

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DOUTORADO EM MANEJO DO SOLO**

**CRISTIANE OTTES VARGAS**

**FORMAS DE CARBONO E MACRONUTRIENTES DO SOLO EM**  
**FLORESTAS DE *PINUS* EM PRIMEIRA E TERCEIRA ROTAÇÃO NO**  
**PLANALTO SUL CATARINENSE**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
Co-orientadores:  
Dr. Jaime Antônio de Almeida  
Dr. Jackson Adriano Albuquerque.

**LAGES – SC**

**2012**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária  
Renata Weingärtner Rosa – CRB 228/14ª Região  
(Biblioteca Setorial do CAV/UDESC)

Vargas, Cristiane Ottes

Formas de carbono e macronutrientes do solo em florestas de *pinus* em primeira e terceira rotação no planalto sul catarinense / Cristiane Ottes Vargas; orientador: Luciano Colpo Gatiboni. – Lages, 2012. 102f.

Inclui referências.

Tese (doutorado) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC.

1. Matéria orgânica do solo.
  2. Rotações
  3. Fracionamento de carbono.
  4. Fracionamento de Hedley.
  5. Frações de fósforo.
  6. Potássio trocável.
  7. Potássio não trocável.
  8. Potássio total.
  9. Cálcio e magnésio trocável.
  10. Cálcio e magnésio total.
- I. Título.

CDD – 634.1

## CRISTIANE OTTES VARGAS

### FORMAS DE CARBONO E MACRONUTRIENTES DO SOLO EM FLORESTAS DE *PINUS* EM PRIMEIRA E TERCEIRA ROTAÇÃO NO PLANALTO SUL CATARINENSE

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Aprovado em: 04/05/2012

Homologado em: / /2012

**Banca Examinadora:**

---

**Orientador/presidente:** Dr. Luciano Colpo Gatiboni (UDESC/Lages - SC)

---

Dr. David José Miquelluti  
Coordenador do Curso de Mestrado em  
Manejo do Solo – UDESC/Lages – SC

---

**Co-orientador:** Dr. Jaime Antonio de Almeida (UDESC/Lages – SC)

---

Dr. Leo Rufato  
Coordenador do Programa de Pós  
Graduação em Ciências Agrárias –  
UDESC/Lages – SC

---

**Co-orientador:** Dr. Jackson Adriano Albuquerque (UDESC/Lages – SC)

---

**Membro:** Dr. Djalma Miler Chaves  
(KLABIN S.A.)

---

Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias  
Diretor Geral do Centro de Ciências  
Agroveterinárias – UDESC/Lages - SC

---

**Membro:** Dr. Nairam Félix de Barros  
(UFV/Viçosa - MG)

Lages, Santa Catarina, maio de 2012.

À minha Mãe ofereço.

À Camila e Tainá  
Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à UDESC- CAV e ao Programa de Pós - Graduação em Manejo do Solo. À CAPES pela bolsa concedida.

À Klabin pelo financiamento dos trabalhos, especialmente ao Dr.Djalma Miler Chaves, ao Eng. Florestal Me. James Stahl, Dr. Marcia Simonetti, Leonardo Muller Pires e a todos que deram apoio aos trabalhos de campo, agradeço.

Aos membros da banca de avaliação por suas valiosas contribuições. Ao Dr Djalma Miler Chaves e ao Prof. Dr. Nairam Félix de Barros.

Ao comitê de orientação, agradeço ao Prof. Dr. Luciano Colpo Gatiboni, meu incansável orientador a quem tenho admiração e ideal de dedicação acadêmica. Ao querido Prof. Dr. Jaime de Antonio Almeida e ao Prof. Dr. Jakson Adriano Albuquerque pelos ensinamentos e orientação.

Aos demais professores do Curso de “Manejo do Solo”: Prof. Álvaro Mafra, Prof. David José Miquelluti, Prof. Julio Cesar dos Santos Pires, Prof. Mari Campos, Prof. Osmar Klauber Filho, Prof. Paulo Cezar Cassol, Prof. Paulo Roberto Ernani e ao Prof. João Fert Neto pelos ensinamentos.

Aos COLEGAS E AMIGOS: Daiane, Dreyce, Bárbara, Mureli,Rodrigo Predebon, Clovisson, Vitor, Daiana, Douglas (Chapinha), Ronaldir, José, Margareth, Franciane, Eliete, Letícia, André Costa, Rodrigo Luciano, Sueli, Jovani, Antônio,

Fabrcio, Luciana, Paula, Andreia, Luciane, Evandro, Leandra, Jaqueline, Elaine, Gessiane, Myrcia, Willian e Jefferson. Obrigadatambém ao “Pipoca” e tantos outros que ajudaram em algumas ou em várias ocasiões ou simplesmente me acompanharam no percurso deste trabalho.

Aos bolsistas Giovane Dalanhol, Júlio César Mendes Júnior, Gustavo Boitt, Carlos Alberto Silva, Adriano da Costa, Sara Machado e Marluci Pozzan e aos diversos voluntários, acadêmicos da Engenharia florestal ou Agronomia, alguns já formados: Camile, Felipe, Karol, Priscila, Leonardo, Franschesco, Liziane, Paulo, Luiz, Eder, Tiago, Diego e Andrea e muitos que auxiliaram desde a menos disputada lavagem das vidrarias até as longas jornadas de trabalho, de extrações, determinações e repetições que às vezes culminavam nas madrugadas.

À toda minha família em especial a minha mãe. À Camila e a Tainá pela paciência, pela companhia em muitas atividades e também pela espera, quando da minha ausência, agradeço.

Ao Jonas pelo apoio, principalmente pelo “socorro” quando não havia niguém para trabalhar, como em vésperas de provas, domingos e em feriados...

À todos agradeço.

## RESUMO GERAL

VARGAS, Cristiane Ottes. Formas de carbono e macronutrientes do solo em florestas de *Pinus* em primeira e terceira rotação no planalto sul catarinense. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2012. 102 p.

Em solos de baixa fertilidade e comumente não fertilizados, supõe-se que as espécies florestais podem absorver formas menos lábeis de nutrientes que são disponibilizados ao longo da rotação florestal. No entanto a avaliação desta situação é complexa, pois os métodos clássicos estimam apenas os teores prontamente disponíveis, dificultando o diagnóstico da fertilidade do solo e a definição da necessidade de adubação. O objetivo deste trabalho foi analisar os teores e estoques de diferentes formas de carbono, fósforo, potássio, cálcio e magnésio do solo em florestas de *Pinus taeda* L. em primeira rotação (17 anos de cultivo) e terceira rotação (49 anos de cultivo sucessivo) em diferentes camadas do solo até 80 cm de profundidade. O solo em terceira rotação teve seu conteúdo relativo de carbono em ácidos fúlvicos menor e o de ácidos húmicos maior, quando comparado à floresta em primeira rotação, indicando que com o aumento do tempo de uso com florestas há a transformação de formas mais lábeis de carbono em formas mais estáveis. Os teores totais não são bons indicadores de modificações do C na superfície do solo e as frações da matéria orgânica podem ser utilizadas para diagnosticar a dinâmica da matéria orgânica do solo em florestas de *Pinus*. A fração de P inorgânico moderadamente lábil (Pi-NaOH) foi 47% maior na floresta em 3ª rotação de *Pinus*, enquanto as frações inorgânicas lábeis (Pi-RTA e Pi-NaHCO<sub>3</sub>) e orgânicas lábeis (Po-NaHCO<sub>3</sub>) foram maiores nos solos sob primeira rotação, sugerindo a existência de uma modificação das formas de fósforo e que, diferentes formas desse nutriente podem contribuir com a disponibilidade de P em solos sob florestas de *Pinus*. A floresta há mais tempo cultivada com *Pinus taeda* apresentou menores teores e estoques de K trocável (extraído por NH<sub>4</sub>OAc.), Ca e Mg trocáveis (KCl), K não-trocável (HNO<sub>3</sub>) e de Ca semi-total (Água régia). Tanto o P como o K e Mg apresentaram grande reserva em formas não lábeis (ou não trocáveis e semitotais) que poderão vir a ser disponibilizadas em longo prazo, diferentemente do Ca, que apresentou teores lábeis e totais muito baixos. Assim, enquanto as formas disponíveis de P, K e Mg poderiam ser reabastecidas por outras formas destes nutrientes no solo, independente de reposição via fertilização, a exportação sem nenhuma reposição de Ca poderá limitar drasticamente a disponibilidade deste nutriente no solo.

**Palavras-chave:** matéria orgânica do solo, rotações de *Pinus*, fracionamento de carbono, fracionamento de Hedley, frações de fósforo, potássio trocável, potássio não trocável, potássio total, cálcio e magnésio trocável, cálcio e magnésio total.

## ABSTRACT

VARGAS, Cristiane Ottes. Forms of soil Carbon and macronutrients in pine forests under first and third rotation in Southern Brazil. Thesis (Ph.D. in Soil Science) - Santa Catarina State University. Post Graduation Program in Agricultural Sciences, Lages, SC. 2012. 102 p.

In soils of low fertility and commonly not fertilized, it is assumed that during the development of forest species, stands they can absorb less labile forms of nutrients. This situation implies on more specific soil analysis because the classical methods estimate only the readily available nutrients, difficulting the diagnosis of soil fertility and fertilizer recommendation for forests. The objective of this study was to analyze labile and non-labile forms of carbon (C), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) of soil in forests of *Pinus taeda* in the first rotation (17 years of cultivation) and third rotation (49 years of continuous pine cultivation) in different soil layers up to 80 cm depth. The relative content of soil carbon in fulvic acid decreased from first to third rotation and humic acids increased from first to third rotation, indicating that with the increase of time use with forests, there is the transformation of more labile carbon in more stable forms. These results show that the total organic carbon may not be a good indicator of the changes in the soil carbon dynamics under pine forests, and that fractions of organic matter may be more reliable. With time, the moderately labile inorganic P acted as a sink of soil P, increasing its levels from first to third rotation, while the labile inorganic (Pi-Pi-RTA and  $\text{NaHCO}_3$ ) and labile organic (Po- $\text{NaHCO}_3$ ) acted as a source of P, suggesting that the analysis of available P in soils under pine forests should take into account these fractions. The soil on older use with pine forest showed lower levels and stocks of K, Ca and Mg and non-exchangeable Ca and K. Both, P, K and Mg showed great reserve in non-labile forms that may be available in the long term, unlike Ca, which showed labile and total concentrations too low. Thus, while the available forms of P, K and Mg could be replenished by other forms of these nutrients in the soil, regardless of replenishment through fertilization, the export of Ca by wood without its replacement may drastically limit the Ca supply for next pine rotations.

**Keywords:** soil organic matter, rotations of pine, fractionation of carbon, Hedley fractionation of phosphorus, exchangeable potassium, non-exchangeable potassium, total potassium, exchangeable calcium and magnesium, total calcium, total magnesium.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

- Tabela 2.1 Teores de carbono total (C-total), carbono lábil (C-lábil) e carbono na biomassa microbiana (C-bm) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....34
- Tabela 2.2 Porcentagem de carbono nas frações ácidos fulvicos (C-AF), ácidos húmicos (C-AH) e huminas (C-HU) em diferentes camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....39

### CAPÍTULO II

- Tabela 3.1 Teores de fósforo nas diferentes formas do fracionamento de Hedley e somatório dos teores de P extraídos do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....53
- Tabela 3.2 Soma das frações de fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....54

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 2. 1 Teores de carbono total (a), carbono lábil (b) e carbono na biomassa microbiana (c) em diferentes camadas do solo em primeira rotação e terceira rotação de *Pinus taeda*. Otacílio Costa, 2012.. .....31
- Figura 2. 2 Teores de Carbono nas frações ácido fúlvico (a), ácido húmico (b) e humina (c) em diferentes camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....37
- Figura 2. 3 Estoques de carbono do solo nas frações total (C- não lábil), lábil (C-lábil), biomassa microbiana (C-bm), ácido fúlvico (C-AF), ácido humico (C-AH), humina (C-HU) até a profundidade de 80 cm as camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. O C-não lábil foi obtido pela diferença entre C-total e C-lábil. Otacílio Costa, 2012.....41

## CAPÍTULO II

- Figura 3. 1 Teores médios de fósforo inorgânico lábil extraído por resina trocadora de ânions (Pi-RTA), fósforo inorgânico lábil extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (Pi- $\text{NaHCO}_3$ ) e fósforo orgânico lábil extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (Po- $\text{NaHCO}_3$ ) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....48
- Figura 3. 2 Teores médios de fósforo inorgânico moderadamente lábil (Pi-NaOH) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-NaOH) extraídos por NaOH 0,5 mol l-1 do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....49
- Figura 3. 3 Teores médios de fósforo inorgânico não lábil extraído por HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (Pi-HCl) e fósforo residual extraído pela digestão do solo remanescente do fracionamento com  $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$  (P-residual) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.....50
- Figura 3. 4 Relação entre frações de Pi e Po lábeis (extraídas por RTA e  $\text{NaHCO}_3$ ) e moderadamente lábeis (extraídas por NaOH) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.....55
- Figura 3. 5 Estoques de fósforo na camada de 0-80 cm (a), 0-40cm (b) e 40-80 cm (c) das frações de fósforo do solo, exceto a fração P-residual, em

florestas de <i>Pinus taeda</i> em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.....	58
---	----

### CAPÍTULO III

Figura 4. 1 Teores médios de potássio trocável (K-NH <sub>4</sub> OAc.), potássio não trocável (K-HNO <sub>3</sub> ) e potássio semi-total (K-HNO <sub>3</sub> +HCl) em solo sob primeira e terceira rotação de <i>Pinus taeda</i> . Otacílio Costa, 2012. ....	67
Figura 4. 2 Estoques de potássio na camada de 0 - 80 cm nas frações de K trocável (K-H <sub>4</sub> OAc.), K não trocável (K-HNO <sub>3</sub> subtraído o K-NH <sub>4</sub> OAc) e K estrutural (K-HNO <sub>3</sub> +HCl subtraídos o K-HNO <sub>3</sub> e o K-NH <sub>4</sub> OAc) em primeira e terceira rotação de <i>Pinus taeda</i> . Otacílio Costa, 2012.....	70
Figura 4. 3 Teores médios de cálcio trocável (Ca-KCl) e cálcio semi-total (Ca-HNO <sub>3</sub> +HCl) do solo em florestas de <i>Pinus taeda</i> em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....	72
Figura 4. 4 Estoques de cálcio na camada de 0-80 cm nas frações cálcio trocável (Ca-KCl) e cálcio não lábil (Ca-HNO <sub>3</sub> +HCl subtraído o Ca-KCl) do solo em florestas de <i>Pinus taeda</i> em primeira e terceira	

rotação. O estoque da fração mais lábil foi subtraído da menos lábil.

Otacílio Costa, 2012.....73

Figura 4. 5 Teores médios de Mg trocável (Mg-KCl) e Mg semi-total (Mg-HNO<sub>3</sub>+HCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012. ....75

Figura 4. 6 Estoques de Mg na camada de 0-80 cm nas frações Mg trocável (Mg-KCl) e Mg não lábil (Mg-HNO<sub>3</sub>+HCl subtraído o Mg-KCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. O estoque da fração mais lábil foi subtraído da menos lábil. Otacílio Costa, 2012. ....76

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>15</b>
<b>2. FORMAS DE CARBONO DO SOLO.....</b>	<b>19</b>
2.1 RESUMO .....	19
2.2 INTRODUÇÃO.....	20
2.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
2.5 CONCLUSÕES.....	42
<b>3. FORMAS DE FÓSFORO.....</b>	<b>43</b>
3.1 RESUMO .....	43
3.2 INTRODUÇÃO.....	44
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
2.1 CONCLUSÕES.....	59
<b>4. FORMAS DE POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO DO SOLO .....</b>	<b>60</b>
4.1 RESUMO .....	60
4.1 INTRODUÇÃO.....	61
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	63

4.3	CONCLUSÕES .....	76
5.	CONCLUSÕES GERAIS .....	78
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
	ANEXOS .....	95

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Na região do planalto sul catarinense, em ambientes com altitudes superiores a 800 m, predominam solos rasos ou pouco profundos, com alto teor de matéria orgânica e muito ácidos que historicamente limitaram o seu uso agrícola com culturas anuais, caracterizando a pecuária de corte extensiva e a exploração madeireira, principalmente da *Araucaria angustifolia*, como atividades regionais tradicionais. Nas últimas décadas, entretanto, como alternativa econômica se fomentou o plantio de florestas de *Pinus*, em função da sua adaptabilidade ao clima regional, boa produtividade, baixa exigência nutricional, tolerância à acidez do solo e da tradição florestal da região (IBGE, 2006; ABRAF, 2010; BRDE, 2004; SFB, 2010, GONÇALVES et al.,2005).

Dados dos censos agrícolas de 1996 e 2006 do IBGE demonstram que as florestas plantadas passaram de 8 % para 14 % da área agrícola do município de Lages, enquanto que neste mesmo período as pastagens diminuíram de 70 % para 51 %. Essas estatísticas são semelhantes às dos demais municípios da região do planalto sul catarinense com economia de base florestal, como Otacílio Costa, Correia Pinto e Campos Novos, com 14 a 16 % de suas áreas agrícolas ocupadas com florestas plantadas. A média do estado de Santa Catarina é de 10% enquanto a brasileira é de 1,4 % (0,7 % da superfície do país) (IBGE, 1996; IBGE 2006; ABRAF, 2010; BRDE, 2003; SFB, 2010; GONÇALVES et al.,2005).

