nitrato no solo ao longo do ano foi semelhante nas três florestas, caracterizado por um aumento progressivo da estação seca até a transição estação chuvosa-seca (Gráfico 5). A única exceção observada ocorreu na floresta de 52 anos, na estação chuvosa, que apresentou um valor mais baixo do que o registrado para a transição estação seca-chuvosa. A média anual foi menor na floresta de 21 anos ( $13,15 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA), intermediária na de 52 anos ( $14,06 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA), e maior na floresta natural ( $19,67 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA).

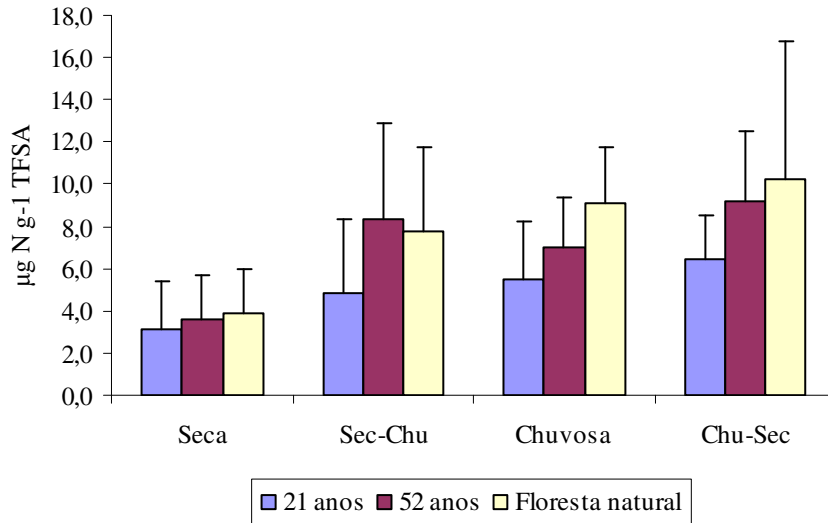


Gráfico 5 - Variação do teor de nitrato no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

O N inorgânico total é a soma das concentrações de amônio e nitrato do solo. A ANOVA deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas entre as florestas estudadas, e entre estações. O Teste de Tukey comparando N inorgânico total entre as idades isolou as florestas restauradas da floresta natural, e apontou variação sistemática dessa variável, com aumento do N inorgânico total variando com o aumento da idade da floresta (Tabela 3).

Tabela 3 - N inorgânico total na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>N mineral (µg N g<sup>-1</sup> TFSA)</i>
21 anos	13,34 <sup>B</sup>
52 anos	14,20 <sup>B</sup>
Floresta natural	18,89 <sup>A</sup>
Valor de F	21,690
pr>F	<0,0001
Média	15,45
C.V.	14,49

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

A média anual de N inorgânico total foi menor na floresta de 21 anos ( $13,34 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA), intermediária na de 52 anos ( $14,20 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA) e maior na floresta natural ( $18,89 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA). O padrão de variação desse parâmetro ao longo do ano foi semelhante entre as três áreas, caracterizado por um aumento progressivo do auge da estação seca para o auge da estação chuvosa, com valores intermediários nas transições entre estações (Gráfico 6) (Anexo F).



Entretanto, em valores absolutos, a floresta madura apresenta médias bem mais altas em todas as estações de amostragem. Os valores para teor de nitrato, amônio e N mineral para cada estação em cada floresta estudada estão descritos no Anexo G.

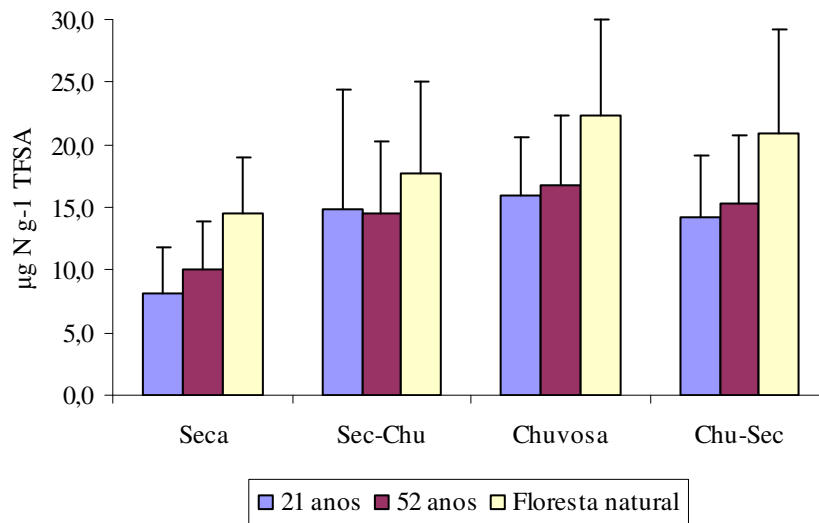


Gráfico 6 - Variação do teor de N inorgânico no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

A razão  $\text{NO}_3^+:\text{NH}_4^-$  foi calculada para testar a mudança na proporção dessas formas de N no solo ao longo da cronosequência estudada. A ANOVA indicou diferenças altamente significativas ( $p < 0,01$ ) para a razão  $\text{NO}_3^+:\text{NH}_4^-$  entre as áreas de estudo (Anexo H), entre as estações climáticas (Anexo D), e apontou a interação desses fatores também como altamente significativa ( $p < 0,01$ ). Entretanto, a variação desse indicador não foi sistemática ao longo da cronosequência (Anexo J), nem apresentou um padrão nítido de variação entre as florestas estudadas.

A Taxa Líquida de Mineralização foi avaliada através de uma ANOVA com dois fatores seguida de Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). A ANOVA apontou fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas entre as florestas estudadas, e de interação significativa entre idade e estação, porém não apontou diferenças entre estações (Tabela 4). As três florestas foram consideradas estatisticamente diferentes, com aumento da taxa líquida de mineralização ao longo da cronosequência.

Tabela 4 - Taxa Líquida de Mineralização para a cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>Taxa líquida de mineralização</i>
21 anos	0,95 <sup>C</sup>
52 anos	1,39 <sup>B</sup>
Floresta natural	1,91 <sup>A</sup>
Valor de F	45,130
pr>F	<0,0001
Média	1,41
C.V.	44,6

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

A média encontrada para a floresta natural é duas vezes maior que a da floresta de 21 anos. Na floresta natural, há um aumento significativo na taxa líquida de mineralização no auge da estação chuvosa (Gráfico 7) em relação à estação seca. Na floresta de 52 anos, a taxa líquida de mineralização é constante ao longo do ano. Em contrapartida, para a floresta restaurada de 21 anos, observou-se um comportamento contrário ao observado para a floresta natural, com taxas de mineralização maiores na estação seca do que na estação chuvosa. A média anual foi menor na floresta de 21 anos ( $0,94 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), intermediária na de 52 anos ( $1,54 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) e maior na floresta natural ( $2,01 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). Esse mesmo padrão foi observado através do desdobramento da interação entre idade da floresta e estação (Anexo K).

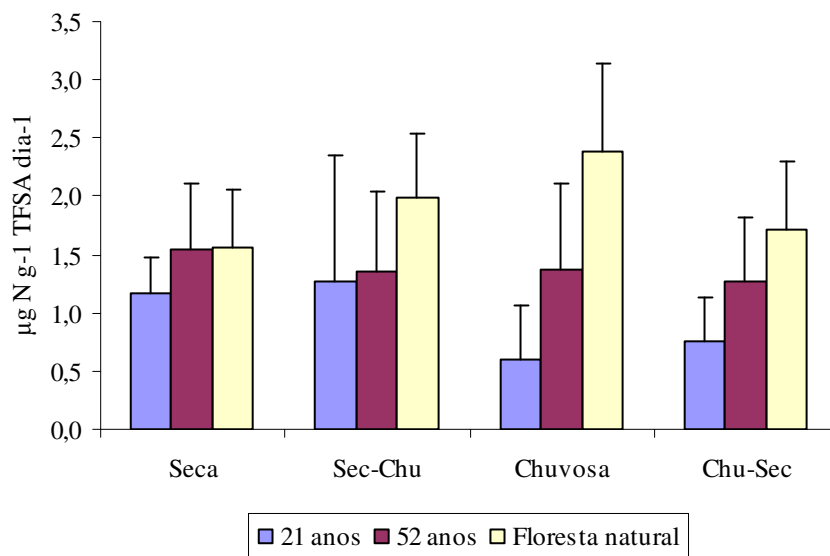


Gráfico 7 - Variação da Taxa Líquida de Mineralização no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

Foi encontrada também uma forte correlação entre as Taxas Líquidas de Mineralização e Nitrificação. A Taxa Líquida de Nitrificação apresentou uma forte correlação com o teor de  $\text{NH}_4^+$  do solo. A taxa líquida de nitrificação foi comparada entre as florestas da cronosequência de estudo e entre as estações. Os resultados encontrados fornecem fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas entre as florestas estudadas, e entre estações, e deu também indícios ( $p < 0,05$ ) de interação significativa entre esses dois fatores. As florestas restauradas foram consideradas semelhantes entre si, e diferentes da floresta natural ( $\alpha = 0,05$ ), com variação sistemática da taxa líquida de nitrificação, aumentando com o aumento da idade da floresta (Tabela 5).

Tabela 5 - Taxa Líquida de Nitrificação na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>Taxa líquida de nitrificação</i>
21 anos	1,42 <sup>B</sup>
52 anos	1,56 <sup>B</sup>
Floresta natural	2,29 <sup>A</sup>
Valor de F	41,920
pr>F	<0,0001
Média	1,75
C.V.	80,32

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Esse parâmetro variou de forma semelhante entre as duas florestas restauradas e diferentemente na floresta natural. Na floresta natural (ecossistema de referência) há um aumento na Taxa Líquida de Nitrificação desde a estação seca até o auge da estação chuvosa, quando então começa a decrescer até abril (Gráfico 8). Já para as duas florestas restauradas, os valores registrados para a Taxa Líquida de Mineralização foram mais baixos na estação seca, atingiram um pico em novembro, e decresceram em direção ao auge da estação chuvosa, em fevereiro, e diminuíram ainda mais até abril. A média anual foi menor na floresta restaurada de 21 anos ( $1,42 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), intermediária na de 52 anos ( $1,56 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), e maior na floresta natural ( $2,29 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ).

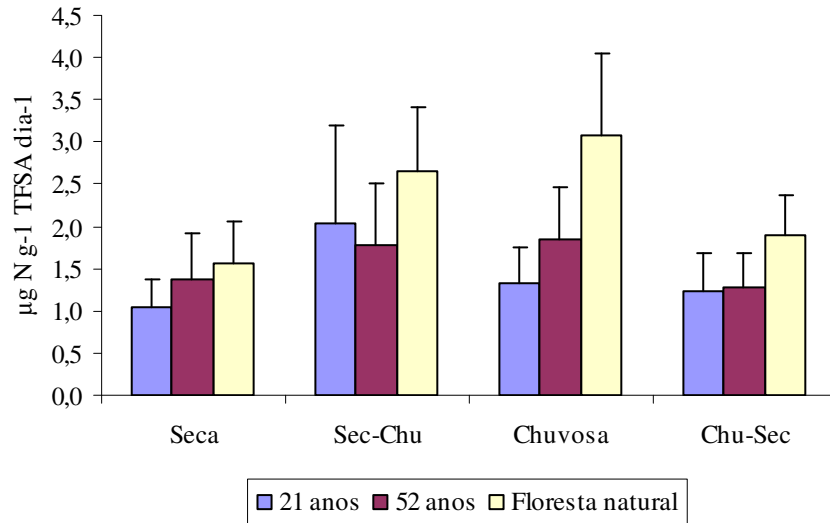


Gráfico 8 - Variação da Taxa Líquida de Nitrificação no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

### 2.2.2 Solo: teor de N e abundância natural de $^{15}\text{N}$

Uma ANOVA com um fator foi aplicada para testar possíveis diferenças entre a estação seca e a estação chuvosa para os valores de  $\delta^{15}\text{N}$  e para o teor de N ao longo do perfil do solo, nas três florestas estudadas. Essa análise indicou que não há variação significativa entre estações climáticas para nenhuma das duas variáveis. Por outro lado, uma ANOVA com dois fatores, com idade da floresta e profundidade no perfil como fontes de variação, deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de que esses dois fatores e a interação entre eles explicam as diferenças encontradas para  $\delta^{15}\text{N}$  e para a concentração de N no solo. O Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) para valores de  $\delta^{15}\text{N}$  mostrou diferenças significativas entre a floresta de 52 anos e um grupo formado pela floresta de 21 anos e a floresta natural. Portanto, a variação observada não é sistemática ao longo da cronosequência (Anexo L). Um Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) para valores de  $\delta^{15}\text{N}$  mostrou diferenças significativas, com variação sistemática através do perfil do solo (Anexo M), com maior enriquecimento nas camadas mais profundas e valores menores de  $\delta^{15}\text{N}$  nas camadas mais superficiais. O teste agrupou apenas as duas camadas mais profundas em um grupo com maiores valores de  $\delta^{15}\text{N}$ , e isolou as três primeiras camadas em grupos distintos.