As plantações florestais sustentam uma cadeia produtiva que, muitas vezes, é base de toda uma economia local, satisfazendo tanto a demanda regional de

madeira como o mercado de exportação. Segundo dados do BRDE (2004), em Santa Catarina as florestas comerciais de *Pinus* atendem a mais de 85 % do consumo de madeira do estado, sendo o restante oriundo de *Eucalyptus* (7 %) e de nativas (8 %). Estima-se que o setor florestal é responsável por aproximadamente 7 % do Produto Interno Bruto catarinense e 3,5 % (em 2007) do PIB brasileiro (SFB, 2010; IBGE, 1996, 2006; ABRAF, 2010).

Na região, são encontrados povoamentos de *Pinus* manejados para diferentes objetivos (madeira para serraria, processamento industrial, energia, celulose e papel). A espécie é cultivada tanto por empresas mais especializadas quanto por pequenos produtores; logo, são encontradas desde pequenas até grandes áreas dentro de uma amplitude de condições de cultivo. Para alguns produtores, a floresta não é a principal fonte de renda e funciona como uma alternativa de uso de terras ou uma reserva financeira futura. Essa característica nem sempre leva ao manejo adequado da fertilidade do solo, e muitas vezes, também dispensa tratamentos silviculturais básicos. Por isso, a fertilização do solo não é realizada e, ainda, frequentemente são encontradas florestas plantadas em áreas marginais, comumente impróprias à agricultura e à pecuária, ou mesmo degradadas por estas atividades. Por outro lado, devido à expansão da silvicultura como atividade econômica, também são encontradas florestas comerciais bem manejadas e ocupando bons sítios produtivos.

No sentido restrito de sustentabilidade (EVANS, 2000), o problema silvicultural associado às condições de cultivo regionais reside na insuficiência ou mesmo inexistência de fertilização de solos de baixa fertilidade e submetidos a plantios sucessivos com *Pinus*. Este quadro é preocupante, pois embora a exportação de nutrientes via madeira não seja tão elevada quanto para as culturas

anuais, ficando em torno de 2, 6, 7 e 2 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente para P, K, Ca e Mg (GONÇALVES et al.,2009), sempre há exportação de nutrientes do sistema pela colheita. Assim, em se tratando de solos com baixos teores de nutrientes é provável que em algum sítio de menor fertilidade, ou ainda, em algum tempo de cultivo sucessivo, a fertilidade do solo poderá limitar a produtividade florestal, como alertam Gonçalves et al. (s/d; 2005) e Reissmann & Wisniewski (2000).

Embora a diminuição dos nutrientes possa ser contornada pela fertilização do solo, a definição de doses dos nutrientes para espécies florestais não é simples (BARROS et al., 2000), pois o ciclo biogeoquímico dos nutrientes é bastante diverso. O nitrogênio tem uma dinâmica relacionada à ciclagem biológica dos resíduos; o potássio, o cálcio e magnésio têm relação com os tipos de minerais primários e secundários do solo; enquanto o fósforo tem um comportamento intermediário entre o nitrogênio e o potássio, sendo sua disponibilidade dependente tanto da mineralogia do solo quanto dos processos biológicos. Apesar destas particularidades, todos os nutrientes são ligados aos colóides do solo com diferentes energias, e as frações com menor energia (lábeis) estão mais disponíveis para as plantas. Entretanto, devido ao ciclo longo dos cultivos florestais, formas ligadas com maior energia poderão ser disponibilizadas para as plantas com o tempo.

Desta forma, o diagnóstico da fertilidade do solo florestal se torna complexo, pois além dos teores prontamente disponíveis, formas momentaneamente menos lábeis dos nutrientes do solo poderão vir a ser disponibilizadas ao longo da rotação florestal. O que por um lado pode ser positivo à nutrição florestal, por outro lado, pode dificultar o diagnóstico da fertilidade do solo e a definição da necessidade de fertilização.

Assim, a avaliação da disponibilidade de nutrientes pelos métodos clássicos de análise pode ser inábil para detectar a dinâmica dos elementos em longo prazo, o que torna necessário a utilização de metodologias de análise alternativas. Supõe-se que o fracionamento químico de formas de carbono, fósforo, potássio, cálcio e magnésio e a avaliação da disponibilidade destas formas às plantas permitam compreender melhor a dinâmica destes nutrientes à cultura.

Assim, formularam-se as hipóteses de trabalho: 1- Como na exploração florestal há a exportação de nutrientes do sistema, sítios de menor fertilidade após algum tempo de exploração sucessiva, na ausência de fertilização do solo sofrerão diminuição de sua fertilidade; 2- Os solos há mais tempo sob o cultivo de *Pinus* têm seus teores de nutrientes em formas lábeis e não lábeis diminuídas; 3- A análise da fertilidade do solo pelos métodos clássicos é inábil em detectar modificações sutis em teores, formas e do potencial de disponibilidade dos nutrientes ao longo das rotações e plantios sucessivos com *Pinus*.

Para testar as hipóteses, realizou-se o presente trabalho, o qual será apresentado em três capítulos: o primeiro trata das frações do C e da matéria orgânica do solo em primeira e terceira rotação de *Pinus taeda* L., o segundo capítulo aborda as frações de fósforo e o terceiro as frações de potássio, cálcio e magnésio do solo nas duas rotações de *Pinus* estudadas.

## CAPÍTULO I

### 2. FORMAS DE CARBONO DO SOLO

#### 2.1 RESUMO

O conteúdo de carbono do solo e sua distribuição em formas segundo sua labilidade são atributos importantes para avaliar a eficiência do manejo de solo adotado. O objetivo deste estudo foi avaliar as modificações dos estoques e formas do carbono em solos com diferentes tempos (rotações) de uso florestal. Foram selecionadas uma área em primeira rotação (com 16 anos) e outra em terceira rotação (com 49 anos) cultivadas em cambissolo húmico, do qual amostras foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, em seis perfis por floresta. Foram determinados os teores de carbono total, carbono lábil, carbono da biomassa microbiana e carbono das frações da matéria orgânica do solo: ácido húmico, ácido fúlvico e humina. A floresta em 3ª rotação apresentou menor estoque de carbono do solo devido ao menor teor nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade. O solo em primeira rotação apresentou uma quantidade de carbono lábil e carbono em ácidos fúlvicos maior, sustentando maior população microbiana, medida pelo carbono na biomassa microbiana. O solo em terceira rotação teve seu conteúdo relativo de carbono em ácidos fúlvicos menor e o de ácidos húmicos maior, quando comparado à floresta em primeira rotação, indicando que com o aumento do tempo de uso do solo com florestas, há a transformação de formas mais lábeis de carbono em formas mais estáveis.

Palavras-chave: matéria orgânica do solo, rotações de *Pinus*, fracionamento de Carbono.

## 2.2 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) é sensível às práticas de manejo e tem estreita relação com outros atributos do solo, sendo os fatores que controlam seu armazenamento importantes na regulação do CO<sub>2</sub> na atmosfera (QUALLS et al., 2003), na manutenção da fertilidade do solo (MIELNICZUK, 2008; BAYER e MIELNICZUK, 2008) e na produtividade dos sítios florestais (QUALLS et al., 2003; RESCK et al., 2008; RIGATTO et al., 2005), assim, o uso do solo deve incluir práticas de manejo que preservem os teores de MOS.

A conversão de florestas, campos ou cerrados para sistemas de produção com culturas anuais diminui o teor de MOS. Os efeitos do cultivo e dos sistemas de manejo do solo sobre a MOS estão bem documentados (RESK et al., 2008, JOHNSON et al., 2007), entretanto, informações sobre a MOS após a conversão de áreas agrícolas em florestas são escassas. Alguns estudos que avaliam a conversão de solos agrícolas em floresta indicam acúmulo de MOS, muitas vezes, restrito à camada superficial do solo. Respostas de sítios individuais mostraram uma grande variação de resultados, por vezes com redução do teor de MO (JOHNSON et al., 2007; ZINN et al., 2002) ou, mais frequentemente, aumento da MO no solo (JOHNSON et al., 2007; MARKEWITZ et al., 2002; RICHTER et al., 1999, EVANS, 1999, LAL et al., 1998, RESK et al. 2008).

Em áreas com floresta em regeneração (*Quercus*, *Acer*, *Liriodendron*, *Fagus* e *Pinus*), agricultura, pastagens nativas e com *Pinus taeda* no Tennessee, EUA, Trettin et al. (1999) e Johnson et al. (2007), observaram que, ao longo de 32 anos, apesar da vegetação ter aumentado de forma constante na floresta em regeneração, existe grande variação nos teores de C e N no espaço e no tempo. Essas variações ocorrem em função de fatores climáticos e também topográficos. De modo geral, em

climas mais úmidos e mais frios, a taxa de decomposição é menor e o teor de MOS maior. Em relação à topografia, normalmente nas partes mais elevadas com melhor drenagem, o teor de MOS é menor do que nas áreas mais baixas e com maior umidade do solo. Alguns trabalhos demonstram que o efeito da topografia é mais pronunciado nos trópicos do que em regiões de clima temperado. Por isso, questionam os estudos que comparam o teor de MOS entre diferentes climas. No entanto, o tema é inconcluso, já que alguns autores como Greenland et al. (1992) e Sanchez e Logan (1992), segundo Resket al. (2008), afirmam que os estoques de MOS podem ser comparáveis em solos com dois tipos climáticos contrastantes.

Devido à falta de estudos de longo prazo, a maioria das pesquisas no Brasil compara florestas plantadas e nativas ou áreas agrícolas próximas. Zinn et al. (2002), estudando o cultivo de *Pinus* no cerrado, verificaram que, apesar do acúmulo de serapilheira, a baixa taxa de decomposição dos resíduos vegetais reduziu o teor de MOS. Já Mafra et al. (2008), no planalto sul catarinense, concluíram que as florestas plantadas com *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* mantiveram os estoques de carbono orgânico, na camada mais superficial, em níveis semelhantes aos de mata e campo nativos. Nos campos de cima da serra no Rio Grande do Sul, Brun (2008) verificou teores de carbono orgânico elevados no solo e na serapilheira, os quais foram maiores nas áreas com *Pinus taeda* e floresta nativa, quando comparados com o campo, mostrando o potencial que os resíduos florestais têm em adicionar carbono ao solo. Também Costa Lima et al. (1995) concluíram sobre o efeito do cultivo de *Pinus elliottii* em manter e até aumentar o estoque de carbono total na camada superficial do solo. Morales (2007), em Otacílio Costa, encontrou correlação positiva entre povoamentos mais produtivos e o aporte de resíduos, bem como, efeito diferenciado do cultivo de *Pinus* sobre os atributos do solo, que variou

conforme a profundidade do solo. Em geral, os solos mais rasos foram mais suscetíveis à compactação e apresentaram menor produtividade.

O aumento da MOS em florestas de *Pinus* pode estar relacionado ao preparo mínimo da área do povoamento, ao aumento da biomassa florestal e à menor perda de carbono. No entanto, em solos com deficiência nutricional, deve-se atentar que uma maior espessura da camada orgânica pode denotar uma lenta decomposição da serapilheira, com diminuição da ciclagem e do suprimento de nutrientes ao povoamento e, maior dispêndio energético para a floresta, que precisará constantemente renovar suas raízes mais frágeis, por se concentrarem nas camadas superficiais do solo em busca de nutrientes (ANDRAE, 1978; REISSMAM & WISNEWSKI, 2005).

Assim, com o acúmulo de MOS nas camadas mais superficiais do solo, a avaliação somente de estoques e teores totais pode não expressar todas as alterações (positivas e negativas) que o sistema florestal proporciona ao solo. Neste sentido, o estudo de diferentes frações da MOS pode melhorar o entendimento de sua dinâmica.

Como a síntese e decomposição das diferentes frações da MOS são reguladas por processos físicos, químicos e biológicos, supõe-se que cada uma das frações da MOS respondem diferentemente ao manejo e às práticas de uso do solo (SWIFT et al. 1996, BLAIR et al., 1995). Alguns autores, no entanto, discutem sobre qual fração é a mais adequada para monitorar as transformações da matéria orgânica nos solos. Em geral, os ácidos húmicos e huminas têm baixa taxa de transformação e dificilmente se relacionam com processos de curto prazo, já que são considerados o estágio final das transformações da MOS. Possuem, entretanto, importante função de reserva de nutrientes para as plantas e para os processos

físicos do solo (STEVENSON, 1994). Por outro lado, as frações constituídas pela serapilheira, biomassa microbiana, ácidos fúlvicos e substâncias não-húmicas, são indicadores mais sensíveis ao manejo do solo (MAIA & CANTARUTTI, 2003; PULROLNIK, 2007; FARIA et al., 2008; ROSCOE & MACHADO, 2002).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as modificações dos teores e estoques e formas de C com o tempo de cultivo de *Pinus taeda* L. em um cambissolo húmico do planalto sul catarinense.

## 2.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.3.1 Características das áreas de estudo e amostragem

Este estudo foi conduzido no município de Otacílio Costa no Estado de Santa Catarina, em solos sob povoamentos de *Pinus taeda* L. com 16 anos de idade e em primeira rotação e de *Pinus taeda* com 17 anos em terceira rotação, esta última totalizando 49 anos de cultivo com *Pinus*.

As florestas pertenciam à empresa Klabin S.A. e possuíam manejo comum para celulose, espaçamento de 2x3 m e não receberam fertilização. As coordenadas das áreas de amostragem são de 27° 30' 03.38" S e 50° 05' 17.78" O e de 27° 29' 59.92" S e 50° 03' 25.84" O, respectivamente, para a primeira e a terceira rotação de *Pinus*, que possuem uma altitude média de 870 m. O clima da região é classificado no sistema Köppen como mesotérmico úmido (Cfb), com verão brando, temperatura média anual de 15,9 °C e precipitação anual entre 1300 e 1400 mm.

As áreas de amostragem (unidades modais) foram selecionadas após tradagens comparativas do solo (amostragens piloto), tendo por base a

homogeneidade quanto ao tipo de solo, altitude, exposição solar e relevo entre as florestas em primeira e terceira rotação de *Pinus taeda* (Anexo I). Foi selecionada uma unidade modal em cada floresta.

O número de pontos amostrais (n) por unidade modal foi calculado através da expressão:  $n = (t^2 \cdot CV^2) / E$ , onde t: estatística de Student ao nível de probabilidade de 5%, CV: coeficiente de variação (%) e E: erro de amostragem (%), conforme Péllico Netto & Brena (1997). Foi considerado um erro de amostragem de 15% para o carbono, estimado após amostragens preliminares.

Em cada unidade modal de 750 m<sup>2</sup> foram coletadas amostras de solo em seis perfis (seis pontos amostrais por unidade modal) nas camadas de 0-10; 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Estas camadas foram definidas em razão da padronização entre as florestas, levando em consideração a semelhança entre os horizontes do solo (Anexo II).

Em cada um dos seis perfis nas unidades modais foram coletadas amostras para as análises químicas e amostras indeformadas com anéis volumétricos para determinar a densidade do solo. No centro de cada unidade amostral foi aberto um perfil para a descrição do solo (Anexo III). A serapilheira acumulada foi coletada com auxílio de um gabarito de 0,25m<sup>2</sup>, em três repetições.

O solo das duas áreas amostradas é um Cambissolo Húmico com relevo suavemente ondulado. As características químicas e físicas dos solos, bem com a descrição dos perfis de solo estão expostas nos Anexos II e III, tendo as áreas apresentado a seguinte variação média dos resultados analíticos na camada de 0 a 80 cm: o pH em água de 4,0 a 4,5; 1 a 8 mg kg<sup>-1</sup> de P; 25 a 67 mg kg<sup>-1</sup> de K; 0,04 a 0,84 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de Ca e 0,10 a 0,25 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de Mg (Anexo II).

### 2.3.2 Análises de serapilheira e solo

A serapilheira foi seca em estufa (60°C) com ventilação forçada, moída em moinho tipo willey, tendo os seus macro e micronutrientes extraídos por digestão ( $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e determinados conforme a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

As amostras de solo foram secas em estufa (60°C) com ventilação forçada, passadas em peneira de malha de 2 mm, e submetidas à análise química (TEDESCO et al., 1995). A análise granulométrica (método da pipeta) e densimétrica foram realizadas conforme metodologia da EMBRAPA (1997).

Foram determinados os teores de Carbono total (C-total), pelo método de Mebius adaptado para bloco de digestão (Mebius no bloco) descrito por Yeomans & Bremner (1988), onde amostras de 0,2 g de solo em tubos de digestão foram oxidadas com 10 mL  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  1,25 mol  $\text{L}^{-1}$  e 15 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, utilizando-se aquecimento externo de 150° durante 30 minutos. A determinação do teor de C foi realizada pela dosagem do Cr com  $\text{FeSO}_4$ . 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ . Os teores de C total foram corrigidos para os de combustão a seco pelo fator de 1,14, conforme Rheinheimer et al. (2008).

O C caracterizado como lábil foi obtido pela oxidação de amostras de 1,0 g de solo em tubos de centrífuga com 25 mL de  $\text{KMnO}_4$  0,33 mol  $\text{L}^{-1}$ , conforme procedimento proposto por Blair (1995) e posteriormente adaptado para solos tropicais por Shang & Tiessen (1997), o qual é descrito em Mendonça & Matos (2005). As amostras foram agitadas (12 rpm/ 1 hora) e centrifugadas (400 G/ 5 min), tendo uma alíquota de 0,5 mL das amostras ajustada para o volume de 100 mL. As soluções diluídas tiveram a absorbância medida à 565 nm em espectrofotômetro UV-VIS, sendo a concentração de  $\text{MnO}_2$  estimada com base em curva-padrão

construída com  $\text{KMnO}_4$  preparado imediatamente antes de cada bateria e padronizado com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ . A quantidade de C-lábil foi calculada considerando que 2 moles de  $\text{MnO}_2$  são consumidos na oxidação de 1 mol de C.