Um Teste de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para o teor de N no solo mostrou diferenças significativas entre o grupo formado pelas florestas restauradas e o grupo que isola a floresta natural, com variação sistemática ao longo da cronosequência. Em valores absolutos, o teor médio de N no solo foi duas vezes maior na floresta natural do que em ambas as florestas restauradas (Anexo N). O teor de N no solo também variou com a profundidade do solo no perfil, apresentando diferenças significativas ( $p<0,01$ ), com variação sistemática através do perfil do solo (Teste de Tukey,  $\alpha=0.05$ ). Foram observadas maiores concentrações de N nas camadas mais superficiais e valores mais baixos nas camadas mais profundas, com cada camada sendo isolada em um grupo distinto (Anexo O). O desdobramento da interação dos fatores idade da floresta e profundidade no perfil do solo revela diferenças significativas entre todas as florestas estudadas tanto para  $\delta^{15}\text{N}$ , como para teor de N do solo (Tabela 6).

Tabela 6 - Distribuição dos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  e %N através do perfil do solo (0-50 cm) na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), com destaque para o tipo de solo de cada área

<i>Floresta</i>	<i>Solo</i>	<i>Camada</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	%N
21 anos	Latossolo Roxo	0-2,5	4,44 <sup>D</sup>	0,26 <sup>E</sup>
21 anos	Latossolo Roxo	2,5-5	6,10 <sup>C</sup>	0,14 <sup>D</sup>
21 anos	Latossolo Roxo	5-10	7,27 <sup>B</sup>	0,11 <sup>C</sup>
21 anos	Latossolo Roxo	10-30	8,26 <sup>A</sup>	0,08 <sup>B</sup>
21 anos	Latossolo Roxo	30-50	8,87 <sup>A</sup>	0,06 <sup>A</sup>
52 anos	Latossolo Roxo	0-2,5	3,94 <sup>C</sup>	0,22 <sup>D</sup>
52 anos	Latossolo Roxo	2,5-5	4,94 <sup>C</sup>	0,18 <sup>CD</sup>
52 anos	Latossolo Roxo	5-10	6,05 <sup>B</sup>	0,12 <sup>C</sup>
52 anos	Latossolo Roxo	10-30	8,27 <sup>A</sup>	0,07 <sup>B</sup>
52 anos	Latossolo Roxo	30-50	8,81 <sup>A</sup>	0,05 <sup>A</sup>
Flor. Nat.	Podzólico Vermelho-Amarelo	0-2,5	4,66 <sup>D</sup>	0,38 <sup>D</sup>
Flor. Nat.	Podzólico Vermelho-Amarelo	2,5-5	6,01 <sup>C</sup>	0,23 <sup>C</sup>
Flor. Nat.	Podzólico Vermelho-Amarelo	5-10	7,22 <sup>B</sup>	0,18 <sup>C</sup>
Flor. Nat.	Podzólico Vermelho-Amarelo	10-30	8,34 <sup>A</sup>	0,11 <sup>B</sup>
Flor. Nat.	Podzólico Vermelho-Amarelo	30-50	8,42 <sup>A</sup>	0,05 <sup>A</sup>

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Uma ANOVA com um fator seguida do Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) foram aplicados para cada floresta separadamente. Para as três florestas, foram encontrados fortes indícios ( $p<0,01$ ) de diferenças significativas tanto para  $\delta^{15}\text{N}$  como para a concentração de N através do perfil do solo. Os resultados indicam variação sistemática significativa do  $\delta^{15}\text{N}$  (Gráfico 9) (Tabela 7) através do perfil do solo. É importante observar que o padrão de variação é o mesmo para as três florestas estudadas.

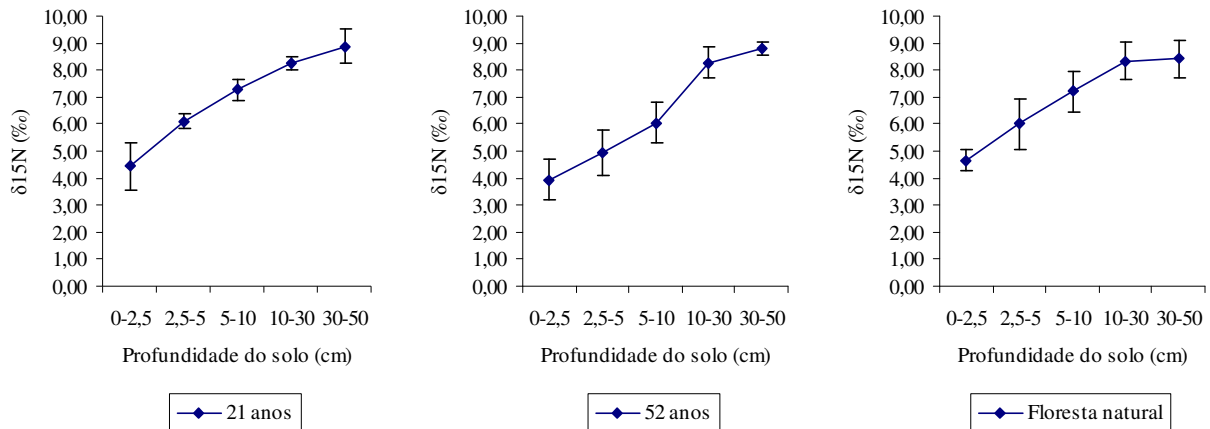


Gráfico 9 - Variação do  $\delta^{15}\text{N}$  através do perfil do solo (0-50 cm) nas florestas da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). As barras verticais representam os desvios padrões de cada média

Tabela 7 - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  no solo através do perfil do solo de 0-50 cm em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

21 anos		52 anos		Flor. Nat.	
Perfil (cm)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Perfil (cm)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Perfil (cm)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
0-2,5	4,44 <sup>D</sup>	0-2,5	3,94 <sup>C</sup>	0-2,5	4,66 <sup>D</sup>
2,5-5	6,10 <sup>C</sup>	2,5-5	4,94 <sup>C</sup>	2,5-5	6,01 <sup>C</sup>
5-10	7,27 <sup>B</sup>	5-10	6,05 <sup>B</sup>	5-10	7,22 <sup>B</sup>
10-30	8,26 <sup>A</sup>	10-30	8,27 <sup>A</sup>	10-30	8,34 <sup>A</sup>
30-50	8,87 <sup>A</sup>	30-50	8,81 <sup>A</sup>	30-50	8,42 <sup>A</sup>
Valor de F	92,22	Valor de F	88,12	Valor de F	37,12
pr>F	<0,0001	pr>F	<0,0001	pr>F	<0,0001
Média	6,99	Média	6,40	Média	6,93
C.V.	10,6	C.V.	14,23	C.V.	15,38

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

O Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) foi realizado para cada floresta separadamente e, em todas as florestas, indicou variação sistemática significativa do teor de N (Tabela 8) através do perfil do solo (Gráfico 10), com padrão de variação semelhante para as três florestas. A comparação do teor de N por camada entre as áreas revela que as maiores diferenças estão nas duas camadas mais superficiais, de 0-2,5 cm e 2,5-5 cm, com diferenças menos pronunciadas nas camadas de 5-10 cm e 10-30 cm, e valores equivalentes na camada de 30-50 cm.

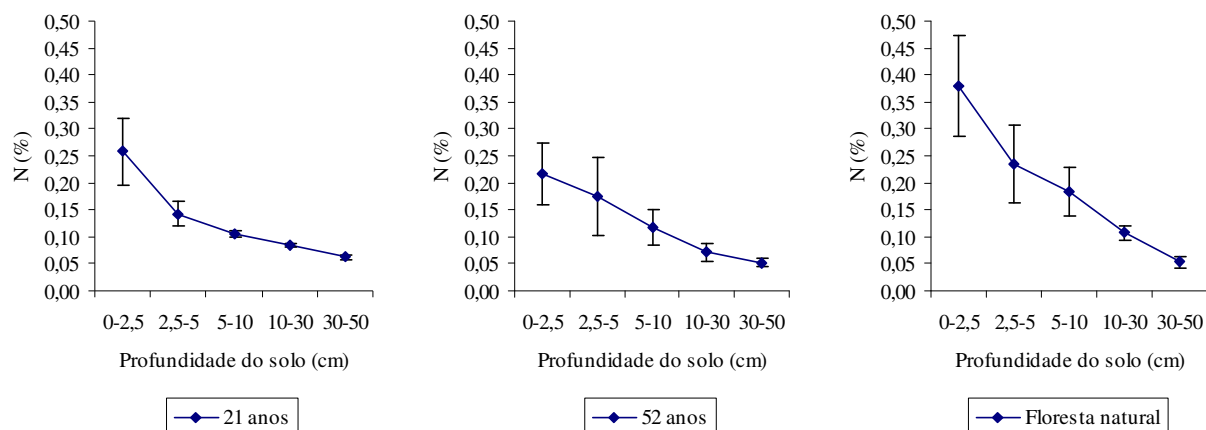


Gráfico 10 - Variação do teor de N através do perfil do solo (0-50 cm) nas florestas da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). As barras verticais representam os desvios padrões de cada média

Tabela 8 - Valores médios de porcentagem de N no solo através do perfil do solo de 0-50cm em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

21 anos		52 anos		Flor. Nat.	
Perfil (cm)	N (%)	Perfil (cm)	N (%)	Perfil (cm)	N (%)
0-2,5	0,26 <sup>E</sup>	0-2,5	0,22 <sup>D</sup>	0-2,5	0,38 <sup>D</sup>
2,5-5	0,14 <sup>D</sup>	2,5-5	0,18 <sup>CD</sup>	2,5-5	0,23 <sup>C</sup>
5-10	0,11 <sup>C</sup>	5-10	0,12 <sup>C</sup>	5-10	0,18 <sup>C</sup>
10-30	0,08 <sup>B</sup>	10-30	0,07 <sup>B</sup>	10-30	0,11 <sup>B</sup>
30-50	0,06 <sup>A</sup>	30-50	0,05 <sup>A</sup>	30-50	0,05 <sup>A</sup>
Valor de F	170,84	Valor de F	55,68	Valor de F	72,16
pr>F	<0,0001	pr>F	<0,0001	pr>F	<0,0001
Média	0,13	Média	0,12	Média	0,17
C.V.	5,4	C.V.	11,31	C.V.	14,58

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

### 2.2.3 Folhagem verde

Os resultados para folhagem verde, com amostras de 240 indivíduos arbóreos pertencentes a 91 espécies (Anexo P), demonstram que existem diferenças na ciclagem do N tanto entre as florestas da cronosequência estudada, como dessas para com o ecossistema de referência. A avaliação do  $\delta^{15}\text{N}$  foliar apontou a existência de diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) entre as florestas estudadas segundo o Teste de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 0,05$ ) (Tabela 9). Observou-se uma

variação sistemática, com aumento dos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar ao longo da cronosequência (Gráfico 11).

Tabela 9 - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar para a comunidade na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural) e valor-p para o Teste de Kruskal-Wallis

<i>Idade</i>	<i><math>\delta^{15}\text{N}</math> Foliar (‰)</i>
21 anos	0,69 <sup>C</sup>
52 anos	1,08 <sup>B</sup>
Floresta natural	3,47 <sup>A</sup>
Chi-quadrado	208,94
pr> Chi-quadrado	<0,0001
Média	1,75

Nota: médias seguidas da mesma letra não diferem entre si.

A floresta natural é cinco vezes mais enriquecida em  $\delta^{15}\text{N}$  foliar do que a floresta de 21 anos, e três vezes mais enriquecida do que a floresta de 52 anos. Não foram observadas diferenças significativas entre as estações seca e chuvosa para os valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar no experimento como um todo nem para cada floresta isoladamente.

O coeficiente de correlação de Pearson indicou correlação positiva altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre o enriquecimento em  $\delta^{15}\text{N}$  e a concentração de N foliar. O teor de N foliar foi avaliado através de uma ANOVA com dois fatores seguida de Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Foram encontrados fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas entre as florestas estudadas, entretanto, não foram apontadas diferenças entre estações, ou interação significativa entre idade da floresta e estação climática (Tabela 10). O Teste de Tukey isolou a floresta de 21 anos (2,57%) em um grupo, e agrupou a floresta de 52 anos (2,87%) e a floresta natural (2,99%) em outro grupo, sugerindo que o teor de N foliar aumenta ao longo da cronosequência.