O Carbono da biomassa microbiana (C-bm) foi determinado pelo método de extração / irradiação conforme Islam & Weil (1998). Foram pesadas amostras de solo úmido (3,0g de solo base seca) em duplicata, sendo uma irradiada em duas etapas em microondas a uma energia total de  $800 \text{ J s}^{-1}\text{g}^{-1}$ . O tempo de irradiação foi previamente calibrado, de acordo com o peso da amostra e a potência do microondas. O C solúvel de amostras irradiadas e não irradiadas foi extraído com  $\text{K}_2\text{SO}_4$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  na razão 1: 2,5 (solo: extrator). As amostras foram agitadas em agitador orbital a 120 rpm durante 30 minutos e centrifugadas (900 G/ 5 min). Em seguida foram retirados 2 mL do sobrenadante filtrados e adicionados 2 mL de uma solução de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$   $1,25 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$ . As amostras foram incubadas em estufa por 4 horas à  $60^\circ\text{C}$ , previamente calibrada e aquecida. A leitura foi realizada em espectrofotômetro UV-VIS em comprimento de onda de 590 nm, tendo como base de calibração curva de glicose de 0 a  $400 \text{ mg L}^{-1}$ . Os valores de C-bm foram obtidos pela diferença do teor de C da subamostra irradiada pelo da não irradiada. Foi utilizado o fator de 0,213, proposto por Islam & Weil (1998) para correção dos teores obtidos pelo método de fumigação-extração.

O fracionamento da matéria orgânica do solo, correspondente às frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH) e humina (C-Hu) foi realizado com base na solubilidade diferencial da MOS em soluções alcalina (adição de  $\text{NaOH}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e ácida (pela adição de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  até pH 2,0) conforme metodologia de Swift (1996), adaptada por Mendonça & Matos (2005), descrita a seguir: Em amostras de 1g de solo em tubo de centrífuga de 50 mL foram adicionados 20 mL de  $\text{NaOH}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ ,

agitando-se manualmente e ficando em repouso por 24h, após este período a amostra passou pelos seguintes processos: foi novamente agitada manualmente e deixada em repouso por mais 1 h, após centrifugada a 900 G por 30 min, tendo sido o sobrenadante recolhido em outro recipiente e reservado. Ao resíduo foi novamente adicionado o extrator, que passou pelos mesmos processos de agitação manual, repouso durante 1h, centrifugação e recolhimento do sobrenadante junto ao previamente reservado. Este processo foi repetido por três vezes até a obtenção de um extrato límpido e a fração insolúvel da matéria orgânica (huminas) permaneceu junto ao solo residual. No sobrenadante alcalino reservado, o pH foi ajustado para 2,0 (+0,1) pela adição de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20%, precipitando-se a fração ácidos húmicos, onde após 24h de repouso as amostras foram centrifugadas. O sobrenadante obtido (ácidos fúlvicos) teve o volume ajustado para 50 mL com o NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>. O precipitado foi diluído com H<sub>2</sub>O deionizada e volume ajustado para 50 mL. A determinação dos teores de C nas frações foram obtidas pela dosagem do C em extratos de 5 mL pelo método Mebius no bloco, sendo adicionados 5 mL de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,1667 mol L<sup>-1</sup> (mais 10 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado), após transferidos para frascos erlemeyer de 125 mL e titulados com FeSO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>. A fração húmica (C-Hu) foi estimada pela diferença entre o C-total e o C dos ácidos fúlvicos + ácidos húmicos, conforme Dick et al., (1998).

Os dados foram submetidos à teste de normalidade, correção, análise de variância e análise de correlação de Pearson, sendo para cada camada do solo realizado um teste t simples pareado. Utilizou-se o pacote estatístico SAS (2011).

## 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.4.1 Formas de carbono do solo

As alterações nos teores de MOS ocorrem predominantemente nas camadas superficiais do solo (RESCK et al., 2008) e com taxas variadas, pois as condições climáticas e o tipo de solo influenciam a estabilidade da matéria orgânica (BAYER et al., 2003). Na floresta em primeira rotação, os teores de C-total foram semelhantes ao longo de todo o perfil do solo até os 60 cm de profundidade (Figura 2.1a), variando de 35,8 g kg<sup>-1</sup> na camada superficial a 31,4 g kg<sup>-1</sup> na camada de 40-60 cm, a partir do qual diminuiu para 23,5 g kg<sup>-1</sup> na última camada (60-80 cm). Para o solo em terceira rotação, os teores de C-total foram semelhantes entre as camadas do solo até 40 cm (29,6 a 32,9g kg<sup>-1</sup>), mas diminuíram sensivelmente nas duas últimas camadas (15,8 e 8,7 g kg<sup>-1</sup>). A diminuição do teor de C em profundidade é esperada, já que com o aporte de resíduos orgânicos na superfície do solo se forma um gradiente de C ao longo do perfil do solo, e o aqui encontrado é semelhante ao observado por outros autores (MAFRA et al., 2008, CORAZZA et al., 1999).

Contudo, o fato que chama atenção na Figura 2.1a é que de 0 até 40 cm de profundidade, camada mais afetada pelo manejo, os teores de C total são semelhantes entre os solos em primeira e em terceira rotação de *Pinus* e, somente nas camadas abaixo de 40 cm, os teores de C-total são diferentes e, ainda, menores no solo sob terceira rotação, quando se esperaria menores teores de C no solo em primeira rotação.

Um fator que pode ter influenciado os teores de C é a existência de diferentes condições de umidade e aeração entre os solos. Comparativamente, a floresta em

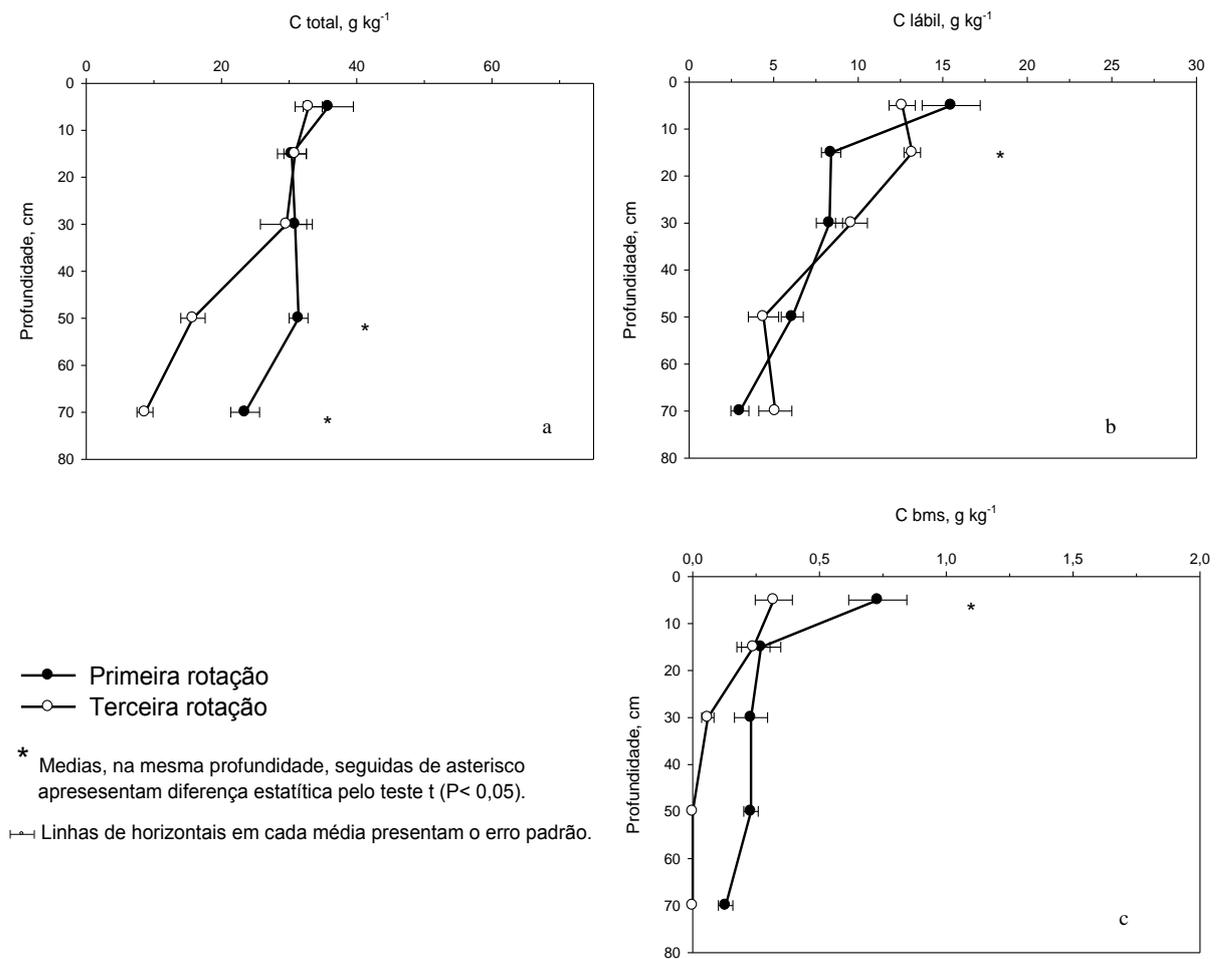
terceira rotação apresentou porosidade de aeração (macroporosidade) variando de 16% na camada superficial até 11% na camada mais profunda (Anexo II), enquanto no solo em primeira rotação esses valores foram bem maiores, decrescendo de 22% na camada superficial para 20% na camada mais profunda. Adicionalmente, enquanto na floresta em primeira rotação tanto a porosidade total como a microporosidade aumentaram ao longo do perfil do solo (Anexo II), na floresta em terceira rotação estes atributos decresceram. Assim, pode-se inferir que esta última apresenta maior umidade e menor aeração desde a camada superficial, ficando mais restritivo ainda à medida que aumenta a profundidade do solo. O regime de menor aeração no solo de terceira rotação pode ter sido um fator restritivo ao crescimento radicular no solo, principalmente nas camadas mais profundas e, assim, a adição e acúmulo de carbono no solo em terceira rotação ficou prejudicada, quando comparado com o solo de primeira rotação, onde a melhor aeração em todo perfil de solo permitiu um melhor crescimento radicular e consequente acúmulo de carbono.

Além disso, os teores iniciais de C (tempo zero de uso florestal) podem ter sido diferentes entre as duas florestas estudadas, que no presente estudo, não pertencem a um experimento de longo prazo (mesmo espaço analisado no tempo) e, sim a um estudo de caso entre duas áreas próximas, cujo teor inicial de C é desconhecido. Assim os teores de C poderiam ter partido de patamares diferentes no início das rotações e chegado a teores superficiais semelhantes.

Normalmente o uso florestal provoca aumento nos teores de C. Como exemplo, em um nitossolo háplico no planalto sul catarinense, Mafra et al. (2008) relataram teores de C-total na camada superficial (0-5cm) de  $46 \text{ g kg}^{-1}$  em primeira rotação de *Pinus taeda* com 20 anos (P20) e de  $45 \text{ g kg}^{-1}$  em *Pinus* com 12 anos

(P12). Até a profundidade de 40 cm, relataram decréscimos do teor de C de 0,44 g kg<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> em P20 e de 0,61 g kg<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> em P12. Na média, P20 teve o maior teor de carbono (35 g kg<sup>-1</sup>), semelhante ao campo nativo (33 g kg<sup>-1</sup>), porém maior que P12 (32 g kg<sup>-1</sup>), que a floresta ombrófila mista (29 g kg<sup>-1</sup>) e floresta de araucária com 18 anos (29gkg<sup>-1</sup>).

Por outro lado, em um experimento de longo prazo em Calhoun na Carolina do Sul, EUA, Richter et al. (1999) avaliaram a acumulação de <sup>14</sup>C em florestas de *Pinus taeda* com 40 anos e verificaram que 80% do carbono acumulado neste período pertenciam à biomassa florestal e 20% à serapilheira, e que houve menos de 1% de acréscimo de C na camada superficial do solo (até 7,5 cm). Schlesinger e Lichter (2001) em florestas de *Pinus taeda* expostas a concentrações elevadas de CO<sub>2</sub>, verificaram que quase metade do C absorvido foi alocado na biomassa florestal, e que grande parte se decompôs rapidamente, contribuindo apenas com uma pequena parte do seu conteúdo de C para a fração húmica do solo. Observaram que a acumulação de carbono nas camadas mais profundas do solo mineral foi ausente, e os autores sugeriram que em longo prazo o seqüestro líquido de carbono nestes solos florestais pode ser improvável.



**Figura 2. 1** Teores de carbono total (a), carbono lábil (b) e carbono na biomassa microbiana (c) em diferentes camadas do solo em primeira rotação e terceira rotação de *Pinus taeda*. Otacílio Costa, 2012.

O carbono lábil foi semelhante nas duas florestas, havendo diferença significativa entre elas apenas na camada de 10 - 20 cm (Figura 2.1b). Na camada de 0-10 cm o C-lábil atingiu, na média das duas florestas, aproximadamente 40 % do C-total (Tabela 2.1). O principal fenômeno observado para esta fração foi seu maior acúmulo na camada superficial, apresentando um gradiente semelhante em ambas as florestas. O C-lábil decresceu de 15,5 g kg<sup>-1</sup> (0 - 10 cm) para 3,0 g kg<sup>-1</sup> na última camada na primeira rotação, e de 12,6 para 5,1 g kg<sup>-1</sup> de C-lábil na terceira rotação, nas mesmas camadas. Isso significa uma redução média de 60 a 80% de C-lábil em

profundidade em relação à camada superficial (Figura 2.1b, Tabela 2.1). Novamente, o acúmulo na camada superficial é atribuído ao aporte de material orgânico principalmente na superfície, onde a adição e decomposição de material orgânico, proveniente da serapilheira, contribuem para os maiores teores de C lábil das camadas superficiais do solo. Enquanto, processos como a rizodeposição e o fluxo de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) contribuem com os teores de C em profundidade, como relatado por Mobley et al. (2009) em área com *Pinus* nos EUA. No presente trabalho, a quantidade de serapilheira acumulada foi de 21,6 t ha<sup>-1</sup> na terceira rotação e de 16,5 t ha<sup>-1</sup> na primeira rotação, sendo os teores de C da serapilheira de 428 g kg<sup>-1</sup> e de 403 g kg<sup>-1</sup>, o estoque foi de 9,2 t ha<sup>-1</sup> e de 6,6 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, na primeira e terceira rotação de *Pinus taeda*. Nos Campos de Cima da Serra no RS, em *Pinus taeda* com 18 anos, e 36 anos de cultivo sucessivo, foi observado acúmulo de serapilheira de 33,6t ha<sup>-1</sup> com teor de C de 497 g kg<sup>-1</sup>, e em *Pinus taeda* com 12 anos e 30 anos de cultivo sucessivo foi de 14,4 t ha<sup>-1</sup> e teor de C de 475 g kg<sup>-1</sup> (BRUN, 2008).

A distribuição do C-lábil no perfil do solo auxilia a sustentar a hipótese levantada para C-total de que as florestas em primeira e terceira rotação iniciaram com teores diferentes de C, pois se fosse admitido que a diminuição de C nas camadas mais profundas de P3 fosse em função do maior tempo de uso florestal e devido a uma maior taxa de mineralização, também deveria ser observado este fenômeno na fração C-lábil. No entanto, evidencia-se que o solo da terceira rotação apresenta teor de C-lábil similar ao da primeira (Figura 2.1b) e, além disso, os menores teores de C-bm observados (Figura 2.1c) não justificam um aumento da mineralização e do consumo do C antigo no solo sob terceira rotação. Entretanto, a contribuição deste fator ao longo das rotações com *Pinus* não pode ser inteiramente

descartada, pois a terceira rotação já passou por duas colheitas florestais, enquanto a primeira ainda não sofreu tal intervenção, não podendo ser inteiramente descartado que essa intervenção possa causar uma perturbação tal que promova uma super-mineralização da matéria orgânica nestes eventos drásticos, o que mereceria um estudo específico para verificação. Em estudos de laboratório, Rumpel e Kögel-Knabner, (2010) observaram que a decomposição de C com tempos de residência alto no subsolo poderia ser estimulada pela adição de C-lábil. Fontaine et al. (2007) investigaram a estabilidade do C em camadas profundas em um perfil do solo através da caracterização física e química do carbono orgânico, incubações do solo e datação por radiocarbono. Foi demonstrado que o fornecimento de C derivado de plantas frescas para o subsolo (60-80 cm de profundidade) estimulou a mineralização microbiana de C com  $2567 \pm 226$  anos de idade. Segundo os autores, os resultados sugerem que, na ausência de carbono orgânico fresco, uma fonte essencial de energia para os microorganismos do solo, a estabilidade do carbono orgânico em camadas profundas do solo é mantida. Qualquer mudança no uso da terra e práticas agrícolas que aumentam a distribuição de carbono fresco ao longo do perfil do solo pode, todavia, estimular a perda de carbono estabilizado antigo. Outro mecanismo que leva a desestabilização da MOS do subsolo, salientado pelos autores, é o rompimento da estrutura física e do suprimento de nutrientes para os microorganismos do solo (RUMPEL e KÖGEL-KNABNER, 2010).

Os teores de C da biomassa microbiana (C-bm) do solo diferiram significativamente entre a primeira ( $0,73 \text{ g kg}^{-1}$ ) e a terceira rotação ( $0,32 \text{ g kg}^{-1}$ ) apenas na primeira camada do solo (0 - 10 cm) (Figura 2.1c). A partir desta o C-bm decresceu em profundidade, acompanhando a mesma tendência observada para C-total e C-lábil. Ressalta-se que na terceira rotação, a partir da camada de 40 cm, não

foi detectado C-bm, indicando baixa atividade microbiana neste solo, nestas profundidades. Vários atributos edáficos e do ecossistema podem influenciar a atividade microbiológica do solo, como a umidade, temperatura, estrutura, disponibilidade de nutrientes, textura, relação C/N, presença de resíduos orgânicos, teor de O<sub>2</sub>, estimulantes e supressores de crescimento, entre outros (CARVALHO, 2005; DE-POLLI E GUERRA, 2008).