Tabela 10 - Valores médios do teor de N foliar na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>Teor de N foliar (%)</i>
21 anos	2,57 <sup>B</sup>
52 anos	2,87 <sup>A</sup>
Floresta natural	2,99 <sup>A</sup>
F	0,71
pr>F	<0,0001
Média	2,81
C.V.	12,35

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Apesar de a ANOVA com dois fatores não ter indicado interação significativa entre idade das florestas e estação climática, o valor-p ficou pouco acima do estabelecido ( $p=0,09$ ), portanto, uma ANOVA com um fator e Teste de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) foram realizados para comparar o comportamento de cada floresta separadamente em duas estações distintas. Essa análise apontou a existência de diferenças significativas ( $p<0,05$ ) no teor foliar de N entre as estações climáticas apenas para a floresta de 21 anos (Tabela 11).

Tabela 11 - Valores médios do teor de N foliar no auge da estação seca e chuvosa para a floresta restaurada de 21 anos, valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Estação</i>	<i>Teor de N foliar (%)</i>
Seca	2,46 <sup>B</sup>
Chuvosa	2,70 <sup>A</sup>
Valor de F	4,64
pr>F	0,0328
Média	2,58
C.V.	12,77

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

As proporções de espécies de leguminosas (Fabaceae) e de não-leguminosas (outras famílias botânicas) são diferentes nas florestas estudadas, como resultado das espécies selecionadas para o reflorestamento nas áreas restauradas e de processos estocásticos ocorridos no ecossistema de referência. Na amostragem aleatória estratificada realizada, a porcentagem de espécies pertencentes à família Fabaceae foi de 77,5% na floresta de 21 anos, de 65% na floresta de 52 anos, e de 41,2% na floresta natural. A relação de espécies amostradas e os valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar e teor de N foliar de cada espécie em cada floresta estudada estão especificados no Anexo P.

Diferenças significativas foram encontradas considerando-se leguminosas x não-leguminosas como fonte de variação para as variáveis  $\delta^{15}\text{N}$  foliar e teor de N foliar. O teste de Kruskal-Wallis revelou valores significativamente mais altos de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar ( $p>0,01$ ) em espécies de leguminosas ( $1,25\pm 2\%$ ) do que em espécies de não-leguminosas ( $1,92\pm 1,92\%$ ) (Tabela 12). Quando analisadas isoladamente para cada floresta, essas diferenças foram significativas apenas para a floresta de 21 anos ( $p<0,05$ ) e para a floresta de 52 anos ( $p<0,01$ ). Na floresta natural as médias foram estatisticamente semelhantes ( $p=0,92$ ) (Anexo Q).

Tabela 12 - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p, Chi-quadrado e agrupamento do Teste de Kruskal-Wallis

<i>Grupo</i>	<i><math>\delta^{15}\text{N}</math> Foliar</i>
Leguminosas	1,25 <sup>B</sup>
Não-leguminosas	1,92 <sup>A</sup>
Chi quadrado	208,94
pr> Chi quadrado	<0,0001
Média	1,59

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

A Média dos Mínimos Quadrados (LSMEANS) revelou teores significativamente mais altos de N foliar ( $p>0,01$ ) em espécies de leguminosas ( $3,15\pm 0,66\%$ ) ( $n=124$ ) do que em espécies de não-leguminosas ( $2,70\pm 0,69\%$ ) ( $n=355$ ) (Tabela 13). Quando analisadas isoladamente para cada floresta, essas diferenças foram significativas para a floresta de 21 anos ( $p<0,01$ ) e para a floresta de 52 anos ( $p<0,01$ ). Na floresta natural, as médias de ambas as variáveis foram estatisticamente semelhantes ( $p=0,99$ ) entre os grupos (Anexo P).

Tabela 13 - Valores médios do teor de N foliar na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p para a Média dos Mínimos Quadrados, e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Grupo</i>	<i>Teor de N foliar (%)</i>
Leguminosas	3,15 <sup>A</sup>
Não-leguminosas	2,70 <sup>B</sup>
F	38,58
pr>F	<0,0001
Média	2,92
C.V.	11,36

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Para complementar a análise da ciclagem biogeoquímica nas comunidades florestais estudadas, o teor de P foliar também foi avaliado. Uma ANOVA com dois fatores deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas no teor de P foliar entre as florestas estudadas, porém, não apontou diferenças entre estações, ou interação significativa entre idade da floresta e estação climática (Tabela 14). O Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) agrupou as florestas restauradas e isolou a floresta natural em outro grupo. O teste revelou que o teor foliar de P varia sistematicamente, diminuindo com o aumento da idade da floresta. Esse resultado para o teor de P é contrário ao padrão observado para o teor de N foliar, que aumenta com o aumento da idade da floresta.

Tabela 14 - Valores médios do teor de P foliar na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>Teor de P foliar (%)</i>
21 anos	0,17 <sup>A</sup>
52 anos	0,16 <sup>A</sup>
Floresta natural	0,13 <sup>B</sup>
Valor de F	5,3
pr>F	0,002
Média	0,15
C.V.	-5,69

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

#### 2.2.4 Razão N:P da comunidade

A relação estequiométrica entre N e P foi avaliada para a folhagem verde e para a serrapilheira na escala da comunidade nas três florestas. As razões N foliar:N da serrapilheira e P foliar:P da serrapilheira foram utilizadas como uma medida de retranslocação desses dois nutrientes. Quanto maiores os valores para um dado nutriente, maior a taxa de retranslocação, indicando limitação nutricional da comunidade por tal nutriente. Para uma análise de qual nutriente (N ou P) está sendo mais limitante para cada floresta, outro indicador foi utilizado; um índice calculado através da divisão da razão N:P foliar pela razão N:P da serrapilheira, e é baseado em variações proporcionalmente diferentes nas razões N:P foliar e N:P da serrapilheira. O índice indica reabsorção relativa de um nutriente em relação ao outro, de forma que quando  $> 1$  indica maior tendência de reabsorção de N em relação a P, enquanto um índice  $< 1$  indica maior

tendência de reabsorção de P em relação a N. As correlações entre o índice calculado e as porcentagens de N e P foliares e da serrapilheira foram analisadas através do coeficiente de correlação de Pearson, sendo significativas em todos os casos ( $p > 0,05$ ) e altamente significativa ( $p < 0,01$ ) para %P da serrapilheira e %N foliar. Essa correlação indica que as variações nas razões N:P foliar, N:P da serrapilheira e do índice calculado são devidas a variações de ambos os elementos.

Uma ANOVA com dois fatores seguida de Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) foram utilizados para avaliar a razão N:P foliar. A ANOVA deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas na razão N:P foliar entre as florestas estudadas, porém, não apontou diferenças entre estações, ou interação significativa entre idade da floresta e estação climática (Tabela 15). O Teste de Tukey isolou cada floresta em um grupo distinto (Anexo R). A razão N:P foliar variou sistematicamente ao longo da cronosequência florestal estudada, aumentando com o aumento da idade da floresta.

Tabela 15 - Razões N:P foliar e da serrapilheira, e índice N:P foliar/N:P serrapilheira calculadas em base molar para a comunidade vegetal em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural)

<i>Floresta</i>	<i>N:P foliar</i>	<i>N:P da serrapilheira</i>	<i>N:P foliar/N:P da serrapilheira</i>
21 anos	15,62 <sup>C</sup> ± 1,62 (9)	15,51 <sup>C</sup> ± 2,37 (9)	1,02 <sup>B</sup> ± 0,11 (9)
52 anos	18,53 <sup>B</sup> ± 2,48 (10)	21,07 <sup>B</sup> ± 6,02 (10)	0,93 <sup>B</sup> ± 0,22 (10)
Flor. Nat.	22,38 <sup>A</sup> ± 1,13 (10)	30,25 <sup>A</sup> ± 2,10 (10)	0,74 <sup>A</sup> ± 0,06 (10)

Nota: São dados os valores médios ± desvio padrão, juntamente com o n amostral (n). As diferenças entre as florestas foram testadas através de uma ANOVA com um fator seguida de Teste de Tukey. As diferenças encontradas ( $p < 0,01$ ,  $\alpha = 0,05$ ) são indicadas em letras maiúsculas

Complementarmente, a Razão N:P da serrapilheira foi avaliada através de uma ANOVA com dois fatores seguida de Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). A ANOVA deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas na Razão N:P da serrapilheira entre as florestas estudadas, porém, não apontou diferenças entre estações, ou interação significativa entre idade da floresta e estação climática. O Teste de Tukey isolou cada floresta em um grupo distinto (Anexo S). A razão N:P da serrapilheira variou sistematicamente ao longo da cronosequência florestal estudada, aumentando com o aumento da idade da floresta.

O índice N:P foliar/N:P da serrapilheira foi avaliado através de uma ANOVA com dois fatores seguida de Teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). A ANOVA deu fortes indícios ( $p < 0,01$ ) de diferenças significativas no índice N:P foliar/N:P da serrapilheira entre as florestas estudadas,

porém, não apontou diferenças entre estações, ou interação significativa entre idade da floresta e estação climática. O Teste de Tukey agrupou as florestas restauradas, e isolou a floresta natural em outro grupo (Tabela 15) (Anexo T). A análise mostrou também que esse índice varia sistematicamente ao longo da cronosequência florestal, diminuindo com o aumento da idade da floresta (Gráfico 11).

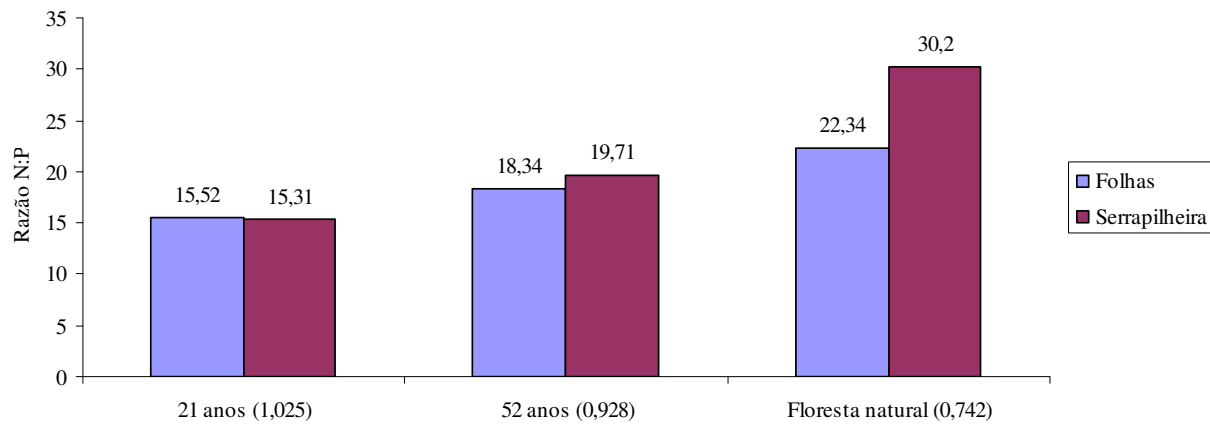


Gráfico 11 - Razões N:P foliar e da serrapilheira de cada comunidade florestal da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). Os valores entre parênteses correspondem aos índices N:P foliar/N:P da serrapilheira.  $n$  amostral = 10 amostras compostas

## 2.3 Discussão

### 2.3.1 Mudanças na dinâmica do nitrogênio nos solos ao longo da cronosequência

Como ressaltado por Vitousek et al. (1989), os padrões da dinâmica do nitrogênio na sucessão secundária em áreas agrícolas abandonadas (*old-field succession*) são mais variáveis e diferentes dos que ocorrem na sucessão primária, e na sucessão secundária em áreas que sofreram algum tipo de exploração, como o corte raso da floresta, e foram abandonadas logo em seguida. Essa variabilidade é, em grande parte, devida a diferenças no histórico de distúrbios das áreas (VITOUSEK et al., 1989). O padrão geral descrito por esses autores para a evolução da dinâmica do nitrogênio durante a sucessão secundária em áreas agrícolas abandonadas é caracterizado por uma baixa disponibilidade inicial de N, com aumento gradual durante a sucessão. Os padrões de mudança na ciclagem biogeoquímica das florestas restauradas amostradas nesse estudo podem ser comparados aos das áreas agrícolas abandonadas em sucessão secundária por regeneração natural (DAVIDSON et al., 2007), no sentido de que também foram utilizadas para fins agrícolas por muitos anos, e que depois as culturas foram sendo substituídas gradativamente pela vegetação original.

Na cronosequência estudada, os teores de N no solo aumentaram com o aumento da idade da floresta, e chegaram a ser duas vezes maiores na floresta natural do que nas florestas restauradas. Esse resultado confirma o aumento no teor de N no solo ao longo da sucessão (VITOUSEK et al., 1989; DAVIDSON et al., 2007). As análises demonstraram uma grande diminuição da concentração de N com o aumento da profundidade do solo, em consonância com outros estudos (BUSTAMANTE et al., 2004).