**Tabela 2.1** Teores de carbono total (C-total), carbono lábil (C-lábil) e carbono na biomassa microbiana (C-bm) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Prof	C-total		C-lábil		C-bm	
	Primeira	Terceira	Primeira	Terceira	Primeira	Terceira
cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>0-10</b>	35,8	32,9	15,5 (43) <sup>1</sup>	12,6 (38)	0,73 (2,0)	0,32 (1,0)
<b>10-20</b>	30,4	30,9	8,4 (28)	13,2 (43)	0,27 (0,9)	0,24 (0,8)
<b>20-40</b>	30,9	29,6	8,3 (27)	9,6 (32)	0,23 (0,7)	0,06 (0,2)
<b>40-60</b>	31,4	15,8	6,1 (19)	4,4 (28)	0,23 (0,7)	0,00 (0,0)
<b>60-80</b>	23,5	8,7	3,0 (13)	5,1 (59)	0,13 (0,6)	0,00 (0,0)

<sup>1</sup> Valores entre parênteses representam o percentual de C na fração em relação ao C-total (100%).

A proporção de C-bm em relação ao C-total do solo na camada superficial, entre 1 e 2% do C-total (Tabela 2.1) está em proporções um pouco abaixo das normalmente encontradas no solo, de 2 a 5% do C-total (SYLVIA et al., 1998). Porém, em valores quantitativos, estão semelhantes aos encontrados por Miyauchi (2007) no Estado do Paraná, também em áreas de planalto, onde encontrou teores maiores em áreas de floresta nativa (1,27 g kg<sup>-1</sup> de C-bm) em relação às de *Pinus* com 50 anos de reflorestamento (0,95 g kg<sup>-1</sup>) e lavoura (0,53 g kg<sup>-1</sup>). Isso indica que a percentagem menor de C-bm não é devida a uma pequena população microbiana

nos solos, mas sim ao alto teor de C-total dos solos da região. Mesmo em pequena quantidade em relação ao C-total, o C-bm pode demonstrar mais sensibilidade às mudanças iniciais no conteúdo de matéria orgânica do solo do que a determinação de C-total (DE-POLLI e GUERRA, 2008).

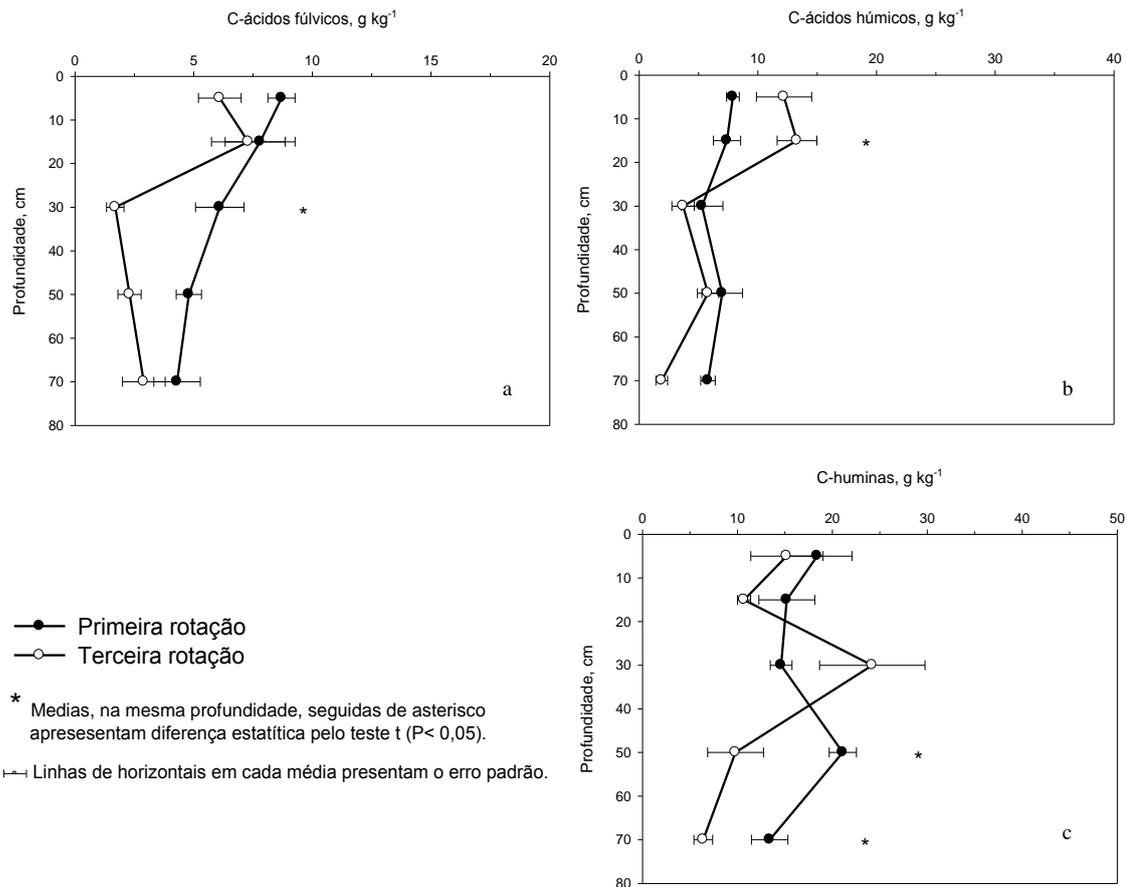
Como as florestas de *Pinus* estudadas são compostas pela mesma espécie e têm praticamente a mesma idade, é provável que as diferenças entre as comunidades microbianas (conforme sua composição histórica e o tipo de matéria orgânica acumulada) sejam mais determinantes na quantidade de C-bm existente. Auer et al.(2007) afirmam que formas quimicamente mais complexas do C desfavorecem a utilização do C pela microbiota, pois em estádios tardios da decomposição, a quantidade da biomassa viva de fungos em acículas de *Pinus sylvestris* foi negativamente relacionada com a concentração de lignina na serapilheira, indicando que a qualidade do substrato pode ser um fator limitante. Além disso, constatou-se um intenso declínio na biomassa microbiana e respiração em camadas mais profundas da serapilheira e solo em estágios sucessionais avançados de decomposição, presumidamente devido ao aumento da recalcitrância e consequente decréscimo no teor dos recursos de carbono disponíveis.

No entanto, relacionar a diminuição do C-bm em P3 com a menor disponibilidade de recursos de C à microbiota é difícil, pois necessitaria, além da avaliação da recalcitrância da matéria orgânica (que será abordada a seguir, através do fracionamento das substâncias húmicas), de um estudo microbiológico mais aprofundado de similaridade das espécies da comunidade microbiana nestes ambientes.

#### 2.4.2 Fracionamento da matéria orgânica: ácido fúlvico, ácido húmico e humina

Os mecanismos de estabilização e o tempo de permanência do C no solo ainda não são bem entendidos e de fácil quantificação, já que são influenciados por diversos fatores bióticos e abióticos, sendo a separação da matéria orgânica do solo (MOS) em frações, puramente didática, pois os mecanismos de estabilização atuam simultaneamente e afetam os substratos e os produtos em todos os estágios de decomposição (PILLON et al., 2002; SOLLINS et al., 1996; CHRISTENSEN, 1996). Mesmo sob essas ressalvas, pode-se identificar entre as diferentes frações da matéria orgânica humificada do solo características químicas, físicas, morfológicas e de distribuição no perfil do solo distintas, que podem ser usadas como indicativo da qualidade da matéria orgânica (LIMA, 2004).

Os teores de ácido fúlvico (C-AF) decresceram ligeiramente em profundidade na floresta em primeira rotação, enquanto que na em terceira rotação de *Pinus* foram observados teores sensivelmente superiores nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm (Figura 2.2a). Em média, os teores de C-AF foram maiores na primeira do que na terceira rotação, embora tenha sido detectada diferença estatística entre as florestas apenas na camada de 20-40 cm. Contrariamente, para a fração de carbono ácido húmico (C-AH) foram observados teores 60 % maiores na terceira rotação, em relação à primeira na média das camadas até 20 cm (Figura 2.3b). Em profundidades maiores que 40 cm, os teores de C-AH na primeira rotação de *Pinus* foram ligeiramente superiores à terceira.



**Figura 2.2** Teores de Carbono nas frações ácidos fúlvicos (a), ácidos húmicos (b) e huminas (c) em diferentes camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

O carbono da fração humina (C-HU), compartimento mais estável da MOS, foi bastante variável, não havendo comportamento claro de diminuição dos teores com o aumento da profundidade (Figura 2.2c). Segundo Canellas et al. (2000), C-HU pode variar muito dentro de um mesmo perfil, e, segundo os autores, está aleatoriamente distribuída no perfil do solo, enquanto as frações C-AH e C-AF permanecerem mais constantes. Apenas nas profundidades maiores que 40 cm foram observadas diferenças, onde os teores de C-Hu na terceira rotação foram menores que os da primeira. Como a humina é a fração do C que está mais intimamente associada aos colóides minerais do solo, ela possui maior resistência à

decomposição microbiana, sendo a fração mais estável do C do solo e muito pouco, ou mesmo, não influenciada pelo manejo (VOLKOFF & CERRI, 1988). Esse fato também contribui para a hipótese de que as florestas foram implantadas em áreas com teores de carbono iniciais diferentes.

Os maiores teores de C-AH e menores de C-AF no solo sob terceira rotação de *Pinus* em relação à primeira é um indicativo de maior estabilização de MOS no solo com mais tempo de uso florestal. Os ácidos húmicos são compostos estáveis, ou seja, de difícil degradação em relação aos ácidos fúlvicos (STEVENSON, 1994; CANELLAS et al., 1999). São, portanto, um sinalizador natural do processo de humificação e refletem tanto a condição de gênese das frações como a de manejo do solo (ZECH et al., 1997). Isso pode ser constatado na Tabela 2.2, onde a percentagem de C-HU se manteve relativamente estável, com valores de 56 e 54,6% na média de todas as profundidades nos solos em primeira e terceira rotação, respectivamente. Por outro lado, enquanto na primeira rotação o C-AF (21%) e o C-AH (23%) foram relativamente semelhantes, na terceira rotação a proporção de C-AF (17%) foi menor que a de C-AH (28%), indicando o aumento do grau de humificação da MOS.

O aumento temporal de ácidos húmicos em relação aos fúlvicos é possível, pois os últimos podem se polimerizar (GUERRA et al., 2008), formando substâncias húmicas mais complexas, como sustentado por Leite et al., (2003) que observaram teores de C-AH maiores em florestas naturais, sem perturbação do solo, devido à maior polimerização de compostos húmicos, aumentando a proporção da C-AH em relação ao C-AF. Além disso, o maior acúmulo de matéria orgânica do solo pode contribuir para o aumento dos estoques de ácidos húmicos, por meio de processo de herança de compostos do material orgânico fresco, de modo semelhante ao que

ocorreria com a humina herdada, particularmente, da lignina (STEVENSON, 1994). Castro (2008) cita que os teores de C-AH chegam a ser 8 a 18 vezes maiores que o C-AF em solos da Amazônia, e 4 a 14 vezes em cambissolos do Mato Grosso. O predomínio de grandes quantidades da fração C-AH é atribuído pelo autor à intensa humificação e rápido consumo das formas mais lábeis de C (C-AF).

**Tabela 2.2** Porcentagem de carbono nas frações ácidos fulvicos (C-AF), ácidos húmicos (C-AH) e huminas (C-HU) em diferentes camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Prof.	C-AF		C-AH		C-HU	
	Primeira	Terceira	Primeira	Terceira	Primeira	Terceira
cm	----- % -----					
<b>0-10</b>	25	18	23	36	53	45
<b>10-20</b>	26	23	24	43	50	34
<b>20-40</b>	24	6	20	12	56	82
<b>40-60</b>	15	13	21	32	64	55
<b>60-80</b>	18	26	25	17	57	57
<i>média</i>	21	17	23	28	56	55

Para as florestas do presente estudo, os teores de ácidos solúveis (C-AF + C-AH) nas camadas superficiais foram quase duas vezes maiores na floresta em terceira rotação de *Pinus* do que a em primeira rotação, e acredita-se que os principais componentes de diferenciação entre as dinâmicas do C que podem ser devidas às rotações são a diminuição da atividade microbiana e a estabilização da MOS na terceira rotação. Pressupõe-se que a recalcitrância do material orgânico e o histórico de uso do solo tenham influenciado as comunidades microbianas e desestimulado a mineralização na terceira rotação e contribuído para a estabilização de C (teoria de insolubilização e polimerização de substâncias húmicas, conforme Guerra et al.. (2008). De acordo com Kononova (1982), a relação C-AH/C-AF para

solos temperados variam entre 0,7 a 2,5. Menezes (2008), estudando as substâncias húmicas em solos de diferentes feições geomorfológicas no rebordo do planalto do Rio Grande do Sul, encontrou 1,6 a 3,3 mais C-AH que C-AF, semelhantes aos relatados para as regiões temperadas.

Avaliando a relação existente entre os métodos de avaliação de carbono discutidos no item 2.4.1 (C-total, C-lábil e C-bm) e as frações da MOS (C-AF, C-AH e C-HU), item 2.4.2, foram encontrados que o C-lábil é uma avaliação que tem correlação positiva e significativa com C-total, C-bm, C-AF e C-AH (Tabela 2.3), não apresentando correlação significativa apenas com a fração C-HU, justamente aquela que tem menor relação com o manejo do solo (VOLKOFF E CERRI, 1988). O C-bm e C-lábil apresentaram maiores correlações com a fração C-AF, mostrando a inter-relação entre essas formas. Enquanto a fração C-AH apresenta maior correlação com o C-AF e o C-lábil. Esses dados confirmam que as duas abordagens analíticas (C-total, C-lábil, C-bm e C-AF, C-AH, C-HU) são relacionadas e eficientes em separar formas mais lábeis e recalcitrantes do carbono do solo.

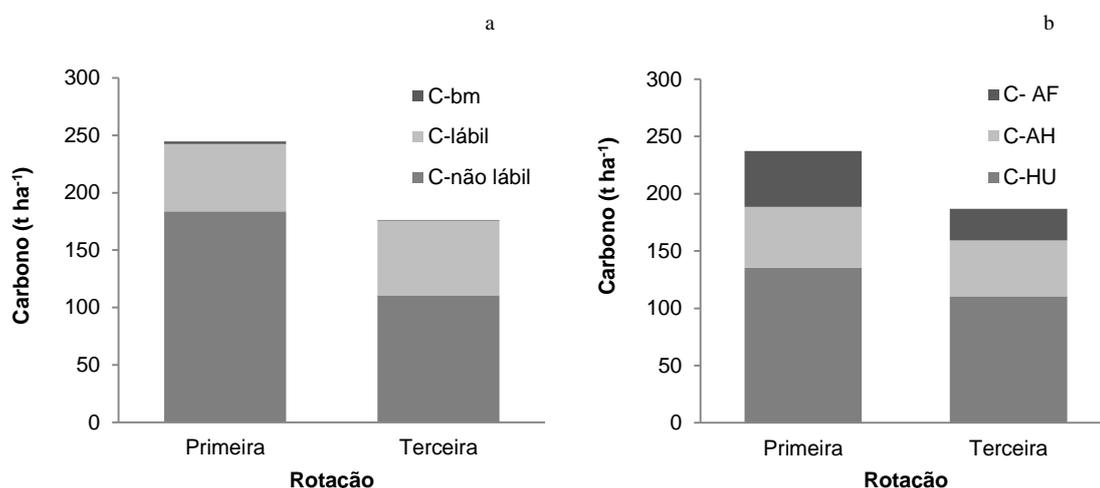
**Tabela 2.3** Coeficientes de correlação de Pearson para os teores das formas de Carbono do solo de e as frações da matéria orgânica do solo, em todas as camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

	C-total	C-bm	C-AF	C-AH	C-HU
C-lábil	0,78*	0,76*	0,75*	0,73*	ns
C-total		0,78*	0,62*	0,59*	0,79*
C-bm <sup>1</sup>			0,70*	0,53*	0,47**
C-AF				0,75*	ns
C-AH					ns

<sup>1</sup> C-bm: C biomassa microbiana, C-AF: C ácidos fúlvicos, C-AH: C ácidos húmicos; C-HU: C huminas, \* p<0,001, \*\* p<0,05 e ns: não significativo.

Os estoques de carbono total na camada de 0-80 cm, somando-se as frações C-lábil e C-não lábil (C-total – C-lábil), foram de 245 t ha<sup>-1</sup> no solo em primeira rotação e de 176 t ha<sup>-1</sup> no solo em terceira rotação de *Pinus* (Figura 2.3a). Usando o fracionamento da MOS para cálculo do estoque de C, os valores foram de 237 t ha<sup>-1</sup> e de 187 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para primeira e terceira rotação (Figura 2.3b).

As diferenças entre as rotações de *Pinus* se devem ao menor estoque de C no solo sob terceira rotação em profundidade. Nas camadas superficiais (0 - 40 cm), a diferença entre os estoques de C -total entre primeira (133 t ha<sup>-1</sup>) e terceira rotação (121 t ha<sup>-1</sup>) é de apenas 9%, já a partir de 40 cm até 80 cm, a diferença entre primeira (112 t ha<sup>-1</sup>) e terceira rotação (55 t ha<sup>-1</sup>) é maior que 100%. Como discutido anteriormente, o menor estoque de carbono na floresta em terceira rotação de *Pinus* em relação à primeira não pode ser relacionada ao *Pinus*, mas provavelmente aos teores de carbono do solo anterior à implantação das florestas.



**Figura 2.3** Estoques de carbono do solo nas frações total (C- não lábil), lábil (C-lábil), biomassa microbiana (C-bm), ácido fúlvico (C-AF), ácido humico (C-AH), humina (C-HU) até a profundidade de 80 cm as camadas do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. O C-não lábil foi obtido pela diferença entre C-total e C-lábil. Otacílio Costa, 2012.

Os estoques de carbono são de 6 a 14% menores aos encontradas por Mafra et al. (2008) em *Pinus* de 20 anos em Campo Belo (142 t ha<sup>-1</sup> de 0-40 cm) e por Fachini (2012) em *Pinus* de 21 anos em Ponte Alta (144 t ha<sup>-1</sup> de 0-40 cm), ambos no planalto sul catarinense; e de 10 a 18% menores aos encontrados por Balbinot et al. (2003) em *Pinus taeda* de 5 anos em Cambará do Sul (148 t ha<sup>-1</sup> de 0-40 cm).

## 2.5 CONCLUSÕES

O teor de C em solos de *Pinus* com diferentes tempos de uso (em primeira e terceira rotação) variou em profundidade, provavelmente, influenciado por diferenças antes do pantio de *Pinus* ou pela ciclagem do sistema radicular.

A quantidade de C em frações mais lábeis e de ciclagem mais rápida foi afetada pelo tempo de uso do solo, sendo maior em solos mais recentemente utilizados com o cultivo de *Pinus*.

Formas de C mais lábeis se convertem em formas mais estáveis com o aumento do tempo de uso do solo com *Pinus*.

## CAPÍTULO II

### 3. FORMAS DE FÓSFORO

#### 3.1 RESUMO

O fracionamento químico pode auxiliar na avaliação dinâmica dos nutrientes do solo de plantios florestais, permitindo diagnosticar o potencial de liberação de nutrientes tanto em curto, como em médio e longo prazos. Assim, para avaliar a contribuição das diferentes formas de fósforo (P), obtidas pelo fracionamento de Hedley, e o efeito de plantios sucessivos de *Pinus* na dinâmica do fósforo no solo, amostras de solo foram coletadas em florestas de *Pinus taeda*, em primeira rotação, com 17 anos, e em terceira rotação, com 16 anos de idade e 49 anos de plantio sucessivo. Em ambas as florestas, o solo foi amostrado nas camadas de 0-10 cm, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm e após seco e peneirado, foi submetido ao fracionamento químico do fósforo pela metodologia de Hedley modificada. As frações orgânicas de P são maiores na superfície do solo (40 a 60% do P total) e decrescem em profundidade (20 a 35% do P total). As frações mais lábeis (Pi-RTA, Pi-NaHCO<sub>3</sub> e, principalmente, Po-NaHCO<sub>3</sub>) foram maiores na floresta em primeira rotação, enquanto que a fração de Po NaOH foi maior na floresta em terceira rotação. As frações mais recalcitrantes de P inorgânico e P orgânico (P-NaOH e P-residual) compõem aproximadamente 92% do estoque de P total do solo na camada de 0-80 cm, indicando um solo bem intemperizado. Embora a floresta em terceira rotação apresente menor P lábil, possui grandes quantidades de formas recalcitrantes. A análise de disponibilidade de P em solos sob florestas de *Pinus* devem levar em consideração estas formas (P-NaOH) ou, pelo menos o P inorgânico e orgânico disponível por RTA e NaHCO<sub>3</sub>.

Palavras-chave: rotações florestais; plantios sucessivos; fracionamento químico de nutrientes, P orgânico.

### 3.2 INTRODUÇÃO

O manejo do solo em florestas comerciais de *Pinus* deve no mínimo manter, ou mesmo, melhorar a fertilidade do solo, principalmente daqueles com baixos teores de nutrientes, como os solos do planalto sul catarinense. Embora a exportação de nutrientes via madeira não seja tão elevada quanto para as culturas anuais, tanto a falta como a insuficiência de fertilização de solos submetidos a cultivos sucessivos podem comprometer a sua fertilidade e com isso a produtividade florestal.

Para o diagnóstico da fertilidade do solo em sistemas agrícolas de plantas anuais os teores ditos “disponíveis” são mensurados pela análise de solo. Estes teores compreendem apenas formas de fácil dessorção da fase sólida do solo, já que a disponibilidade de nutrientes para a nutrição das plantas nestes sistemas deve ser imediata. Em culturas perenes e florestais o diagnóstico da “disponibilidade” de nutrientes é mais complexo. Pelo ciclo longo há uma maior possibilidade de outras formas mais adsorvidas (ou menos lábeis) serem lentamente dessorvidas à medida que vão tamponando as formas “mais disponíveis ou lábeis” absorvidas pelas plantas, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo, como enfatizado por Beck e Sanches (1994) para solos sob pastagens perenes ou como visto por Gatiboni et al. (2007) em cultivos de solo por longo prazo sem fertilização.

Nas florestas o P considerado “disponível”, pelas análises de rotina de solo, não reflete o acúmulo deste elemento na biomassa, tampouco o montante de P ciclado anualmente (NOVAIS & SMYTH, 1999). Atribui-se, portanto, às formas menos lábeis de P inorgânico (Pi) e de P orgânico (Po) a porção de P absorvida pelas plantas. A utilização do Pi-resina ou Pi-Mehlich 1 como índice de disponibilidade de P ignora formas de P menos lábeis (BECK & SANCHES, 1994)

que poderão vir a ser disponibilizadas. Essas formas, normalmente, não são detectadas por procedimentos comuns de determinação de P disponível (TIESSEN *et al.*, 1984). Assim, uma ferramenta analítica útil para detectar a contribuição das diferentes formas de P é o fracionamento químico deste nutriente, que permite quantificar desde as suas formas mais lábeis até as mais recalcitrantes.

A técnica de fracionamento químico de P proposta por Hedley *et al.* (1982) têm sido utilizada em estudos de acúmulo e capacidade de dessorção de formas de P. A técnica consiste na utilização seqüencial de extratores de menor à maior força de extração, os quais removem fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) de formas mais disponíveis às mais estáveis,seqüencialmente e na mesma amostra de solo. As formas lábeis são extraídas com resina e  $\text{NaHCO}_3$ . As formas pouco lábeis, retidas com mais energia por óxidos Fe e Al são extraídas com NaOH. O P ligado ao Ca é extraído com HCl e, finalmente, o Pi relativamente insolúvel, associado ao P-residual (NOVAIS e SMYTH, 1999), ou recalcitrante, por digestão sulfúrica. Desta forma, através da extração sequencial de P do solo, sua labilidade (ou disponibilidade) pode ser compreendida, basicamente, em três diferentes compartimentos: Lábil (Pi-resina e Pi e Po- $\text{NaHCO}_3$ ), moderadamente lábil (Pi e Po-NaOH) e não lábil (Pi-HCl e o P-residual).

Nossa hipótese é que o manejo do solo sem fertilização vem modificando as formas de fósforo do solo, inclusive formas menos lábeis não quantificadas pelos extratores de rotina. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar as modificações nas formas de fósforo do solo provocadas pelo cultivo sucessivo de *Pinus*.

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em solos sob povoamentos de *Pinus taeda* com 16 anos de idade e em primeira rotação e de *Pinus taeda* com 17 anos em terceira rotação, nesta totalizando 49 anos de cultivo, conforme descrito no Capítulo I, deste trabalho.

#### 3.3.1 Análises do solo.

O fracionamento químico de fósforo foi realizado conforme proposto por Hedley et al. (1982), com modificações propostas por Condon et al. (1985) e Gatiboni (2003), porém eliminando-se uma extração com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> proposta pelos autores, conforme descrito a seguir: Amostras de 0,5 g solo seco tiveram o P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraído, seqüencialmente, com resina trocadora de ânions em esferas (fração Pi-RTA), NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (frações Pi-NaHCO<sub>3</sub> e Po-NaHCO<sub>3</sub>), NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> +sonificação (frações Pi-NaOH e Po-NaOH) e HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (fração Pi-HCl). Após as extrações anteriores, o solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub> (fração P-residual), conforme descrito em Brookes & Powson (1981). O fósforo dos extratos foi determinado segundo a metodologia de Murphy & Riley (1962). Nos extratos alcalinos, foi determinado o fósforo total por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave (USEPA, 1971), sendo o Po (Po-NaHCO<sub>3</sub> e Po-NaOH) obtido pela diferença entre fósforo total e o fósforo inorgânico.

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo para cada camada do solo realizado um teste t simples pareado. Utilizou-se o pacote estatístico SAS.

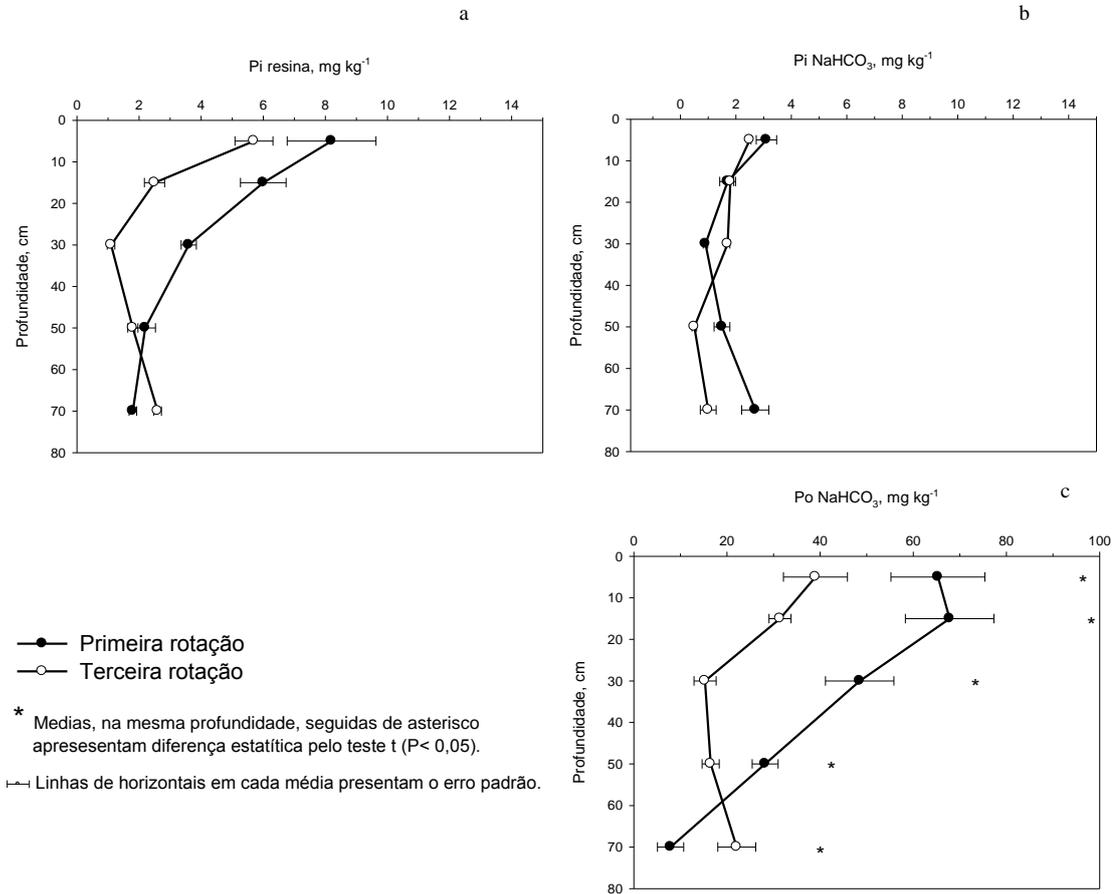
### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de P extraídos pelos dois primeiros extratores do fracionamento químico (resina trocadora de ânions - RTA e bicarbonato de sódio -  $\text{NaHCO}_3$ ) desorvem do solo formas consideradas mais lábeis (FIGURA 3.1). Estas formas representam uma pequena porção do P-total do solo, mas contribuem ativamente no suprimento de P às plantas, sendo o P absorvido rapidamente tamponado por elas (CROSS & SCHLESSINGER, 1995; GATIBONI et al., 2007). Nas três primeiras camadas do solo (0-10 cm, 10-20 e 20-40 cm), pode-se observar uma pequena diferença, de 2 a 4  $\text{mg kg}^{-1}$  de P inorgânico, extraído pela RTA entre as florestas de *Pinus*, entretanto esta diferença não foi considerada significativa pelo teste t, possivelmente pelos baixos teores e alta variação apresentados.

A fração inorgânica ( $\text{P}_i$ ) extraída por  $\text{NaHCO}_3$ , considerada como uma continuidade da fração  $\text{P}_i$ -RTA, devido à semelhança da labilidade (Gatiboni et al., 2007), também não foi diferenciada entre as florestas em primeira e terceira rotação de *Pinus*. Por outro lado, a fração de P orgânico ( $\text{P}_o$ ) quantificada por este extrator apresentou teores altos de fósforo, da ordem aproximada de 10 vezes os teores encontrados na fração  $\text{P}_i$ -RTA, indicando que há uma grande reserva de P na forma orgânica lábil nesses solos sob floresta. Em segundo lugar, foi detectado decréscimo significativo de P orgânico no solo em terceira rotação em relação ao em primeira rotação, indicando que pode ter ocorrido a mineralização de fósforo orgânico lábil nas camadas até 60 cm de profundidade.

Ao se considerar apenas essas frações de P, pode-se inferir que principalmente o  $\text{P}_o$ - $\text{NaHCO}_3$  tampona o P exportado pela floresta e que este  $\text{P}_o$  seria absorvido pelas plantas, ou readsorvido pelo solo (neste caso, na fração  $\text{P}_i$ - $\text{NaHCO}_3$ ). Contudo, como a dinâmica de mineralização-adsorção provavelmente

envolva a interação com sítios de adsorção mais fortes no solo, as outras frações do fracionamento precisam ser avaliadas.

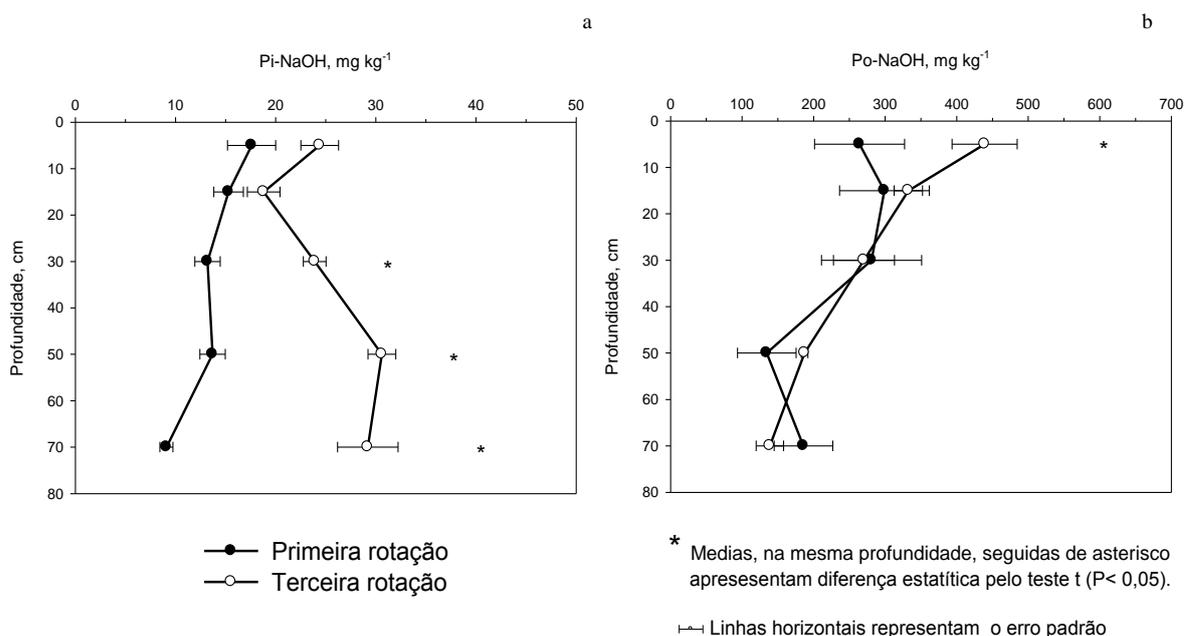


**Figura 3.1** Teores médios de fósforo inorgânico lábil extraído por resina trocadora de ânions (Pi-RTA), fósforo inorgânico lábil extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Pi-NaHCO<sub>3</sub>) e fósforo orgânico lábil extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Po-NaHCO<sub>3</sub>) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Uma evidência de que o Po mineralizado da fração Po-NaHCO<sub>3</sub> possa ter sido readsorvido ao solo é mostrada na Figura 3.2a, onde são expostos os teores de P inorgânico quantificados pelo extrator NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> + sonificação (Pi-NaOH). A este extrator é atribuído o poder de extrair P inorgânico de média energia de ligação aos minerais silicatados e oxi-hidróxidos de Fe e Al do solo (Cross &

Schlessinger, 1995) e, portanto, nesta fração seria quantificada parte do P readsorvido ao solo com média energia de ligação, ou seja, moderadamente lábil. De fato, a Figura 3.2a mostra um aumento de Pi nesta fração no solo sob terceira rotação em relação ao em primeira rotação, principalmente nas camadas mais profundas, indicando que esta fração atua como um “dreno de P”, segundo a terminologia sugerida por Novais & Smith (1999).

O fósforo orgânico quantificado pelo extrator NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> + sonificação (Po-NaOH) foi bastante variável (alto desvio das repetições) sendo observado acúmulo desta forma de P apenas na camada superficial do solo (0-10 cm) no solo sob terceira rotação em relação ao em primeira rotação de *Pinus* (FIGURA 3.2b).