Os valores encontrados para teores de amônio nas florestas restauradas, e de nitrato nas três florestas estão dentro da faixa relatada para florestas tropicais (2-10  $\mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA), desde o México até a Amazônia brasileira (ROBERTSON, 1984; VITOUSEK e DENSLOW, 1986; MATSON et al., 1987; LIVINGSTON et al., 1988; MONTAGNINI e BUSCHBACHER, 1989; GARCÍA-MÉNDEZ et al., 1991; LUIZÃO et al., 1992; NEILL et al., 1995). Entretanto, a floresta natural (ecossistema de referência) apresentou um teor de amônio um pouco mais

elevado ( $11,13 \mu\text{g N g}^{-1}$  TFSA). Contrariamente ao observado por Neill et al. (1995), os teores mais altos de amônio no solo foram encontrados na estação chuvosa, nas três florestas, e não na estação seca. Por outro lado, os maiores valores para teor de nitrato no solo foram encontrados na transição entre as estações chuvosa e seca, assim como observado por Neill et al. (1995) na Amazônia brasileira.

Apesar de haver relatos na literatura de que o amônio é a forma dominante de N inorgânico no solo em sistemas limitados por N, enquanto o nitrato é acumulado onde o N disponível é mais abundante (VITOUSEK et al., 1982; DAVIDSON et al., 2000), na cronosequência florestal estudada, observou-se um aumento no teor de amônio do solo ao longo da sucessão secundária (Anexo D). Resultados contrários, indicando uma tendência, todavia não significativa, de diminuição do teor de amônio com o avanço da sucessão foram encontrados em uma cronosequência florestal na Amazônia (DAVIDSON et al., 2007).

A variação da razão  $\text{NO}_3^+:\text{NH}_4^-$  não foi sistemática ao longo da cronosequência, nem apresentou um padrão claro, de maneira que não foi considerada um bom indicador para a intensidade da ciclagem do N no conjunto de florestas em questão. Em contrapartida, a soma de  $\text{NO}_3^+$  e  $\text{NH}_4^-$  forneceu indícios claros de aumento da disponibilidade de N no solo com o avanço da sucessão secundária, com valores médios de N inorgânico semelhantes entre si nas florestas restauradas, e significativamente maiores na floresta natural.

As médias anuais obtidas para as taxas líquidas de mineralização e de nitrificação das florestas restauradas caíram dentro da faixa relatada para florestas tropicais ( $0,5\text{-}2 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) (ROBERTSON, 1984; VITOUSEK e DENSLOW, 1986; MATSON et al., 1987; GARCIA-MÉDEZ et al., 1991; LUIZÃO et al., 1992). Por outro lado, a taxa líquida de nitrificação média observada para a floresta natural ( $2,29 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), encontra-se um pouco acima da média, mas abaixo do relatado por Neill et al. (1995) para uma área na Amazônia ( $3,5 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). Na floresta natural, os picos observados para ambas as taxas ocorreram na estação chuvosa; padrão similar ao encontrado por Luizão et al. (1992) na Amazônia, em Manaus.

As taxas líquidas de mineralização e de nitrificação aumentaram com o aumento da idade da floresta, apesar de as diferenças granulométricas de solo entre as florestas estudadas favorecerem maiores taxas de mineralização nas florestas restauradas. Esses resultados estão de acordo com o descrito para a sucessão secundária em áreas agrícolas abandonadas (VITOUSEK et al., 1989; DAVIDSON et al, 2007), indicando aumento da disponibilidade de N no solo à medida que a sucessão secundária avança. A menor média anual de umidade do solo na floresta natural pode ser atribuída ao fato de o solo sob essa floresta ser o mais arenoso entre as florestas estudadas (Tabela 1). Os resultados encontrados sugerem um potencial crescente, com o avanço da sucessão secundária, para perdas de  $\text{NO}_3^-$ , tanto por lixiviação quanto por emissões gasosas (DAVIDSON et al., 2000) com o avanço da sucessão.

De maneira geral, os resultados para mineralização do N, analisados em conjunto, corroboram os dados encontrados por Davidson et al. (2007), em uma cronosequência florestal na Amazônia, e indicam aumento da disponibilidade de N no solo, e no aumento do potencial para perdas de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação e por emissões gasosas com o desenvolvimento da floresta com a idade na cronosequência estudada, demonstrando a tendência à recuperação gradual da ciclagem do N com o avanço da sucessão secundária. Esse resultado indica que, à medida que a idade da floresta aumenta, o comportamento dos processos da ciclagem do N e a intensidade dos processos da ciclagem do N refletidos pelas taxas líquidas de mineralização e de nitrificação assemelham-se mais ao comportamento e à intensidade comuns a florestas preservadas.

A variação dos valores de  $^{15}\text{N}$  da matéria orgânica do solo encontrada entre as florestas estudadas é bem menor que a reportada em outros estudos, como o observado para o bioma Cerrado (BUSTAMANTE et al., 2004). Em contrapartida, um padrão claro de aumento de  $\delta^{15}\text{N}$  do solo com o aumento da profundidade do solo, seguindo a tendência clássica descrita por Nadelhoffer e Fry (1988) foi observado nas florestas estudadas. Esse padrão foi observado também no Cerrado (BUSTAMANTE et al., 2004; NARDOTO, 2005), em florestas de terra firme na Amazônia (PICCOLO et al., 1996), e em vários outros estudos (HÖGBERG, 1997). Segundo Högberg (1997), esse maior enriquecimento isotópico com a profundidade do solo é característico de florestas limitadas por N. De maneira geral, a maior variação ocorreu nos 30 primeiros centímetros do solo.



### 2.3.2 Variações nos teores de N e valores de $\delta^{15}\text{N}$ foliar ao longo da cronosequência

A média de teor de N foliar encontrada para a floresta madura ( $2,99 \pm 0,58\%$ ) encontra-se acima da faixa relatada para de florestas tropicais maduras ( $1,9 \pm 0,8\%$ ) (MARTINELLI et al., 1999). O teor de N foliar forneceu outro indicativo de que as florestas restauradas tornam-se mais ricas em N com o avanço da sucessão. A floresta de 52 anos é mais semelhante à floresta natural do que à floresta mais jovem em relação à porcentagem de N foliar.

A média de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar encontrada para a floresta nativa ( $3,5 \pm 1,1\%$ ) foi similar aos valores encontrados em florestas tropicais maduras ( $3,7 \pm 3,5\%$ ) (MARTINELLI et al., 1999). Em contrapartida, o valor médio encontrado para a floresta de 21 anos está mais próximo a valores relatados para o bioma Cerrado (BUSTAMANTE et al., 2004).

Maiores valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar são indicativos de maior disponibilidade de N, associada a maiores perdas (CRAINE et al., 2009). Um aumento significativo da abundância natural de  $^{15}\text{N}$  foliar foi observado ao longo da cronosequência, sugerindo que as perdas de nitrogênio aumentam com a idade da floresta, enriquecendo o substrato em  $^{15}\text{N}$  (VITOUSEK et al., 1989; MARTINELLI et al., 1999).

Diferenças significativas entre espécies de leguminosas x de não-leguminosas foram encontradas entre as três florestas estudadas, tanto para  $\delta^{15}\text{N}$  foliar, como para o teor de N foliar. O conteúdo foliar de N em espécies de leguminosas foi maior que o de espécies de não-leguminosas na cronosequência florestal estudada, em consonância com outros estudos (MCKEY, 1994; ROGGY et al., 1999A, B; VITOUSEK et al., 2002; SCHMIDT e STEWART, 2003; BUSTAMANTE et al., 2004). Apesar de a porcentagem de leguminosas amostradas ser progressivamente menor ao longo da cronosequência, o conteúdo foliar de N da comunidade é crescente com o aumento da idade da floresta. Essa é uma evidência de que, na cronosequência estudada, a influência da idade da floresta é mais determinante no teor de N foliar da comunidade do que a proporção entre espécies de leguminosas e de não-leguminosas. A partir desse resultado,

pode-se sugerir que as florestas restauradas de 21 e 52 anos ainda são mais limitadas por N do que a floresta natural (ecossistema de referência). Mais adiante, essas diferenças podem ser um indicativo de que a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (VITOUSEK et al., 2002) através de simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium* é um processo importante nas florestas restauradas estudadas. Adicionalmente, valores significativamente menores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar ( $p > 0,01$ ) em espécies de leguminosas ( $1,25 \pm 2$  ‰), em comparação a espécies de não-leguminosas ( $1,92 \pm 1,92$  ‰) (Tabela 12), também são indicativos de FBN. O fato de os valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar serem estatisticamente semelhantes em espécies de leguminosas e de não-leguminosas na floresta nativa, e serem diferentes em ambas as florestas restauradas, indica que a FBN não é um processo tão importante na floresta madura relativamente à sua importância para as florestas em restauração, fornecendo mais uma evidência de que as florestas restauradas são mais limitadas por N.

Contrariamente ao observado para o teor de N foliar, o teor de P foliar (as concentrações de P em tecidos biologicamente ativos) diminui significativamente com o avanço da sucessão secundária. Ambos esses padrões apoiam a hipótese que em etapas iniciais da sucessão secundária em florestas tropicais o N é o nutriente mais limitante, e que, em etapas mais finais da sucessão secundária, o P é o nutriente mais limitante (Davidson et al., 2007).

A razão N:P foliar variou sistematicamente ao longo da cronosequência florestal estudada, aumentando com o aumento da idade da floresta. Segundo Koerselman e Meuleman (1996), a razão N:P foliar encontrada para a floresta restaurada de 21 anos (15) indica que a comunidade pode estar limitada tanto por N como por P, enquanto os valores encontrados para a floresta restaurada de 52 anos (18) e para a floresta nativa (22) indicam que ambas as florestas estão mais limitadas por P do que por N. Assim como descrito por Craine et al. (2009), os maiores valores para a razão N:P foram observados nas florestas com maiores valores de  $\delta^{15}\text{N}$  foliar.

No compartimento serrapilheira, a razão N:P variou sistematicamente ao longo da cronosequência florestal estudada, aumentando com o aumento da idade da floresta. A razão N:P da serrapilheira na floresta madura foi de 30 ( $\pm 2,10$ ), similar à média global de 29 relatada para florestas temperadas latifoliadas (McGRODDY et al., 2004). No entanto, esse valor da razão N:P

da floresta madura estudada ficou bem abaixo do valor de 62 ( $\pm 4,9$ ) relatado para florestas tropicais (McGRODDY et al., 2004) e do encontrado por Davidson et al. (2007) em florestas maduras na Amazônia brasileira (50-68). Não foram encontrados, na literatura, outros estudos na Floresta Estacional Semidecidual da Mata Atlântica, impossibilitando comparações mais esclarecedoras.

O índice N:P foliar/N:P da serrapilheira variou sistematicamente ao longo da cronosequência florestal, diminuindo com o aumento da idade da floresta. O agrupamento revelado sugere que ambas as florestas em restauração ainda são mais limitadas por N do que por P em comparação à floresta nativa, uma vez que as médias desse índice para as florestas em restauração foram consideradas estatisticamente semelhantes entre si e diferentes da média da floresta nativa. As florestas em restauração apresentaram um padrão de reabsorção de N e P similar ao encontrado em florestas temperadas (McGRODDY et al., 2004), com pequenas diferenças entre as razões N:P foliar e N:P da serrapilheira (16:1 vs 15:1 na de 21 anos; 18:1 vs 20:1 na de 52 anos). Como esperado, a floresta madura apresentou um padrão típico de florestas tropicais (McGRODDY et al., 2004), com diferenças maiores entre essas razões (22:1 vs 30:1). Esses resultados fornecem fortes evidências de que ambas as florestas restauradas ainda não possuem ciclagens de N e P características de florestas tropicais maduras, como a floresta nativa tomada como referência, que apresenta uma forte tendência para reabsorção de P relativa à de N (McGRODDY et al., 2004). Mais adiante, o fato de a razão N:P foliar ter sido maior do que a da serrapilheira na floresta restaurada de 21 anos indica que essa floresta reabsorve mais N do que P, com N:P foliar/N:P da serrapilheira  $>1$ . Por sua vez, a floresta restaurada de 52 anos já apresenta índice  $<1$ , indicando maior reabsorção de P, porém, em proporções ainda não semelhantes à floresta madura. Esses resultados apoiam a hipótese de que as florestas mais jovens são menos limitadas por P e mais limitadas por N em relação a florestas mais velhas (DAVIDSON et al., 2007), uma vez que florestas em estágios sucessionais mais avançados e florestas maduras reabsorvem mais P comparativamente a N antes da abscisão foliar. A mudança de economia de N para economia de P (DAVIDSON et al., 2007), deve ocorrer em florestas restauradas, quando reflorestadas com alta diversidade de espécies e predominância de nativas regionais, com mais de 52 anos para a Floresta Estacional Semidecidual. Esses resultados indicam que a recuperação da ciclagem de N ainda não foi completamente atingida nas florestas em restauração estudadas.

### 2.3.3 Mecanismos de acumulação de N nas florestas restauradas

Os resultados encontrados levam a crer que há um acúmulo de nitrogênio à medida que as florestas restauradas tornam-se mais antigas, e que esse acúmulo é devido ao próprio processo de envelhecimento das florestas e não a diferenças entre os sítios de estudo. Entretanto, apesar de essa interpretação parecer plausível, é necessário ressaltar que, além da idade da floresta restaurada, outros fatores não controlados influenciam a dinâmica do N de forma diferente em cada uma dessas florestas. Mesmo estando situadas na mesma região, e pertencendo à mesma formação florestal, as florestas que formam a cronosequência estudada estão sujeitas a diferenças de temperatura, precipitação, umidade, proximidade dos corpos hídricos e altura do lençol freático, características físicas e químicas do solo, composição de espécies, etc, além de diferenças no histórico de perturbação das áreas.

A reacumulação de N no ecossistema necessariamente implica que as entradas desse elemento no sistema sejam maiores que as saídas. Esse processo certamente envolve mecanismos ecossistêmicos que promovam um aumento das entradas de N no ecossistema, assim como um controle maior sobre as saídas de N, de forma a aumentar o tempo de residência desse elemento na floresta. Vários mecanismos devem estar envolvidos nas mudanças demonstradas na ciclagem do N para as florestas restauradas. Ao longo da sucessão secundária dessas áreas, é provável que cada mecanismo influencie em graus diferentes de importância as mudanças graduais na ciclagem do N.

Como discutido anteriormente, a fixação biológica do nitrogênio através da simbiose entre leguminosas e bactérias do gênero *Rhizobium* parece ser mais importante quanto mais jovem é a floresta na cronosequência estudada. O acúmulo de matéria orgânica no solo também pode promover um aumento no teor de N no ecossistema (KAYE et al., 2003), constituindo-se de um mecanismo importante em situações em que o histórico de degradação tenha promovido perdas significativas de matéria orgânica do solo. As plantas podem aumentar o tempo de residência do N no ecossistema através de mudanças nas taxas de retranslocação desse elemento antes da

abscisão foliar. Os resultados do índice razão N:P foliar/N:P da serrapilheira forneceram uma evidência de diferenças nesse controle entre as comunidades estudadas, com maiores taxas de retranslocação quanto mais jovem é a floresta. Além do citado acima, certamente existem outros mecanismos atuando na reacumulação de N no ecossistema, incluindo a deposição atmosférica de N, a fixação de N por organismos fixadores de vida livre que habitam o solo, a serrapilheira, as cascas das árvores e as superfícies das folhas, associação com micorrizas, etc.

Este trabalho demonstrou as mudanças que ocorrem no ciclo do N ao longo de uma cronosequência florestal. No entanto, restam ainda várias dúvidas de como essas mudanças ocorrem. Como processos vitais que controlam a dinâmica do nitrogênio foram alterados ao longo da cronosequência? Por que sistemas florestais maduros acumulam nitrogênio? Quais os mecanismos de entrada e de saída que permitem o enriquecimento observado? Estudos futuros devem concentrar-se em responder a essas perguntas, principalmente, dando ênfase à comunidade microbiana que, como demonstrado em outros estudos, tem um papel fundamental como moduladora do ciclo do nitrogênio.

### 3 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados são um indicativo de que as florestas restauradas, mesmo com 52 anos de idade, ainda não restauraram a ciclagem de N característica de uma floresta tropical madura. A floresta natural apresenta uma ciclagem de N mais aberta do que as áreas em processo de restauração, as quais são mais limitadas por N. Ambas as florestas restauradas ainda são mais limitadas por N do que por P em comparação à floresta natural. A floresta restaurada de 52 anos está em uma condição nutricional mais próxima à floresta natural (ecossistema de referência) do que à floresta restaurada de 21 anos, no que se refere às concentrações biológicas de P. Em etapas iniciais da sucessão secundária, em florestas tropicais em restauração, o N é o nutriente mais limitante, e, em etapas mais finais da sucessão, o P passa a ser mais limitante em relação ao N, assim como ocorre para florestas secundárias resultantes da expressão da regeneração natural (Davidson et al., 2007). Pelos resultados obtidos é possível afirmar que as florestas em processo de restauração estudadas estão seguindo uma trajetória de desenvolvimento caracterizada por uma ciclagem de N cada vez mais parecida com a de uma floresta natural madura, refletida pelo comportamento e pela intensidade dos processos da ciclagem do N. Através dos modelos de restauração utilizados para as florestas da cronosequência estudada, os processos da ciclagem do N são recuperados à medida que a floresta desenvolve-se, com reacumulação de N no sistema, aumento da disponibilidade de N, e uma clara tendência de mudança na economia de N para economia de P típica de florestas tropicais maduras.

A inclusão de florestas restauradas mais jovens, com menos de 20 anos, em cronosequências florestais como a do presente estudo pode fornecer evidências ainda mais marcantes de como a recuperação da ciclagem biogeoquímica ocorre na sucessão secundária para áreas reflorestadas para fins de conservação. Pesquisas adicionais voltadas para a diversidade e atividade da microbiota do solo dessas áreas são importantes para auxiliar na compreensão das diferenças da ciclagem do N encontradas em áreas restauradas de diferentes idades. Possivelmente, a transposição de solo das camadas superficiais proveniente de áreas naturais preservadas (com as devidas precauções para não causar impactos severos) para florestas restauradas com uma fisionomia florestal já formada possa acelerar a recuperação de processos

da ciclagem de nutrientes, como a decomposição de serrapilheira, acelerando a recuperação da área como um todo.

## REFERÊNCIAS

AERTS, R.; CHAPIN, F.S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. In: FITTER, A.; RAFAELLI, D. (Ed.). **Advances in ecological research**. San Diego: Academic Press, 2000. v. 30, p. 1-67.

AIDAR, M.P.M.; SCHIMIDT, S.; MOSS, G.; STEWART, G.R.; JOLY, C.A. Nitrogen use strategies of neotropical rainforest trees in threatened Atlantic Forest. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 26, n. 3, p. 389-399, Mar. 2003.

AMUNDSON, R.; AUSTIN, A.T.; SCHUUR, E.A.G.; YOO, K.; MATZEK, V.; KENDALL, C.; UEBERSAX, A.; BRENNER, D.; BAISDEN, W.T. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 17, n. 1, p. 1031-1040, Mar. 2003.

BELLINAZZI JUNIOR, R.; GALETI, P. A.; LOMBARDI NETO, F.; PESSOA, N. da S. **Plano diretor de uso e manejo da bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeirinha, Município de Iracemópolis, SP**. Projeto de pesquisa CATI/DEXTRU/CTR. 1987. 46 p.

BENAYAS, J. M. R.; NEWTON, A. C.; DIAZ, A.; BULLOCK, J. M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. **Science**, Washington, v. 325, p. 1121-1124, Ago. 2009.

BINKLEY, D.; HART, S.C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils. **Advances in Soil Science**, Bushland, v. 10, p. 57-112, 1989.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. **Restoration Ecology**, Tucson, v. 2, p. 97-111, Jun. 1994.

BUSTAMANTE, M.M.C.; MARTINELLI, L.A.; SILVA, D.A.; CAMARGO, P.B.; KLINK, C.A.; DOMINGUES, T.F.; SANTOS, R.V. N-15 natural abundance in woody plants and soils of central Brazilian savannas (Cerrado). **Ecological Applications**, Washington, v. 14, n. 4, p. 200-213, 2004.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. 2009a. **Clima dos Municípios Paulistas** – Campinas. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_109.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_109.html)>. Acesso em: 24 set. 2009.



CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. 2009b. **Clima dos Municípios Paulistas – Cosmópolis**. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_109.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_109.html)>. Acesso em: 24 set. 2009.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. 2009c. **Clima dos Municípios Paulistas – Iracemápolis**. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_109.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_109.html)>. Acesso em: 24 set. 2009.

CHAPIN III, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer-Verlag, 2002. 436 p.

CHAZDON, R.L. Chance and determinism in tropical forest succession. In: SCHNITZER, S.A.; CARSON, W.P. (Ed.). **Tropical Forest Community Ecology**. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2008. p. 384-408.

CRAINE, J.M.; ELMORE, A.J.; AIDAR, M.P.M.; BUSTAMANTE, M.; DAWSON, T.E.; HOBBIE, E.A. KAHMEN, A.; MACK, M. C.; McLAUHLAN, K.K.; MICHELSEN, A.; NARDOTO, G.B.; PARDO, L.H.; PEÑUELAS, J.; REICH, P.B.; SCHUUR, E.A.G.; STOCK, W.D.; TEMPLER, P.H.; VIRGINIA, R.A.; WELKER, J.M.; WRIGHT, I.J. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. **New Phytologist**, Lancaster, v?, n?, p. 1-13, 2009.

DAVIDSON, E.A.; CARVALHO, C.J.R.; FIGUEIRA, A.M.; ISHIDA, F.Y.; OMETTO, J.P.H.B.; NARDOTO, G.B.; SABÁ, R.T.; HAYASHI, S.N.; LEAL, E.C.; VIERIA, I.C.G.; MARTINELLI, L.A. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. **Nature**, London, v. 447, p. 995-998, Jun, 2007.

DAVIDSON, E.A.; KELLER, M.; ERICKSON, H.E.; VERCHOT, L.V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **Bioscience**, Washington, v. 50, n. 8, p. 667-680, Aug. 2000.

EHRENFELD, J.G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. **Ecosystems**, New York, v. 6, p. 503-523, Oct 2003.

EHRENFELD, J.G.; TOTH, L.A. Restoration ecology and the ecosystem perspective. **Restoration Ecology**, Tucson, v. 5, n. 4, p. 307-317, Dec. 1997.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of the world's forests**. Electronic Publishing Policy and Support Branch. Communication Division. Roma, 2007. 144 p.

GARCÍA-MÉNDEZ, G.; MAASS, J.M.; MATSON, P.A. E VITOUSEK, P.M. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in Mexico. **Oecologia**, New York, v. 88, p. 362-366, Dec. 1991.

GÜSEWELL, S. N:P Ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. **New Phytologist**, Lancaster, v. 164, n. 2, p. 243-266, Nov. 2004.

HANDLEY, L.L.; RAVEN, J.A. The uses of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v.15, n.9, p. 965-985, Dec. 1992.

HEDAN, L.O.; VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. Nutrient losses over four million years of tropical forest development. **Ecology**, New York, v. 84, n. 9, p. 2231-2255, Sept. 2003.

HÖGBERG, P. Transley review No 95 – N-15 natural abundance in soil-plant system. **New Phytologist**, Lancaster, v.137, n. 2, p.179-203, Oct. 1997.

IBGE. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, 1992. 91p. (Série Manuais Técnicos de Geociências).

JORDAN, C.F. **Nutrient cycling in tropical forest ecosystems**. New York: John Wiley, 1985. 190 p.

KAYE, J. P.; BINKLEY, D.; RHOADES, C. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. **Biogeochemistry**, Amsterdam, n. 63, p. 1-22, 2003.

KÖEPPEN, W. **Climatologia**: con un studio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica. 1948. 479p.

KOERSELMAN, W.; MEULEMAN, F.M. The vegetation n:p ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. **The Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 33, n. 6, p. 1441-1450, Dec. 1996.

LIVINGSTON, G.P.; VITOUSEK, P.M. ; MATSON, P.A. Nitrous oxide flux and nitrogen transformations across a landscape gradient in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 93, p. 1593-1599, 1988.

LUIZÃO, R.C.; BONDE, T.A.; ROSSWALL, T. Seasonal variation of soil microbial biomass – the effect of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the central Amazon. **Soil Biology e Biogeochemistry**, Amsterdam, n. 24, p. 805-813, 1992.

LUIZÃO, R.C.C.; LUIZÃO, F.J.; PAIVA, R.Q.; MONTEIRO, T.F.; SOUSA, L.S.; KRUIJT, B. Variation of carbon and nitrogen processes along a topographic gradient in a central Amazonian Forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 5, p. 592-600, Mai. 2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.

MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; TOWNSEND, A.R.; VITOUSEK, P.M.; CUEVAS, E.; MCDOWELL, W.H.; ROBERTSON, G.P.; SANTOS, O.C.; TRESEDER, K. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: Tropical versus temperate forests. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 46, n. 1/3, p. 45-65, Jul. 1999.

MATSON, P.A.; VITOUSEK, P.M.; EWEL, J.J.; MAZZARINO, M.J.; ROBERTSON, G.P. Nitrogen transformations following tropical forest felling and burning on a volcanic soil. **Ecology**, New York, v. 68, p. 491-502, Jun. 1987.

McGRODDY, M.E.; DAUFRESNE, T.; HEDIN, L.O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios. **Ecology**, New York, v. 85, n. 9, p. 2390-2401, Sep. 2004.

MCKEY, D. Legumes and Nitrogen: the evolutionary ecology of a nitrogen-demanding lifestyle. In: SPRENT, J. L. ; MCKEY, D (Ed). **Advances in legume systematics: Pt 5 – The nitrogen Factor**. Kew:Royal Botanic Gardens, 1994. p. 211-228.