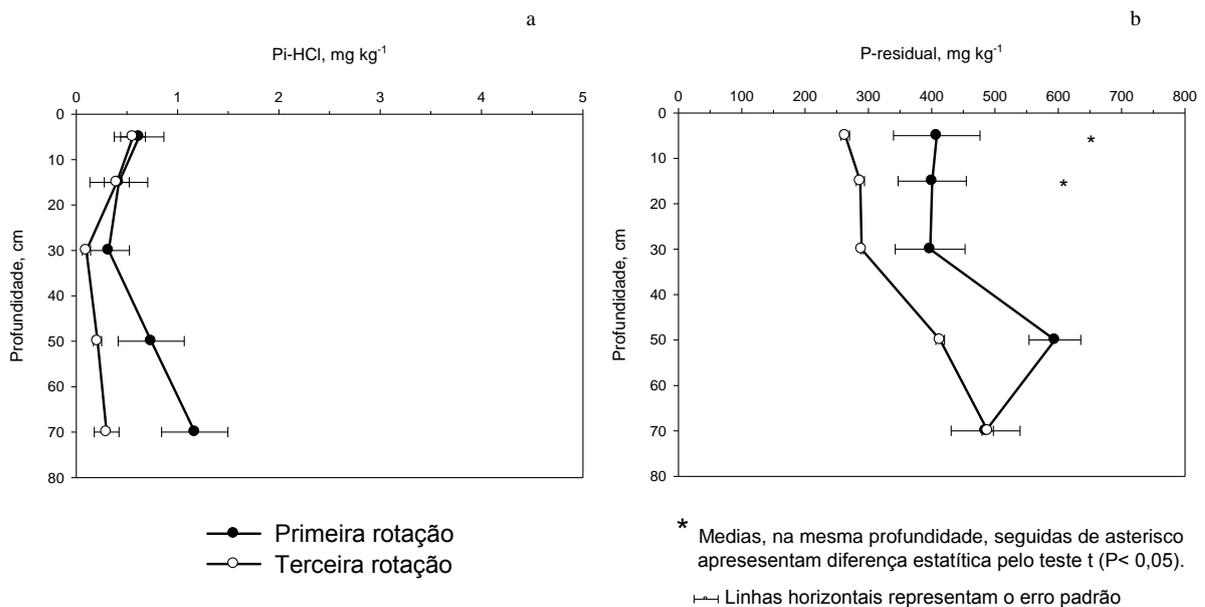


**Figura 3. 2** Teores médios de fósforo inorgânico moderadamente lábil (Pi-NaOH) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-NaOH) extraídos por NaOH 0,5 mol l<sup>-1</sup> do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Essa fração de Po normalmente é associada a formas de carbono menos lábeis do solo, como nas camadas abaixo de 10 cm de profundidade não foi

observada diferença entre as florestas estudadas, o que pode estar atrelado ao maior conteúdo de ácido húmico nestas camadas do solo em terceira rotação (Capítulo 1).

A fração Pi-HCl (Figura 3.3a) apresentou valores de P extraído muito baixos, menores que  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , em todas as profundidades de ambas as florestas. Esse extrator normalmente é apto para dissolver minerais apatíticos e os baixos teores encontrados mostram que este solo não tem minerais primários, tampouco recebeu adubação com fosfatos de cálcio, e o resultado reflete a baixa quantidade de cálcio existente neste solo.



**Figura 3.3** Teores médios de fósforo inorgânico não lábil extraído por HCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  (Pi-HCl) e fósforo residual extraído pela digestão do solo remanescente do fracionamento com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  (P-residual) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Os teores de fósforo residual foram diferentes entre primeira e terceira rotação de *Pinus* nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm (Figura 3.3b). Esta diferença entre as florestas, embora não seja significativa, mantém-se até a camada de 40 a 60 cm. Pode-se inferir sobre o consumo destas formas com o cultivo sucessivo de *Pinus* já que as formas mais recalcitrantes de P podem agir como fonte de P em sistemas com balanço negativo de fósforo (Guo & Yost, 1998; Gatiboni et al., 2007). Contudo, ressalta-se que os teores quantificados (260 a 600 mg kg<sup>-1</sup>) e o desvio da média foram altos para essa fração; assim, esta variabilidade, numa escala tão grande de teores de P, dificulta a interpretação segura de tais resultados quantitativamente. Gatiboni (2003) reportou que a fração residual do fracionamento de Hedley tem um maior coeficiente de variação em função da acumulação dos erros em função da grande manipulação das amostras durante a extração sucessiva das frações mais lábeis anteriormente na mesma amostra. O autor mostrou, além disso, que o somatório das formas do fracionamento recuperou em torno de 90% do fósforo total do solo (obtido por digestão de uma amostra não fracionada).

Em termos percentuais, em todas as profundidades ou tempos de uso florestal, as principais formas de P no solo são as formas recalcitrantes (P residual) e orgânicas moderadamente lábeis (Po-NaOH), que juntas representaram de 87 a 97% do fósforo total extraído no fracionamento (Tabela 3.1). Isso mostra que se trata de um solo intemperizado onde em uma escala de caráter fonte/dreno de P (Novais & Smith, 1999), o solo se encontra com um caráter “dreno de P”, onde não há mais quantidades importantes de minerais primários liberadores de fósforo, caráter esse atestado pelas insignificantes quantidades de P extraídas na fração Pi-HCl, de apenas 0,0 a 0,2 % do fósforo total (Tabela 3.1). Por outro lado, os teores de fósforo em formas inorgânicas lábeis foram muito baixos (< 1,1 % na primeira rotação e

< 0,7 % na terceira rotação). Na mesma magnitude, Pi-NaHCO<sub>3</sub> representou menos de 04 % do fósforo total extraído pelo fracionamento nos solos estudados. Assim, embora Pi-NaHCO<sub>3</sub> possa ser considerado como uma forma quase tão lábil quanto Pi-RTA, ele representa um adicional de P entre 30 e 50 % do Pi-RTA nas camadas até 20 cm de profundidade e ambas formas somadas, continuam representando uma baixa disponibilidade de fósforo no solo para as plantas. Bizuti (2011) também encontrou em toposequências de floresta Ombrófila Densa, restinga e pastagem no Rio de Janeiro valores baixos, sendo em média 1 % a 2 % do P total em Pi-RTA, 0 % a 2 % para Pi-NaHCO<sub>3</sub> e 3 % a 6 % para Po-NaHCO<sub>3</sub>. Apenas para situar a disponibilidade de P dentro de uma escala prática, os teores de P nos solos deste estudo, extraídos pelo método Mehlich1, ficaram em torno de 40 % dos valores extraídos de Pi-RTA (Anexo VI - I), o que representaria teores de 3,7 mg kg<sup>-1</sup> (primeira rotação) e 2,7 mg kg<sup>-1</sup> (terceira rotação de *Pinus*). Esses teores são classificados, respectivamente, como “baixo” e “muito baixo” pela CQFS-RS/SC (2004).

O fósforo orgânico lábil (Pi-NaHCO<sub>3</sub>) representa aproximadamente 8,5% do P total do fracionamento na camada superficial (0-20cm) na primeira e 4,8% na terceira rotação de *Pinus*, correspondendo a 65 e 35 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Na média de todas as profundidades, o Po desta fração foi de aproximadamente 10 vezes os teores na fração Pi-RTA, mostrando-se uma importante forma de armazenamento de fósforo no solo e que, desde que mineralizada pela biomassa microbiana do solo, pode auxiliar na disponibilidade de P para as plantas.

Na Tabela 3.2 pode ser observada a partição de fósforo do fracionamento em formas orgânicas (Po-NaHCO<sub>3</sub>+ Po-NaOH) e formas inorgânicas (Pi-RTA + Pi-NaHCO<sub>3</sub>+ Pi-NaOH + Pi-HCl + P-residual). No solo em primeira rotação, na camada

até 40 cm de profundidade, as formas inorgânicas representam em média 55% do fósforo total do solo. Já nas camadas mais profundas (40-60 e 60-80 cm), pelo menor teor de matéria orgânica, é aumentado o acúmulo relativo de P em formas inorgânicas para aproximadamente 75%. Na floresta em terceira rotação foi observado menor percentual de Pi até os 60 cm de profundidade em relação à primeira rotação e, conseqüentemente, maior proporção relativa de Po. Isso indica que no balanço de todas as formas, comparando primeira e terceira rotação, ainda as formas inorgânicas diminuíram mais que as orgânicas, principalmente pela grande diferença entre primeira e terceira rotação observada na fração P-residual (Figura 3.3b).

**Tabela 3.1** Teores de fósforo nas diferentes formas do fracionamento de Hedley e somatório dos teores de P extraídos do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Prof.	Pi - RTA	Pi - NaHCO <sub>3</sub>	Po - NaHCO <sub>3</sub>	Pi - NaOH	Po - NaOH	Pi - HCl	P residual	Somatório
cm	----- mg kg <sup>-1</sup> -----							
<b><i>Pinus</i> em primeira rotação</b>								
<b>0-10</b>	8,2(1,1) <sup>1</sup>	3,1(0,4)	65,3(8,5)	17,6(2,3)	264,2(34,4)	0,6 (0,1)	408,1(53,2)	767,1 (100)
<b>10-20</b>	6,0(0,8)	1,7(0,2)	67,8(8,6)	15,3(1,9)	299,0 (37,8)	0,4 (0,1)	400,8(50,7)	791,0 (100)
<b>20-40</b>	3,6(0,5)	0,9(0,1)	48,5(6,5)	13,2(1,8)	281,1(37,8)	0,3 (0,0)	397,7(53,4)	745,3 (100)
<b>40-60</b>	2,2(0,3)	1,5(0,2)	28,2(3,6)	13,7(1,8)	134,6(17,4)	0,7 (0,1)	594,6(76,7)	775,5 (100)
<b>60-80</b>	1,8(0,3)	2,7(0,4)	7,9(1,1)	9,1(1,3)	185,8(26,8)	1,2 (0,2)	485,2(69,9)	693,7(100)
<b><i>Pinus</i> em terceira rotação</b>								
<b>0-10</b>	5,7(0,7)	2,5(0,3)	39(5,0)	24,4(3,1)	439,1(56,7)	0,6(0,1)	263,6(34,0)	774,9 (100)
<b>10-20</b>	2,5(0,4)	1,8(0,3)	31,4(4,7)	18,8(2,8)	332,4(49,3)	0,4(0,1)	287,4(42,6)	674,7(100)
<b>20-40</b>	1,1(0,2)	1,7(0,3)	15,3(2,5)	23,9(4,0)	270,4(44,9)	0,1(0,0)	289,6(48,1)	602,1(100)
<b>40-60</b>	1,8(0,3)	0,5(0,1)	16,5(2,5)	30,6(4,7)	187,4(28,8)	0,2(0,0)	413,4(63,6)	650,4 (100)
<b>60-80</b>	2,6(0,4)	1,0 (0,1)	22,1(3,2)	29,2(4,3)	138,8(20,3)	0,3(0,0)	488,5(71,6)	682,5(100)

<sup>1</sup> Valores entre parênteses representam o percentual de P em relação ao somatório de todas frações avaliadas.

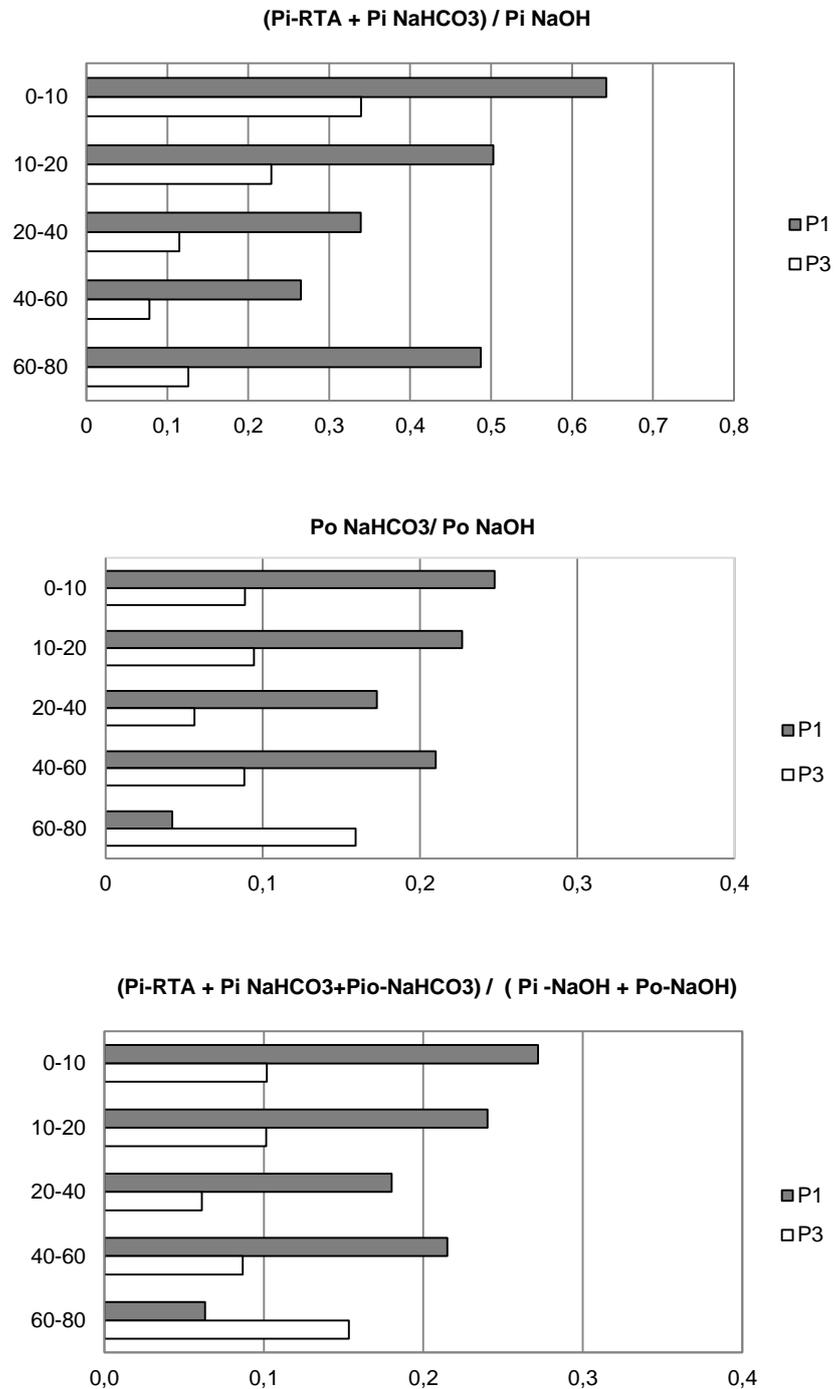
**Tabela 3.2** Soma das frações de fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Prof	<i>Pinus</i> em primeira rotação		<i>Pinus</i> em terceira rotação	
	Pi	Po	Pi	Po
cm	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>0-10</b>	437,6(57,0) <sup>1</sup>	329,5(43,0)	296,8(38,3)	478,1(61,7)
<b>10-20</b>	424,2(53,6)	366,8(46,4)	310,9(46,1)	363,8(53,9)
<b>20-40</b>	415,7(55,8)	329,6(44,2)	316,4(52,5)	285,7(47,5)
<b>40-60</b>	612,7(79,0)	162,8(21,0)	446,5(68,7)	203,9(31,3)
<b>60-80</b>	500,0(72,1)	193,7(27,9)	521,6(76,4)	160,9(23,6)

<sup>1</sup> Valores entre parênteses representam o percentual de P na fração em relação ao somatório de todas frações avaliadas.

A razão entre as formas inorgânicas lábeis (Pi-RTA + Pi-NaHCO<sub>3</sub>) e moderadamente lábeis (Pi-NaOH) pode indicar o balanço entre estas formas de P e a dinâmica envolvendo estas formas que teoricamente são as mais sensíveis ao manejo. Pela Figura 3.4a, pode ser constatado que da primeira para a terceira rotação a proporção de formas inorgânicas lábeis diminui em relação à moderadamente lábil, exceto para a profundidade de 60-80 cm, indicando consumo das inorgânicas lábeis. Da mesma forma, as formas orgânicas lábeis diminuem em relação às moderadamente lábeis da primeira para a terceira rotação (Figura 3.4b), exceto na última camada de solo. Como previsto, na relação total (Pi + Po) entre as formas lábeis e moderadamente lábeis, o comportamento foi similar à relação delas considerando Pi e Po separadamente. Supondo a existência de um contínuo temporal entre primeira e terceira rotação, haveria um comportamento de “diminuição” das formas iniciais do fracionamento com o uso florestal, indicando um consumo das formas lábeis, inorgânicas e orgânicas e/ou um aumento de P em formas moderadamente lábeis. No caso dos solos estudados, ambos os fenômenos estão ocorrendo concomitantemente. Outro fator que parece relevante é a não

utilização de fósforo da camada de 60-80cm, indicando que o suporte nutricional em fósforo das plantas neste solo deve ocorrer até 60 cm.



**Figura 3.4** Relação entre frações de Pi e Po lábeis (extraídas por RTA e NaHCO<sub>3</sub>) e moderadamente lábeis (extraídas por NaOH) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

A partir dos dados de densidade do solo, foram calculados os estoques de fósforo, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , para as diferentes formas de fósforo (Figura 3.5a). Os estoques de P na camada de 0-80 cm (Figura 3.5a) mostram da primeira para a terceira rotação as frações  $\text{Pi-RTA}$ ,  $\text{Pi-NaHCO}_3$ ,  $\text{Po-NaHCO}_3$ ,  $\text{Pi-HCl}$  e P-residual tiveram menores estoques na terceira rotação, com uma diferença de estoques em 10,5, 4,4, 129,2, 3,4 e  $722,8 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, respectivamente. De outro lado, a fração  $\text{Pi-NaOH}$  e  $\text{Po-NaOH}$  foi maior no *Pinus* em terceira rotação em  $103,1 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{Pi-NaOH}$  e  $198 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{Po-NaOH}$ . A diferença total de P entre primeira e terceira rotação, em todo o perfil do solo, foi de  $556,4 \text{ kg ha}^{-1}$ , principalmente devidas à fração P-residual.