MELLINGER, M.V.;McNAUGHTON, S.J. Structure and function of successional vascular plant communities in central New York. **Ecological Monographs**, New York, v. 45, n. 2, p. 161-182, Spring. 1975.

MONTAGNINI, F. ; BUSCHBACHER, R. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon. **Biotropica**, Zurich, v. 21, p. 9-14, Mar. 1989.

MONTAGNINI, F.; HAINES, B.; BORING, L.; SWANK, W. Nitrification potentials in early successional black locust and in mixed hardwood forest stands in the southern Appalachians, USA. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 2, n. 2, p. 197-210, Jun. 1986.

MONTAGNINI, F.; JORDAN, C.F. Reciclaje de nutrientes. In: GUARIGUATA, M.R.; KATTAN, G.H. (Ed.). **Ecología y conservación de Bosques Neotropicales**. Cartago, Costa Rica: Ediciones LUR. 2002. cap. 8, p. 167-193.

NALDHOFFER, K.J. ; FRY, B. Controls on natural Nitrogen-15 and Carbon-13 abundances in forest soil organic matter. **Soil Science Society of American Journal.**, Stanford, v. 52, p. 1633-1640, 1988.

NALDHOFFER, K.J. ; FRY, B. Nitrogen isotope studies in forested ecosystems. In: LAJTHA, K.; MICHENER, R.H. (Ed.). **Stable isotope in ecology and environmental science**. Oxford: Blackwell, 1994. p. 22-44.

NARDOTO, G.B. **Abundância natural de <sup>15</sup>N na Amazônia e Cerrado – implicações para a ciclagem do nitrogênio**. 2005. 100 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NARDOTO, G.B.; BUSTAMANTE, M.M.C. Effects of fire on soil dynamics and microbial biomass in savannas of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 955-962, Ago. 2003.

NEILL, C.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.C.; STEUDLER, P.A.;MELILLO, J.M. Soil solution nitrogen losses during clearing of lowland Amazon Forest for pasture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 281, p. 233-245, Mar. 2006.

NEILL, C.; PICCOLO, P.A.; STEUDLER, J.M.; MELILLO, B.J.; FEIGL ; CERRI, C.C. Nitrogen dynamics in soils of forests and active pastures in the western Brazilian Amazon Basin. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 27, p. 1167-1175, Sept. 1995.

NOGUEIRA, J.C.B. **Reflorestamento heterogêneo com essências indígenas**. Local: Instituto Florestal – Serviço de Comunicações Técnico-Científicas. mar. 1977. p. 1-77. (Boletim Técnico, 24.)

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1988. 434 p.

OMETTO, J.P.H.B.; EHLERINGER, J.R.; DOMINGUES, T.F.; BERRY, J.A.; ISHIDA, F.Y.; MAZZI, E.; HIGUCHI, N.; FLANAGAN, L.B.; NARDOTO, G.B.; MARTINELLI, L.A. The stable carbon and nitrogen isotopic composition of vegetation in tropical forests of the Amazon Basin, Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 79, p. 251-274, May. 2006.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L. Vegetation dynamics. In: van der MAAREL, E. (Ed.). **Vegetation Ecology**. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. p. 172-198.

PICOLLO, M.C.; NEILL, C.; CERRI, C.C. Net nitrogen mineralization and net nitrification along a tropical forest-to-pasture chronosequence. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.12, n. 1, p. 61-70, Mai. 1994.

PICOLLO, M.C.; NEILL, C.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C.; STEUDLER, P.A. N-15 natural abundance in forest and pasture soils of the Brazilian Amazon Basin. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.182, n. 2, p. 249-258, Mai. 1996.

PRIMACK, R. B. e RODRIGUES, E. **Biologia da conservação**. Londrina: Editora Planta, 2001. 328 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; ANDRADE, J. C. 2001. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

REICH, P.B. ;OLEKSYN, J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 101, n. 30, p. 11001-11006, Jul. 2004.

REINERS, W.A.; BOUWMAN, W.F.J. ; KELLER, M. Tropical rain forest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties. **Ecological Applications**, Washington, v. 4, n. 2, p. 363-377, Mai. 1994.

REIS-DUARTE, R.M. ; CASAGRANDE, J.C. A interação solo-vegetação na recuperação de áreas degradadas. In: BARBOSA, L. M. (Coord.). **Manual para recuperação de áreas degradadas do Estado de São Paulo: Matas ciliares do Interior Paulista**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006. p. 52-69.

ROBERTSON, G.P. Nitrification and nitrogen mineralization in a lowland rainforest succession in Costa Rica, Central America. **Oecologia**, New York, v. 61, p. 99-104, Jan. 1984.

ROBERTSON, G. P.; VITOUSEK, P.M. Nitrification potentials in primary and secondary succession. **Ecology**, New York, v. 62, p. 376-386, Apr. 1981.

RODRIGUES, R.R. A sucessão florestal. In: MORELLATO, L.P.C. ; LEITÃO FILHO, H.F. (Org.). **Ecologia e preservação de uma floresta tropical urbana**. Campinas:Editora da UNICAMP, 1995. p. 30-35.

RODRIGUES, R.R.; LEITÃO-FILHO, H.F.; CRESTANA, M.S.M. **Recomposição artificial da mata ciliar ao redor da represa de abastecimento de água do município de Iracemápolis, SP**. Iracemápolis: Prefeitura Municipal de Iracemápolis, 1987. 32 p. (Relatório Técnico.)

RODRIGUES, R.R.; LEITÃO-FILHO, H.F.; CRESTANA, M.S.M. Revegetação do entorno da represa de abastecimento de água do município de Iracemápolis/ SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS. 1992. Curitiba, **Anais...**Curitiba: FUPEF, 1992. p. 406-414.

RODRIGUES, R.R.; LIMA, R.A.F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A.G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, Jun. 2009.

ROGGY, J.C.; PREÂVOST, M.F.; GARBAYE, J.; DOMENACH, A.M. Nitrogen cycling in the tropical rain forest of French Guiana: comparison of two sites with contrasting soil types using  $d^{15}N$ . **Journal of Tropical Ecology**, New York, v. 15, p. 1-22, Jan. 1999a.

ROGGY, J.C.; PREVOST, M.F.; GOURBIERE, F.; CASABIANCA, H.; GARBAYE, J.; DOMENACH, A.M. Leaf natural  $^{15}\text{N}$  abundance and total N concentration as potential indicators of plant N nutrition in legumes and pioneer species in a rain forest of French Guiana. **Oecologia**, New York, v. 120, n. 2, p.171-182. Aug. 1999b.

RUZICKA, J.; HANSEN, E.H. **Flow injection analysis**. New York: Wiley Interscience, 1981. 395p.

SANTOS, K.; KINOSHITA, L. S. Flora arbustivo-arbórea do fragmento de Floresta Estacional Semidecidual do Ribeirão Cachoeira, Município de Campinas, SP. **Acta Botânica Brasileira**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 325-341, 2003.

SCHMIDT, S.; STEWART, G.R. Delta $^{15}\text{N}$  values of tropical savanna and monsoon forest species reflect root specializations and soil nitrogen status. **Oecologia**, New York, v.134, n. 4, p. 569-577. Mar. 2003.

SER. SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL SCIENCE & POLICY WORKING GROUP. **The SER International Primer on Ecological Restoration**. Tucson: Society for Ecological Restoration International. 2<sup>nd</sup> ed. 2004, 13 p. Disponível em: <[www.ser.org](http://www.ser.org)>. Acesso em: 28 set. 2008.

SIDDIQUE, I.; ENGEL, V.L.; PARROTA, J.A.; LAMB, D.; NARDOTO, G.B.; OMETTO, J.P. H.B.; MARTINELLI, L.A.; SCHIMIDT, S. Dominance of legume trees alters nutrient relations in mixed species Forest restoration plantings within seven years. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 88, p. 89-101, Mar. 2008.

SILVA, D.M.L. **Dinâmica de nitrogênio em microbacias no Estado de São Paulo**. 2005. 106p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SINGH, J.S.; RAGHUBANSHI, A.S.; SINGH, R.S.; SRIVASTAVA, S.C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, London, v. 388, p. 499-500, Apr. 1989.

SPRENT, J.I.; GEOGHEGAN, I.E.; WHITTY, P.W.; JAMES, E.K. Natural abundance of N-15 and C-13 in nodulated legumes and other plants in the Cerrado and neighboring regions of Brazil. **Oecologia**, New York, v. 105, n. 4, p. 440-446, Mar. 1996.

SWAINE, M.D. **The ecology of tropical forest tree seedlings**. (Man and biosphere series). Paris: UNESCO and the Parthenon Publishing Group, 1995. v. 18. 299 p.

VITOUSEK, P.M. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **American Naturalist**, New York, v. 119, n. 4, p. 553-572, Apr. 1982.

VITOUSEK, P.M.; CASSMAN, K.; CLEVELAND, C.; CREWS, T.; FIELD, C.B.; GRIMM, N.B.; HOWARTH, R.W.; MARINO, R.; MARTINELLI, L.; RASTETTER, E.B.; SPRENT, J.I. Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 57, n. 1, p. 1-45, Apr. 2002.

VITOUSEK, P.M.; DENSLow, J.S. Nitrogen and phosphorus availability in treefall gaps of a lowland tropical rainforest. **Journal of Ecology**, London, v. 74, p. 1167-1178, Dec. 1986.

VITOUSEK, P.M.; GOSZ, J.R.; GRIER, C.C.; MELILLO, J.M.; REINERS, W.A. A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. **Ecological Monographs**, New York, v. 52, p. 155-177, Jun. 1982.

VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystems: a field experiment. **Science**, New Series, Washington, v. 225, n. 4657, p. 51-52, Jul. 1984

VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A.; CLEVE, K.V. Nitrogen availability and nitrification during succession: Primary, secondary, and old-field seres. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 115, p. 229-239, 1989.

VITOUSEK, P.M.; SHEARER, G.; KOHL, D. H. Foliar  $^{15}\text{N}$  natural abundance in Hawaiian rainforest: Patterns and possible mechanisms. **Oecologia**, New York, v. 78, p. 383-388, Mar. 1989.

WADA, E.; IMAIZUMI, R.; TAKAI, Y. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in soil organic matter with special reference to paddy soils in Japan: Biogeochemical implications on the nitrogen cycle. **Geochemical Journal**, Tokyo, v. 18, p. 109-123, 1984.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of Phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, p. 1-19, 1976.



WEDIN, D.A. ;PASTOR, J. Nitrogen mineralization dynamics in grass monocultures. **Oecologia**, New York, v. 96, p. 186-192, Nov. 1993.

WHITE, P.S. ;WALKER, J.L. Approximating nature's variation: Selecting and using reference information in restoration ecology. **Restoration Ecology**, Tucson, v. 5, p. 338-349, Dec. 1997.

YOUNG, T.P.; PETERSEN, D.A.; CLARY, J.J. The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms. **Ecology Letters**, New Jersey, v. 8, p. 662-673, Jun. 2005.

ZAR, J.H. **Biostatistical analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall., 1984. 718p.

**ANEXOS**

Anexo A - Correlação entre umidade do solo, teores de amônio, nitrato e N mineral, razão nitrato:amônio, e taxas líquidas de mineralização e nitrificação

	<i>H2O (%)</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>N Mineral</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>Nitrif.</i>	<i>Mineral.</i>
H2O (%)	1.00000	0.31983 <.0001	0.28545 <.0001	0.37221 <.0001	-0.05488 0.4054	0.24927 0.0001	0.15189 0.0206
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.31983 <.0001	1.00000	0.32921 <.0001	0.84127 <.0001	-0.39137 <.0001	0.75110 <.0001	0.48667 <.0001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.28545 <.0001	0.32921 <.0001	1.00000	0.78743 <.0001	0.58438 <.0001	0.40416 <.0001	0.32338 <.0001
N Mineral	0.37221 <.0001	0.84127 <.0001	0.78743 <.0001	1.00000	0.07909 0.2301	0.72170 <.0001	0.50284 <.0001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.05488 0.4054	-0.39137 <.0001	0.58438 <.0001	0.07909 0.2301	1.00000	-0.16903 0.0099	-0.03211 0.6266
Nitrif.	0.24927 0.0001	0.75110 <.0001	0.40416 <.0001	0.72170 <.0001	-0.16903 0.0099	1.00000	0.83066 <.0001
Mineral.	0.15189 0.0206	0.48667 <.0001	0.32338 <.0001	0.50284 <.0001	-0.03211 0.6266	0.83066 <.0001	1.00000

Anexo B - Umidade do solo nas diferentes estações na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Estação</i>	<i>Umidade do solo (%)</i>
Seca	15,65 <sup>B</sup>
Sec-Chu	15,96 <sup>B</sup>
Chuvosa	20,88 <sup>A</sup>
Chu-Sec	15,91 <sup>B</sup>
Valor de F	37,620
pr>F	<0,0001
Média	17,13
C.V.	6,44

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo C - Umidade do solo nas diferentes florestas na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>Umidade do solo (%)</i>
21 anos	17,10 <sup>B</sup>
52 anos	19,54 <sup>A</sup>
Referência	14,67 <sup>C</sup>
Valor de F	50,770
pr>F	<0,0001
Média	17,10
C.V.	6,44

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo D - Teor de Amônio no solo na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (μg N g<sup>-1</sup> TFSA)</i>
21 anos	8,37 <sup>B</sup>
52 anos	7,13 <sup>B</sup>
Referência	11,14 <sup>A</sup>
Valor de F	23,53
pr>F	<0,0001
Média	8,86
C.V.	21,71

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo E - Teor de Nitrato no solo na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (μg N g<sup>-1</sup> TFSA)</i>
21 anos	4,97 <sup>B</sup>
52 anos	7,07 <sup>A</sup>
Referência	7,76 <sup>A</sup>
Valor de F	16,44
pr>F	<0,0001
Média	6,59
C.V.	10,15

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo F - N inorgânico total na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Estação</i>	<i>N mineral (μg N g<sup>-1</sup> TFSA)</i>
Seca	10,91 <sup>C</sup>
Transição Sec-Chu	15,66 <sup>B</sup>
Chuvosa	18,24 <sup>A</sup>
Transição Chu-Sec	16,85 <sup>AB</sup>
Valor de F	22,720
pr>F	<0,0001
Média	15,41
C.V.	14,49

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo G - Teores de amônio, nitrato e N inorgânico total no solo (0-5 cm), e taxas líquidas de mineralização e nitrificação do N em cada estação na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). Os apresentados representam a média de cada estação  $\pm$  desvio padrão.  $n = 20$

Floresta	Estação	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			N mineral			Mineralização		Nitrificação	
			<i>(<math>\mu\text{g N g}^{-1}</math> TFSA)</i>						<i>(<math>\mu\text{g N g}^{-1}</math> TFSA dia<sup>-1</sup>)</i>			
21 anos	Seca	5,07 $\pm$ 1,98	3,09 $\pm$ 2,32	8,16 $\pm$ 3,62	1,04 $\pm$ 0,33	1,17 $\pm$ 0,31						
21 anos	Sec-Chu	9,99 $\pm$ 6,87	4,84 $\pm$ 3,49	14,82 $\pm$ 9,57	2,04 $\pm$ 1,16	1,27 $\pm$ 1,08						
21 anos	Chuvosa	10,41 $\pm$ 3,54	5,50 $\pm$ 2,70	15,91 $\pm$ 4,61	1,34 $\pm$ 0,41	0,60 $\pm$ 0,46						
21 anos	Chu-Sec	7,83 $\pm$ 3,75	6,43 $\pm$ 2,06	14,27 $\pm$ 4,83	1,23 $\pm$ 0,46	0,75 $\pm$ 0,39						
52 anos	Seca	6,51 $\pm$ 2,79	3,58 $\pm$ 2,06	10,09 $\pm$ 3,84	1,36 $\pm$ 0,56	1,54 $\pm$ 0,57						
52 anos	Sec-Chu	6,16 $\pm$ 2,68	8,38 $\pm$ 4,51	14,54 $\pm$ 5,75	1,77 $\pm$ 0,74	1,36 $\pm$ 0,68						
52 anos	Chuvosa	9,72 $\pm$ 3,52	7,00 $\pm$ 2,42	16,73 $\pm$ 5,57	1,84 $\pm$ 0,62	1,38 $\pm$ 0,73						
52 anos	Chu-Sec	6,05 $\pm$ 3,28	9,22 $\pm$ 3,33	15,27 $\pm$ 5,45	1,28 $\pm$ 0,39	1,27 $\pm$ 0,54						
Flor. Nat.	Seca	10,63 $\pm$ 4,34	3,85 $\pm$ 2,12	14,48 $\pm$ 4,54	1,57 $\pm$ 0,50	1,56 $\pm$ 0,50						
Flor. Nat.	Sec-Chu	10,00 $\pm$ 4,43	7,77 $\pm$ 3,94	17,77 $\pm$ 7,23	2,66 $\pm$ 0,76	1,98 $\pm$ 0,55						
Flor. Nat.	Chuvosa	13,21 $\pm$ 5,27	9,07 $\pm$ 2,69	22,28 $\pm$ 7,76	3,07 $\pm$ 0,99	2,39 $\pm$ 0,76						
Flor. Nat.	Chu-Sec	10,66 $\pm$ 4,36	10,21 $\pm$ 6,54	20,88 $\pm$ 8,33	1,90 $\pm$ 0,47	1,71 $\pm$ 0,59						

Anexo H - Razão NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub> no solo na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

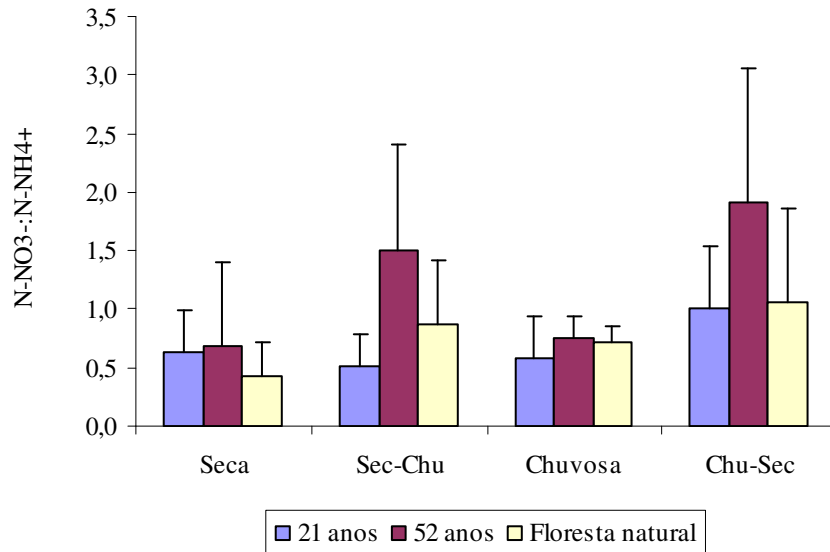
Idade	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
21 anos	0,68 <sup>B</sup>
52 anos	1,22 <sup>A</sup>
Floresta natural	0,77 <sup>B</sup>
Valor de F	16,63
pr>F	<0,0001
Média	0,89
C.V.	-158,59

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo I - Razão NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub> no solo nas diferentes estações na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

Estação	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Seca	0,58 <sup>C</sup>
Sec-Chu	0,96 <sup>B</sup>
Chuvosa	0,68 <sup>B</sup>
Chu-Sec	1,33 <sup>A</sup>
Valor de F	24,07
pr>F	<0,0001
Média	0,89
C.V.	-158,59

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.



Anexo J - Variação da razão nitrato:amônio no solo ao longo das estações na cronosequência florestal estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).  $n = 20$

Anexo K - Variação da taxa líquida de mineralização ao longo do ano em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural).

21 anos		52 anos		Floresta natural	
Estação	Taxa Líq. Min.	Estação	Taxa Líq. Min.	Estação	Taxa Líq. Min.
Seca	1,17 <sup>A</sup>	Seca	1,54 <sup>A</sup>	Seca	1,56 <sup>B</sup>
Sec-Chu	1,27 <sup>A</sup>	Sec-Chu	1,36 <sup>A</sup>	Sec-Chu	1,98 <sup>AB</sup>
Chuvosa	0,60 <sup>B</sup>	Chuvosa	1,38 <sup>A</sup>	Chuvosa	2,39 <sup>A</sup>
Chu-Sec	0,75 <sup>AB</sup>	Chu-Sec	1,27 <sup>A</sup>	Chu-Sec	1,71 <sup>B</sup>
F value	4,97	F value	0,62	F value	6,86
pr>F	0,0034	pr>F	0,6	pr>F	0,0004
Média	1,46	Média	1,13	Média	2,42
C.V.	67,94	C.V.	45,61	C.V.	31,92

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo L - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  do solo na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

Idade	$\delta^{15}\text{N}$ do solo (‰)
21 anos	6,99 <sup>A</sup>
52 anos	6,39 <sup>B</sup>
Floresta natural	6,93 <sup>A</sup>
Valor de F	0,71
pr>F	<0,0003
Média	6,77
C.V.	13,5

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo M - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  através do perfil do solo de 0-50 cm na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Camada</i>	$\delta^{15}\text{N}$ do solo (‰)
0-2,5	4,35 <sup>D</sup>
2,5-5	5,68 <sup>C</sup>
5-10	6,85 <sup>B</sup>
10-30	8,29 <sup>A</sup>
30-50	8,70 <sup>A</sup>
Valor de F	0,71
pr>F	<0,0001
Média	6,77
C.V.	13,5

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo N - Valores médios de porcentagem de N no solo da cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	Teor de N no solo (%)
21 anos	0,13 <sup>A</sup>
52 anos	0,12 <sup>A</sup>
Floresta natural	0,17 <sup>B</sup>
Valor de F	28,85
pr>F	<0,0001
Média	0,14
C.V.	10,77

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo O - Valores médios de porcentagem de N no solo através do perfil do solo de 0-50 cm na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Camada</i>	<i>Teor de N no solo (%)</i>
0-2,5	0,27 <sup>E</sup>
2,5-5	0,18 <sup>D</sup>
5-10	0,14 <sup>C</sup>
10-30	0,09 <sup>B</sup>
30-50	0,06 <sup>A</sup>
Valor de F	212,74
pr>F	<0,0001
Média	0,14
C.V.	10,77

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.



Anexo P - Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  e teor de N (%) na folhagem verde por espécie em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). São apresentados o nome científico de cada espécie, a floresta onde a espécie corre, a origem N (nativa) ou E (exótica), família botânica e números de indivíduos amostrados (*n* amostral)

(continua)

<i>Espécie</i>	<i>Autor</i>	<i>Floresta</i>	<i>Origem</i>	<i>Família</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N (%)	<i>n</i> amostral
<i>Acacia cf riparia</i>	Kunth	Flor. Nat.	N	Fabaceae	2,99	3,57	2
<i>Actinostemon communis</i>	(Müll. Arg.) Pax	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	3,58	2,87	12
<i>Actinostemon concolor</i>	(Spreng.) Müll. Arg.	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	3,51	2,42	2
<i>Aegiphila sellowiana</i>	Cham.	21 anos	N	Verbenaceae	2,47	4,00	2
<i>Alchornea glandulosa</i>	Poepp.	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	2,87	3,20	2
<i>Aleurites moluccana</i>	Willd.	52 anos	E	Euphorbiaceae	-1,30	2,37	4
<i>Allophylus edulis</i>	(A. St.-Hil., Cambess. & A. Juss.) Radlk.	52 anos	N	Sapindaceae	-0,72	1,85	2
<i>Almeidea caerulea</i>	A. St.-Hil. ex G. Don	Flor. Nat.	N	Rutaceae	2,47	2,76	8
<i>Amaioua intermedia</i>	Mart.	Flor. Nat.	N	Rubiaceae	3,41	2,71	2
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	Müll. Arg.	Flor. Nat.	N	Apocynaceae	4,62	2,74	6
<i>Aspidosperma ramiflorum</i>	Müll. Arg.	52 anos	N	Apocynaceae	1,06	3,16	2
<i>Aspidosperma ramiflorum</i>	Müll. Arg.	Flor. Nat.	N	Apocynaceae	3,88	3,36	2
<i>Astronium graveolens</i>	Jacq.	Flor. Nat.	N	Anacardiaceae	2,96	2,77	8
<i>Brosimum glaziovii</i>	Taub.	Flor. Nat.	N	Moraceae	1,42	2,64	2
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	Benth.	21 anos	N	Fabaceae	0,50	2,40	2
<i>Cariniana estrellensis</i>	(Raddi) Kuntze	21 anos	N	Lecythidaceae	1,06	2,28	6
<i>Cariniana estrellensis</i>	(Raddi) Kuntze	52 anos	N	Lecythidaceae	0,41	2,07	8
<i>Cariniana legalis</i>	(Mart.) Kuntze	21 anos	N	Lecythidaceae	0,75	2,06	8
<i>Cariniana legalis</i>	(Mart.) Kuntze	Flor. Nat.	N	Lecythidaceae	3,53	2,35	2
<i>Casearia sylvestris</i>	Sw.	52 anos	N	Salicaceae	0,86	4,13	2
<i>Centrolobium tomentosum</i>	Guillemin ex Benth.	21 anos	N	Fabaceae	-0,89	2,93	32
<i>Centrolobium tomentosum</i>	Guillemin ex Benth.	52 anos	N	Fabaceae	1,97	3,53	4
<i>Chionanthus filiformis</i>	(Vell.) P.S. Green	Flor. Nat.	N	Oleaceae	1,92	1,94	2
<i>Clausena excavata</i>	Burm. f.	21 anos	E	Rutaceae	0,47	2,61	16
<i>Colubrina glandulosa</i>	Perkins	52 anos	N	Rhamnaceae	1,63	3,16	10
<i>Copaifera langsdorffii</i>	Desf.	21 anos	N	Fabaceae	1,99	2,88	2
<i>Cordia americana</i>	(L.) Gottschling & J.S. Mill.	52 anos	N	Boraginaceae	1,60	2,93	2
<i>Cordia ecalyculata</i>	Vell.	Flor. Nat.	N	Boraginaceae	2,66	2,92	2
<i>Cordia myxa</i>	L.	21 anos	E	Boraginaceae	3,79	2,52	4

Anexo P- Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  e teor de N (%) na folhagem verde por espécie em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). São apresentados o nome científico de cada espécie, a floresta onde a espécie corre, a origem N (nativa) ou E (exótica), família botânica e números de indivíduos amostrados (*n* amostral)

(continuação)							
<i>Espécie</i>	<i>Autor</i>	<i>Floresta</i>	<i>Origem</i>	<i>Família</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N (%)	<i>n</i> amostral
<i>Cordia trichotoma</i>	(Vell.) Arráb. ex Steud.	21 anos	N	Boraginaceae	0,37	2,81	2
<i>Croton floribundus</i>	Spreng.	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	1,84	3,07	2
<i>Dalbergia nigra</i>	(Vell.) Allemao ex Benth.	52 anos	NNR	Fabaceae	0,30	2,82	12
<i>Dendropanax cuneatus</i>	(DC.) Decne. & Planch.	52 anos	N	Araliaceae	-0,01	2,43	2
<i>Dillenia indica</i>	L.	21 anos	E	Dilleniaceae	-0,67	1,85	2
<i>Esenbeckia leiocarpa</i>	Engl.	21 anos	N	Rutaceae	2,32	3,48	2
<i>Esenbeckia leiocarpa</i>	Engl.	Flor. Nat.	N	Rutaceae	3,58	3,60	16
<i>Eugenia uniflora</i>	L.	52 anos	N	Myrtaceae	1,17	2,12	6
<i>Ficus citrifolia</i>	Mill.	52 anos	N	Moraceae	-1,61	2,58	2
<i>Ficus guaranitica</i>	Chodat	21 anos	E	Moraceae	1,11	1,85	2
<i>Galipea multiflora</i>	Schult.	Flor. Nat.	N	Rutaceae	3,85	3,16	4
<i>Guapira opposita</i>	(Vell.) Reitz	Flor. Nat.	N	Nyctaginaceae	3,33	4,25	2
<i>Guarea guidonia</i>	(L.) Sleumer	21 anos	N	Meliaceae	1,75	3,00	6
<i>Guarea sp.</i>		52 anos	N	Meliaceae	1,32	3,33	10
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Lam.	52 anos	N	Malvaceae	1,78	2,56	4
<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	(Mart. ex A. DC.) Mattos	21 anos	N	Bigniniaceae	-0,96	2,42	2
<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	(Mart. ex A. DC.) Mattos	52 anos	N	Bigniniaceae	1,24	2,87	2
<i>Holocalyx balansae</i>	Micheli	Flor. Nat.	N	Fabaceae	3,46	3,18	4
<i>Hymenaea courbaril</i>	L.	52 anos	N	Fabaceae	1,26	2,28	6
<i>Hymenaea courbaril</i>	L.	Flor. Nat.	N	Fabaceae	3,26	2,36	2
<i>Ixora gardneriana</i>	Benth.	Flor. Nat.	N	Rubiaceae	2,02	1,67	2
<i>Joannesia princeps</i>	Vell.	52 anos	NNR	Euphorbiaceae	0,94	2,92	6
<i>Lafoensia glyptocarpa</i>	Koehne	21 anos	N	Lythraceae	0,40	2,38	2
<i>Licania tomentosa</i>	(Benth.) Fritsch	21 anos	NNR	Chrysobalanaceae	1,70	1,75	17
<i>Lonchocarpus muehlbergianus</i>	Hassl.	52 anos	N	Fabaceae	2,97	4,29	12
<i>Luehea divaricata</i>	Mart.	52 anos	N	Malvaceae	-1,47	2,42	2
<i>Machaerium nyctitans</i>	(Vell.) Benth.	52 anos	N	Fabaceae	0,40	3,06	2
<i>Machaerium vestitum</i>	Vogel	52 anos	N	Fabaceae	4,80	4,11	4
<i>Mangifera indica</i>	L.	52 anos	E	Anacardiaceae	-1,91	1,41	6
<i>Matayba cf. elaeagnoides</i>	Radlk.	Flor. Nat.	N	Sapindaceae	3,74	2,22	2
<i>Metrodorea nigra</i>	A. St.-Hil.	Flor. Nat.	N	Rutaceae	4,30	2,74	14

Anexo P- Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  e teor de N (%) na folhagem verde por espécie em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). São apresentados o nome científico de cada espécie, a floresta onde a espécie corre, a origem N (nativa) ou E (exótica), família botânica e números de indivíduos amostrados (*n* amostral)

								(continuação)
<i>Espécie</i>	<i>Autor</i>	<i>Floresta</i>	<i>Origem</i>	<i>Família</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N (%)	<i>n</i> amostral	
<i>Myrciaria floribunda</i>	(H. West ex Willd.) O. Berg	Flor. Nat.	N	Myrtaceae	2,60	2,67	2	
<i>Myroxylon peruiferum</i>	L.f.	21 anos	N	Fabaceae	0,50	3,65	2	
<i>Nectandra megapotamica</i>	(Spreng.) Mez	21 anos	N	Lauraceae	0,48	2,92	6	
<i>Nectandra megapotamica</i>	(Spreng.) Mez	52 anos	N	Lauraceae	0,56	2,59	12	
<i>Ocotea beulahiae</i>	Baitello	Flor. Nat.	N	Lauraceae	2,27	4,10	6	
<i>Ocotea elegans</i>	Mez	Flor. Nat.	N	Lauraceae	2,91	3,51	2	
<i>Ocotea indecora</i>	(Schott) Mez	Flor. Nat.	N	Lauraceae	2,99	3,46	4	
<i>Ocotea odorifera</i>	Rohwer	Flor. Nat.	N	Lauraceae	1,32	2,20	2	
<i>Ormosia arborea</i>	(Vell.) Harms	Flor. Nat.	N	Fabaceae	3,82	3,01	4	
<i>Pachira aquatica</i>	Aubl.	21 anos	N	Malvaceae	-0,54	2,47	2	
<i>Parapiptadenia rigida</i>	(Benth.) Brenan	21 anos	N	Fabaceae	2,14	3,35	8	
<i>Parapiptadenia sp.</i>		52 anos	N	Fabaceae	2,38	3,58	4	
<i>Piper amalago</i>	L.	52 anos	N	Piperaceae	-0,52	3,11	2	
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	(Mart.) J.F. Macbr.	21 anos	N	Fabaceae	3,53	3,51	2	
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	(Mart.) J.F. Macbr.	52 anos	N	Fabaceae	3,24	3,56	2	
<i>Pittosporum undulatum</i>	Vent.	52 anos	E	Pittosporaceae	-1,42	1,46	2	
<i>Poecilanthe parviflora</i>	Benth.	21 anos	N	Fabaceae	1,86	2,90	4	
<i>Pterocarpus violaceus</i>	Vogel	21 anos	N	Fabaceae	0,98	2,48	4	
<i>Pterocarpus violaceus</i>	Vogel	21 anos	N	Fabaceae	1,19	2,48	2	
<i>Pterogyne nitens</i>	Tul.	21 anos	N	Fabaceae	2,22	3,26	2	
<i>Pterogyne nitens</i>	Tul.	52 anos	N	Fabaceae	1,53	3,39	2	
<i>Rudgea jasminoides</i>	(Cham.) Müll. Arg.	Flor. Nat.	N	Rubiaceae	4,31	1,76	2	
<i>Sapindus saponaria</i>	L.	21 anos	NNR	Sapindaceae	-1,36	3,57	2	
<i>Savia dictyocarpa</i>	Müll. Arg.	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	4,06	3,06	16	
<i>Schinus terebinthifolia</i>	Raddi	21 anos	N	Anacardiaceae	-0,41	2,10	4	
<i>Sebastiania edwalliana</i>	Pax & K. Hoffm.	Flor. Nat.	N	Euphorbiaceae	4,08	2,47	2	
<i>Seguieria langsdorffii</i>	Moq.	Flor. Nat.	N	Phytolaccaceae	6,78	4,06	2	
<i>Senna macranthera</i>	(DC. ex Collad.) H.S. Irwin & Barneby	21 anos	N	Fabaceae	0,89	2,61	2	
<i>Solanum argenteum</i>	Dunal	Flor. Nat.	N	Solanaceae	2,18	3,85	2	
<i>Syzygium cumini</i>	(L.) Skeels	21 anos	E	Myrtaceae	0,77	1,62	8	
<i>Syzygium cumini</i>	(L.) Skeels	52 anos	E	Myrtaceae	2,85	1,55	4	

Anexo P- Valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  e teor de N (%) na folhagem verde por espécie em cada floresta na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural). São apresentados o nome científico de cada espécie, a floresta onde a espécie corre, a origem N (nativa) ou E (exótica), família botânica e números de indivíduos amostrados (*n* amostral)

<i>Espécie</i>	<i>Autor</i>	<i>Floresta</i>	<i>Origem</i>	<i>Família</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N (%)	<i>n amostral</i>
<i>Syzygium jambos</i>	(L.) Alston	21 anos	E	Myrtaceae	0,82	1,31	2
<i>Tabebuia impetiginosa</i>	(Mart. ex DC.) Standl.	52 anos	N	Bigniniaceae	3,23	3,24	2
<i>Tabebuia roseoalba</i>	(Ridl.) Sandwith	52 anos	N	Bigniniaceae	-0,63	2,30	2
<i>Tipuana tipu</i>	(Benth.) Kuntze	52 anos	E	Fabaceae	-0,99	3,28	2
<i>Trichilia catigua</i>	A. Juss.	Flor. Nat.	N	Meliaceae	4,02	3,01	6
<i>Trichilia clausenii</i>	C. DC.	52 anos	N	Meliaceae	1,76	2,90	14
<i>Trichilia clausenii</i>	C. DC.	Flor. Nat.	N	Meliaceae	4,33	2,70	4
<i>Trichilia elegans</i>	A. Juss.	Flor. Nat.	N	Meliaceae	4,41	2,69	2
<i>Trichilia sp.</i>	P. Browne	52 anos	N	Meliaceae	-0,03	3,05	2
<i>Triplaris americana</i>	L.	21 anos	NNR	Polygonaceae	-0,77	2,66	2
<i>Zanthoxylum hyemale</i>	A. St.-Hil.	Flor. Nat.	N	Rutaceae	2,11	3,38	2
<i>Zanthoxylum minutiflorum</i>	Tul.	Flor. Nat.	N	Rutaceae	2,13	2,09	2

Anexo Q - Valores médios do teor de N foliar por grupo na cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da Média dos Mínimos Quadrados, e agrupamento do Teste de Tukey

21 anos		52 anos		Flor. Nat.	
Grupo	$\delta^{15}N$ Foliar	Grupo	$\delta^{15}N$ Foliar	Grupo	$\delta^{15}N$ Foliar
Leguminosas	0,35 <sup>B</sup>	Leguminosas	1,83 <sup>A</sup>	Leguminosas	3,47 <sup>A</sup>
Não-leg.	0,91 <sup>A</sup>	Não-leg.	0,74 <sup>B</sup>	Não-leg.	3,47 <sup>A</sup>
Chi quadrado	5,0286	Chi quadrado	11,67	Chi quadrado	0,0094
pr> Chi quadrado	0,0249	pr> Chi quadrado	0,0006	pr> Chi quadrado	0,9226
Média	0,63	Média	1,29	Média	3,47

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo R - Razão N:P foliar para a cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

Idade	N:P foliar
21 anos	15,62 <sup>C</sup>
52 anos	18,53 <sup>B</sup>
Floresta natural	22,38 <sup>A</sup>
Valor de F	33,87
pr>F	<0,0001
Média	18,84
C.V.	9,77

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo S - Razão N:P da serrapilheira para a cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

Idade	N:P da serrapilheira
21 anos	15,51 <sup>C</sup>
52 anos	21,07 <sup>B</sup>
Floresta natural	30,25 <sup>A</sup>
Valor de F	0,01
pr>F	<0,0001
Média	22,51
C.V.	17,9

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.

Anexo T - Índice N:P foliar/N:P serrapilheira para a cronosequência estudada (reflorestamentos de 21 anos e 52 anos, e floresta natural), valor-p da ANOVA e agrupamento do Teste de Tukey

<i>Idade</i>	<i>N:P foliar/N:P da serrapilheira</i>
21 anos	1,02 <sup>B</sup>
52 anos	0,93 <sup>B</sup>
Floresta natural	0,74 <sup>A</sup>
Valor de F	11,61
pr>F	0,0003
Média	0,89
C.V.	14,14

Nota: médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si.