Embora a fração P-residual possa atuar como fonte de P em solos com balanço negativo do nutriente (Guo & Yost, 1998; Gatiboni et al., 2007), a variabilidade dos dados e entre as florestas em comparação (embora sejam áreas muito próximas e similares) prejudicaram o uso do P-residual em termos quantitativos nos cálculos de diferença de estoque entre as florestas. Esta fração não demonstra os efeitos do cultivo sucessivo de *Pinus* das áreas de estudo, já que entre as mesmas há uma diferença de  $722 \text{ kg ha}^{-1}$  de P-residual, muito acima do que um manejo de retirada de lenho e casca exporta em três cultivos, aproximadamente  $107 \text{ kg ha}^{-1}$  de P (Gonçalves, 2009). Portanto, seria um erro considerar a fração P-residual em cálculos de balanço, devendo-se atentar apenas para o fenômeno de esta fração atuar no tamponamento das frações mais lábeis de fósforo.

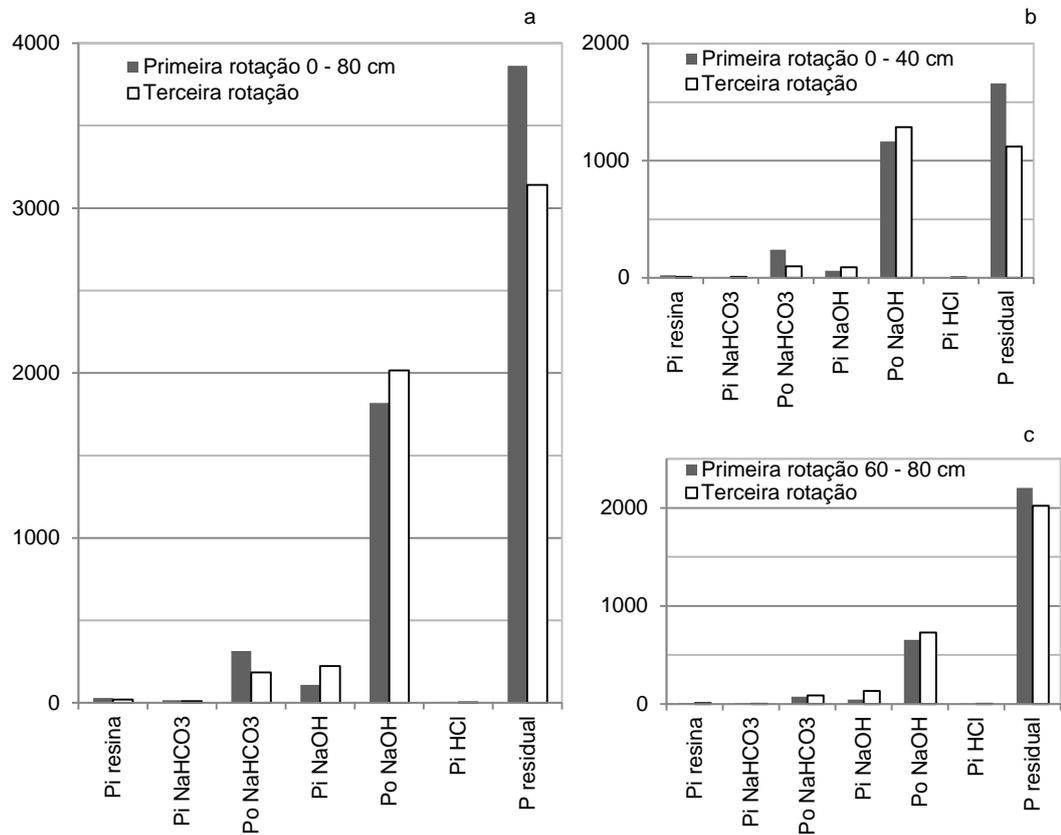
Contudo, se for excluída a fração de P-residual, a diferença entre terceira e primeira rotação de *Pinus* fica em  $166,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, o que é mais próximo da magnitude real esperada. Assim, considerando apenas as formas de P extraídas com RTA,  $\text{NaHCO}_3$  e NaOH, observamos que a fração  $\text{Pi-NaOH}$  é um dreno de P, a fração  $\text{Po-NaOH}$  tem baixa taxa de mineralização e as frações RTA e  $\text{NaHCO}_3$

parecem mais ativas, principalmente Po-NaHCO<sub>3</sub>, especialmente a nas camadas superficiais (0 - 40 cm, Figura 3.5b) em relação às camadas mais profundas do solo (40 - 80 cm, Figura 3.5c).

Os resultados deste trabalho mostram que o tempo de uso florestal causam modificações em formas de fósforo do solo além daquelas normalmente quantificadas pelos extratores de rotina, como o Mehlich 1. A utilização do Pi-resina ou Pi-Mehlich 1 como índice de disponibilidade de P ignora outras formas de P menos disponíveis (BECK & SANCHES, 1994) que poderão vir a ser disponibilizadas em culturas de ciclo longo e essas formas, normalmente, não são detectadas por procedimentos comuns de determinação de P disponível (TIESSEN et al., 1984).

Richter et al. (2006), em experimentos de longa duração em florestas de *Pinus taeda* em Calhoun na Carolina do Sul, EUA, observaram que o P mais lábil do fracionamento Hedley (Pi-RTA mais Po-NaHCO<sub>3</sub> e Pi-NaHCO<sub>3</sub>) demonstraram comportamento não muito diferente do P extraído por Mehlich 3 (este extrator extrai formas de Po e Pi) ao longo do tempo. O Pi-RTA não diferiu ao longo dos anos de 1962 e 1990, mas houve uma diminuição significativa de Po-NaHCO<sub>3</sub> na camada superficial (0-7,5 cm) e aumento significativo do Pi-NaHCO<sub>3</sub>. A principal conclusão a retirar das mudanças nas frações mais lábeis de P no solo, segundo Richter et al. (2006), é que embora grandes transferências relativas de P do solo mineral para a biomassa florestal e serapilheira, as frações lábeis de P se mantiveram inalteradas (Pi-RTA), levemente diminuídas (Po- NaHCO<sub>3</sub>) ou mesmo aumentadas (Pi-NaHCO<sub>3</sub>) durante várias décadas de desenvolvimento florestal. Assim, segundo os autores, a remoção do P durante as décadas foi igualada ou superada pela entrada de outras formas de P, de menor labilidade. Estes resultados levaram os autores à

hipótese de que frações de P com ciclo mais lento supririam não só as necessidades de P para o crescimento das árvores da floresta, mas também tamponariam contra retiradas das frações lábeis.



**Figura 3.5** Estoques de fósforo nas camadas de 0 - 80 cm (a), 0 - 40 cm (b) e 40 - 60 cm (c) das frações de fósforo do solo, exceto a fração P-residual, em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

Neste trabalho foi visto que frações orgânicas lábeis de fósforo podem ter um papel importante na liberação de fósforo para o sistema, inclusive de frações de alta recalitrância. Desta maneira, parece que o solo submetido ao stress do cultivo sem fertilização, é forçado à liberação de formas menos lábeis de Pi ou mineralização de Po, porém parte deste fósforo acaba por ser readsorvido pelo próprio solo, como nas frações Pi-NaOH ou inclusive nas próprias frações lábeis (Pi-

RTA e  $\text{Pi-NaHCO}_3$ ). Se isso acontecer, a readsorção de P mascara o efeito da depleção, ou seja, após o cultivo, a diminuição nos teores lábeis é baixa (porque eles foram repostos). Para contornar isso, a disponibilidade de fósforo nestes sistemas florestais deveria levar em consideração, no mínimo, as formas disponíveis por RTA e também as extraídas por  $\text{NaHCO}_3$ , principalmente o fósforo orgânico desta última.

## 2.1 CONCLUSÕES

As principais formas de acúmulo de fósforo nos solos estudados, que juntas perfazeram mais de 92% do fósforo total, foram as frações P-residual e Po-NaOH, que são as formas inorgânicas e orgânicas de maior recalcitrância no esquema de fracionamento utilizado.

A fração Pi e Po-NaOH apresentaram maior teor e estoque no solo em terceira rotação, quando comparado ao solo em primeira rotação de *Pinus*, enquanto as formas  $\text{Pi-NaHCO}_3$  foram menores no solo em terceira rotação, quando comparados ao em primeira rotação.

Apesar de valores absolutos menores no solo em terceira rotação, as frações Pi-RTA,  $\text{Pi-NaHCO}_3$ , Po-NaOH e Pi-HCl não diferiram entre as rotações de *Pinus*.

Nos solos estudados, a análise da disponibilidade de P deve levar em consideração pelo menos os teores de P inorgânico e orgânico disponíveis por RTA e  $\text{NaHCO}_3$ .

## CAPÍTULO III

### 4. FORMAS DE POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO DO SOLO

#### 4.1 RESUMO

Em florestas, devido ao ciclo longo, os teores ditos disponíveis de potássio, cálcio e magnésio podem não ser adequados para o diagnóstico de disponibilidade de nutrientes, já que formas menos lábeis poderão ser disponibilizadas às plantas com o tempo. Com o objetivo de verificar os teores e estoques de formas trocáveis e não-trocáveis de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em florestas de *Pinus taeda* em primeira rotação (com 17 anos) e em terceira rotação (com 49 anos de cultivo sucessivo com *Pinus*). Foram coletadas amostras de um Cambissolo húmico nas profundidades de 0-10 cm, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, em seis trincheiras por floresta. Foram determinados os teores de K, Ca e Mg trocáveis, K não-trocável e K, Ca e Mg semi-totais. A floresta há mais tempo cultivada com *Pinus taeda* apresentou menores teores e estoques de K, Ca e Mg trocáveis e de K e Ca não-trocáveis. As reservas de K e Mg em formas não-trocáveis são elevadas nos solos estudados, enquanto os estoques de Ca trocável e não-trocável são extremamente baixos em ambos os solos estudados. Para diagnóstico das modificações nos teores de potássio do solo com usos de longo prazo, a análise deve envolver a quantificação de formas trocáveis e não-trocáveis, pois ambas são responsáveis pelo suprimento de K às plantas.

**Palavras-Chave:** rotações florestais; fracionamento químico de nutrientes; K, Ca e Mg trocável; K não trocável. K, Ca e Mg totais e semitotais do solo.

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Na fertilidade do solo, os teores disponíveis ou trocáveis são aceitos e comumente usados como índice de disponibilidade de nutrientes, no entanto outras formas poderão contribuir com a nutrição das plantas. A negligência das formas de disponibilização mais lenta se deve, provavelmente, ao desenvolvimento da área da fertilidade do solo baseada principalmente em culturas anuais, de ciclo curto, que precisam uma alta disponibilidade de nutrientes em um curto intervalo de tempo. É por esta razão que, em cultivos florestais, a interpretação dos resultados de teores disponíveis da análise de solo podese imprecisa para diagnosticar a disponibilidade dos nutrientes às plantas de ciclo longo como as florestas. Por essa causa, mesmo com o plantio sucessivo de uma mesma espécie florestal, com a exportação e eventual não reposição de nutrientes, torna-se difícil verificar a redução da fertilidade do solo através da análise de solo pelos métodos tradicionais e isso pode ser devido ao reabastecimento dessas formas pelas não-trocáveis.

No caso do K, as formas trocáveis são extraídas com acetato de amônio ( $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  pH 7) e o K da solução do solo por cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), em ambos os métodos padrões, os teores são consideradas prontamente disponíveis (TISDALE et al., 1993; NACHTIGALL & VAHL, 1991). O extrator Mehlich 1, usado como método oficial no estado de Santa Catarina, extrai quantidades de K semelhantes ao K trocável, sendo normalmente denominado como “K disponível por Mehlich 1” (CQFS-RS/SC, 2004). Já as formas lentamente disponíveis (K não-trocável) são extraídas com ácido nítrico fervente ( $\text{HNO}_3$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ ), de cujos teores devem ser diminuídos a forma trocável, já que o extrator quantifica ambas (USEPA, 1998; MELO et al., 1995, MIELNICZUK, 1977;) . Essa metodologia provoca a decomposição parcial dos argilominerais do solo por dissolução ácida, quantificando,

teoricamente, formas de K que poderiam ser liberadas para a solução do solo durante a intemperização das argilas silicatadas contendo K em sua estrutura (TISDALE et al., 1993; NACHTIGALL & VAHL, 1991; MIELNICZUK, 1977; USEPA, 1998; MELO et al., 1995). Já o K total do solo somente pode ser quantificado após a decomposição total da matriz mineral do solo, o que demanda o uso de ácido fluorídrico. Devido à periculosidade e dificuldade de uso deste reagente, alternativamente tem sido quantificado o K semi-total pela digestão da amostra com água régia ( $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ ), que extrai valores próximos dos teores totais (USEPA, 1998).

Para o caso de cálcio e magnésio, as formas trocáveis são extraídas por KCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , o qual provoca o deslocamento destes cátions do complexo de troca (TEDESCO et al., 1995). As formas não trocáveis podem ser obtidas, semelhantemente ao K total, pela digestão com ácido fluorídrico, que pode ser substituído por água régia, fornecendo teores denominados semi-totais.

Alguns autores têm utilizado balanços hipotéticos de nutrientes obtidos a partir da quantificação de teores trocáveis e totais para avaliar o número potencial de rotações florestais que um sítio suportaria, simulando diferentes cenários conforme o manejo e a exportação de biomassa florestal. Gonçalves et al. (2009) encontraram para um Cambissolo, também em Otacílio Costa, estoques de  $351 \text{ kg ha}^{-1}$  de K,  $636 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca e  $99 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg trocáveis (extraídos por resina) na camada de 0-100 cm do solo. As exportações com a colheita de *Pinus taeda* ficaram entre 85 a  $142 \text{ kg ha}^{-1}$  de K, 91 a  $166 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca e de 31 a  $51 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg, conforme o tipo de biomassa exportado (lenho, casca, galhos e acículas). Assim, os autores estimaram entre 2 a 5 as rotações potenciais de 16 anos com *Pinus taeda* para o K, de 4 a 8 para o Ca e de 2 a 5 rotações para o Mg.

Embora útil, a utilização de estoques de nutrientes disponíveis (ou trocáveis) do solo na avaliação da sustentabilidade da fertilidade do solo, não incluiu a importante contribuição das demais frações na nutrição das espécies arbóreas.

A quantificação dos teores e estoques de diferentes formas de K, Ca e Mg pode auxiliar na avaliação do estado de fertilidade do solo florestal em curto, médio e longo prazo. O objetivo deste trabalho é quantificar os teores e estoques de formas trocáveis e não-trocáveis de K, Ca e Mg em solos sob *Pinus* em primeira e terceira rotação.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em solos sob povoamentos de *Pinus taeda* com 16 anos de idade e em primeira rotação e de *Pinus taeda* com 17 anos em terceira rotação, nesta totalizando 49 anos de cultivo, conforme descrito no Capítulo I, deste trabalho.

### 4.1.1 Análises do solo

O potássio trocável, fração K-NH<sub>4</sub>OAc., foi extraído com acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup> pH 7,0 (MIELNICZUK, 1978) e o potássio disponível com o extrator Mehlich1 (TEDESCO et al., 1995), ambos em relação solo:solução de 1:10, com 5 minutos de agitação em agitador orbital (60 rpm) e repouso por 16 horas antes da retirada de alíquota para quantificação.

Para a extração do potássio com ácido nítrico, fração K-HNO<sub>3</sub>, utilizou-se o método descrito por Knudsen et al. (1982), onde amostras de 2,5 g de solo foram

adicionadas com 25 mL de  $\text{HNO}_3$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  e submetidas à fervura por 5 minutos. Após, as amostras foram filtradas com filtro quantitativo faixa azul e completadas para 100 mL em balão volumétrico e retirada uma alíquota para quantificação. O cálcio e magnésio trocáveis (frações Ca-KCl e Mg-KCl) foram extraídos com solução de KCl 1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  em relação solo:solução de 1:20, com agitação por 120 minutos de agitação em agitador orbital (60 rpm) e repouso por 16 horas antes da retirada de alíquota para quantificação (TEDESCO et al., 1995).

As frações semi-totais de K-( $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ ), Ca-( $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ ) e Mg-( $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ ), foram extraídas por digestão nitro-perclórica com água régia na proporção de 1:3 de  $\text{HNO}_3:\text{HCl}$  (método USEPA 3050B). Após a digestão em bloco digestor, as amostras foram filtradas com filtro quantitativo faixa azul e completadas para 100 mL em balão volumétrico e retirada uma alíquota para quantificação (USEPA, 1998). A quantificação do potássio das alíquotas foi realizada em espectrofotômetro de emissão de chama, marca Digimed DM-31, e a quantificação do cálcio e magnésio foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (equipamento Perking-Elmer Analyst 100).

Para as estimativas do K-não trocável, a fração de K- trocável deve ser subtraída dos teores de K- $\text{HNO}_3$ . Para as estimativas do K-estrutural devem ser subtraídas as frações trocáveis e não-trocáveis dos teores extraídos por  $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ .

Para cálculo dos estoques de K, Ca e Mg em cada fração, os teores dos nutrientes, em  $\text{mg kg}^{-1}$ , foram convertidos para a unidade  $\text{kg ha}^{-1}$ , calculando o volume de solo por hectare em cada camada e multiplicando pela densidade aparente do solo de cada camada (Anexo II). Como as análises de K, Ca e Mg não foram realizadas de forma sequencial na mesma amostra de solo, cada extrator químico com maior capacidade de extração também extraia a(s) fração(ões) mais

lábil(eis). Assim, para o estoque de K não-trocável, do estoque calculado para K-HNO<sub>3</sub> foi descontado o K-NH<sub>4</sub>OAc., para o estoque de K estrutural foram subtraídos do K-HNO<sub>3</sub>+HCl, os estoques de K trocável e K não-trocável. Para o cálculo dos estoques de cálcio e magnésio não-trocáveis, foram subtraídos dos valores de estoques calculado através dos teores Ca-HNO<sub>3</sub>+HCl e Mg-HNO<sub>3</sub>+HCl, os estoques de cálcio e magnésio trocáveis calculados previamente.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, à análise de variância, sendo realizado dentro cada de sítio um teste t simples pareado por camada do solo. Utilizou-se o pacote estatístico SAS.

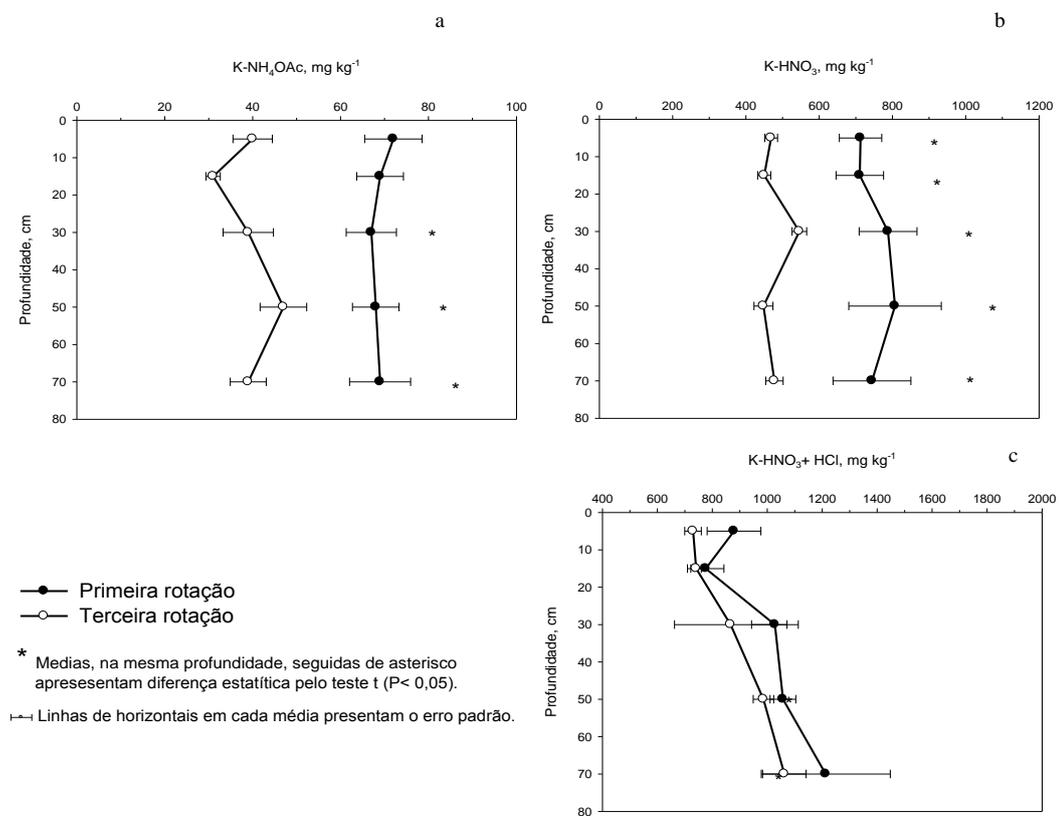
## 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.4.1 Formas e estoques de Potássio no solo

Em ambas as florestas, os teores de K trocável (K-NH<sub>4</sub>OAc.) foram semelhantes entre as camadas do solo (de 0 a 80 cm de profundidade), mas diferentes entre as rotações de *Pinus*. Na primeira rotação, os teores de K-NH<sub>4</sub>OAc. médios foram de 68 mg kg<sup>-1</sup> (0-80cm) e, na terceira rotação, de 39 mg kg<sup>-1</sup> (0-80cm) (Figura 4.1a). Estes valores são, respectivamente, classificados como “teor médio” e “teor muito baixo”, pela CQFS-RS/SC (2004), considerando a relação entre o K-NH<sub>4</sub>OAc. e o K-Mehlich 1, índice usado pela CQFS-RS/SC (2004), calculada (Anexo VI - II). Os menores teores na terceira rotação podem indicar uma diminuição de K-trocável com as rotações de *Pinus* e, como os teores foram semelhantes entre as camadas do solo, pode-se inferir que, a absorção de K pelas plantas pode não estar concentrada somente na camada superficial, mas distribuída pelo perfil do solo, (Figura 4.1b). Diferentemente do encontrado por Mafra et al., (2008) que observaram menores teores de K trocável somente na camada superficial (0-5 cm) em florestas de *Pinus* em primeira rotação, comparativamente às florestas de araucária e campo nativo.

O K extraído por HNO<sub>3</sub> 1,0 mol L<sup>-1</sup> fervente apresentou teores até doze vezes maiores que o K-NH<sub>4</sub>OAc. (Figura 4.1b). Na primeira rotação de *Pinus* os valores variaram de 711 a 807 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto na terceira rotação os valores se situaram na faixa de 448 a 546 mg kg<sup>-1</sup>. O K-HNO<sub>3</sub> teve um comportamento similar ao K trocável, sem variação ao longo do perfil do solo e com menores teores na terceira rotação. Cabe ressaltar que as análises de K realizadas não foram em esquema

sequencial como no fracionamento de fósforo (Capítulo 2). Então, os valores de  $K-HNO_3$  englobam também o K trocável, devendo o teor de  $K-NH_4OAc$  ser subtraído do  $K-HNO_3$  para se estimar o K não-trocável. Assim, pode-se verificar que, não apenas o K trocável ( $K-NH_4OAc$ ) foi absorvido durante as rotações, mas também o K não-trocável, tendo em vista que, há uma diferença média de  $244 \text{ mg kg}^{-1}$  da primeira para a terceira rotação, indicando absorção das formas não-trocáveis.



**Figura 4. 1** Teores médios de potássio trocável ( $K-NH_4OAc$ ), potássio não trocável ( $K-HNO_3$ ) e potássio semi-total ( $K-HNO_3+HCl$ ) em solo sob primeira e terceira rotação de *Pinus taeda* L.. Otacílio Costa, 2012.

Quanto aos teores de K semi-total extraído por  $HNO_3+HCl$  (Figura 4.1c), não foram observadas diferenças entre primeira e terceira rotação, sendo os valores entre  $730$  e  $2013 \text{ mg kg}^{-1}$  bastante variáveis, prejudicando as comparações à semelhança da fração de P-residual no fracionamento de fósforo (Capítulo 2). Os

maiores teores desta fração em profundidade podem estar relacionados ao maior conteúdo de argila nas camadas mais profundas (Anexo II e III).

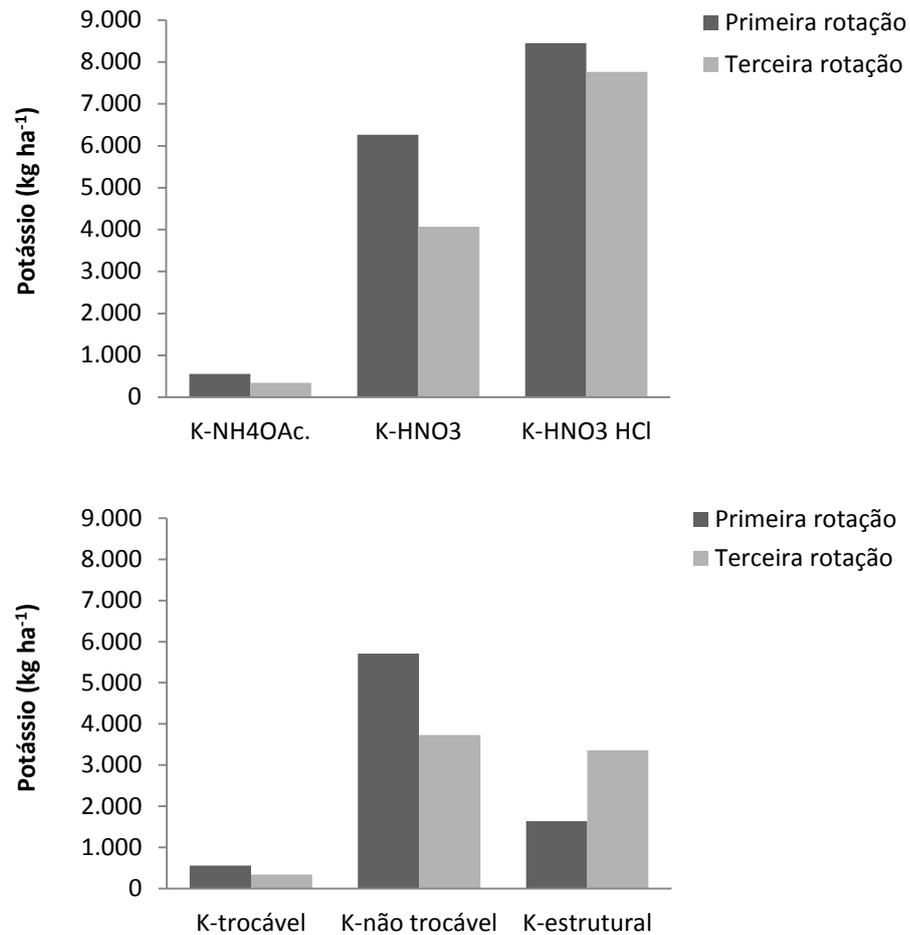
Entretanto, quando se observa os teores devidos ao K estrutural há uma grande diferença entre as rotações (Figura 4.2). Para se estimar o K estrutural se deve subtrair do K semi-total (K-HNO<sub>3</sub>+HCl) os teores de K trocáveis e não trocáveis. O K-estrutural representou apenas 19% do K-HNO<sub>3</sub>+HCl na primeira rotação e 43% do K-HNO<sub>3</sub>+HCl na terceira rotação. Assim, na primeira rotação os teores de K não-trocável representam a maior parte do K-HNO<sub>3</sub>+HCl, ou seja, possuem menor K estrutural. Sugerindo a existência de menores teores de K trocável e K não-trocável nas áreas há mais tempo cultivadas com *Pinus*, mas ainda uma grande reserva de K-estrutural na terceira rotação (Figura 4.2).

Quando comparados os estoques, tanto o K trocável como o K não-trocável (na camada de 0 - 80 cm) foram menores na floresta em terceira rotação, sendo a diferença entre primeira e terceira rotação de 216 kg ha<sup>-1</sup> de K trocável e de 1977 kg ha<sup>-1</sup> de K não-trocável. A análise somente destas diferenças não condizem à exportação causada pelas três rotações de *Pinus*. Sendo a exportação de K com a remoção da casca e lenho de *Pinus taeda* com 16 anos avaliada em 101 kg ha<sup>-1</sup> na mesma região (GONÇALVES et al., 2009), pode-se considerar que os solos sob terceira rotação já sofreram uma retirada de aproximadamente 303 kg ha<sup>-1</sup> de K com o lenho e a casca e do máximo. Essa retirada é praticamente um pouco maior que a diferença de estoque de K trocável observada entre primeira e terceira rotação, mas muito aquém da diferença entre os estoques de K não-trocável.

É provável que o K não-trocável tenha contribuído substancialmente ao longo das rotações de *Pinus*, no entanto, nem toda essa diferença de K (1977 kg ha<sup>-1</sup>) pode ser devida ao efeito do cultivo de pinus. Mesmo que as exportações deste

nutriente fossem máximas,  $426 \text{ kg ha}^{-1}$  com a retirada de lenho, casca, galho e acículas em 3 rotações (GONÇALVES et al., 2009); os conteúdos de K na serapilheira fossem subtraídos ( $32,4 \text{ kg ha}^{-1}$  na terceira rotação e  $11,0 \text{ kg ha}^{-1}$  na primeira rotação); fossem consideradas todas as perdas, de  $4,8$  a  $7,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de K por lixiviação (GONÇALVES et al., 2005) e contabilizadas as entradas atmosféricas, de até  $8,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de K (Oki, 2002), explicaria-se apenas 1 quarto das diferenças de K não-trocável entre os solos em primeira e terceira rotação.

Quando são considerados os estoques de K estrutural,  $1722 \text{ kg ha}^{-1}$  maior na terceira rotação, verifica-se uma diferença total de somente  $471 \text{ kg ha}^{-1}$  de K a menos na terceira rotação em relação à primeira, valor mais condizente à exportação estimada por Gonçalves (et al., 2009). Essa diferença, entretanto, nos remete à cautela que deve ser tomada com dados que, refletem um estudo de caso e não um experimento de longo prazo, sendo difícil explicar o porquê do K estrutural ser menor no *Pinus* em primeira rotação. Assim, resta a hipótese de que os solos possuem diferenças de mineralogia e esta, conhecidamente afeta os teores de K.



**Figura 4. 2** Estoques de potássio na camada de 0 - 80 cm nas frações de K trocável (K-H<sub>4</sub>OAc.), K não trocável (K-HNO<sub>3</sub> subtraído o K-NH<sub>4</sub>OAc) e K estrutural (K-HNO<sub>3</sub>+HCl subtraídos o K-HNO<sub>3</sub> e o K-NH<sub>4</sub>OAc) em primeira e terceira rotação de *Pinus taeda*. Otacilio Costa, 2012.

Mesmo, sob as ressalvas anteriores, observa-se que os teores de K trocável e não-trocável relativos ao K estrutural são menores na terceira rotação, indicando, novamente, a utilização destas formas de K com o cultivo de *Pinus*.

Em um estudo de longo prazo, Markewitz & Richter (2000) observaram que o K trocável é tamponado pelo K não-trocável no período de acúmulo de K pela floresta, no entanto, as fontes de tamponamento do K, não são bem descritas. Porém, com base em suas observações, os autores afirmam que em florestas de *Pinus taeda* na Carolina do Sul, EUA, as análises de K trocável não são

recomendadas para obtenção de um índice de disponibilidade de K para as plantas. Semelhantemente, Richter et al., (1994), encontraram em um Ultisol, disparidade entre o esgotamento de K no solo e suas remoções por exportação pelo *Pinus taeda*, sugerindo um reabastecimento de K trocável do solo, estimando o valor do tampão de K, em  $337 \text{ kg ha}^{-1}$ , que significa uma oferta média anual de K de  $12,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

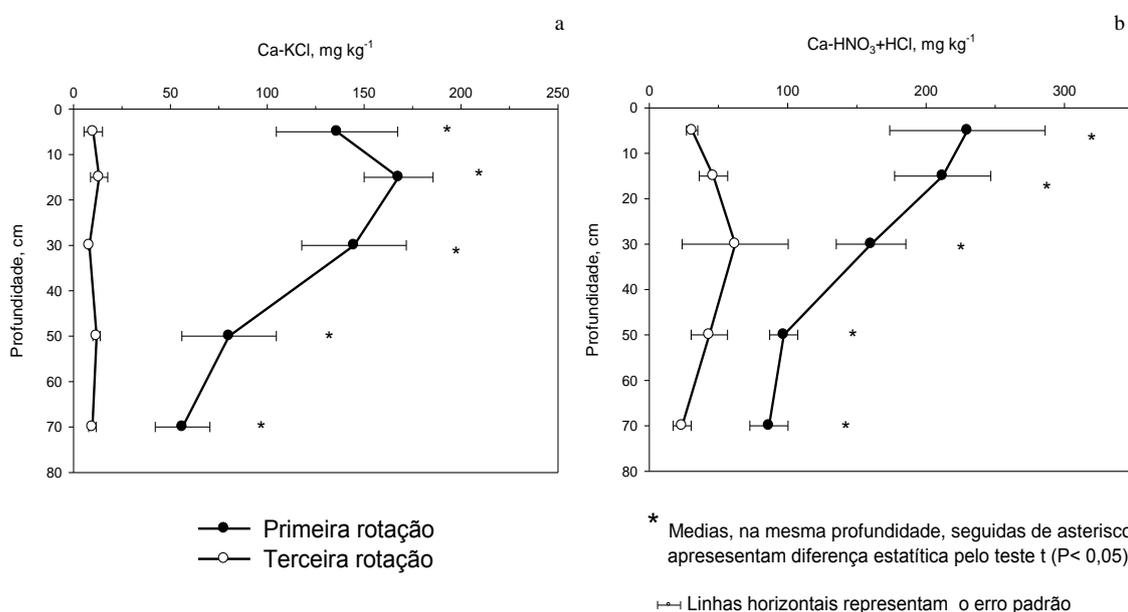
Pela possibilidade de uso dos estoques de K trocável e K não-trocável elevados nos solos estudados ( $> 3700 \text{ kg ha}^{-1}$  na terceira rotação e  $> 5700 \text{ kg ha}^{-1}$  na primeira rotação) e aliado a baixa extração de K em uma rotação de *Pinus taeda* (aproximadamente  $101 \text{ kg ha}^{-1}$ , conforme Gonçalves et al., 2009), pode-se inferir, que o estoque de K no solo é elevado e este não é um nutriente que apresentaria problemas de deficiência para o *Pinus* nas próximas rotações e, assim, não seria um nutriente prioritário para a fertilização, principalmente por causa da sustentação que o K não-trocável daria ao sistema.

#### 4.4.2 – Formas e estoques de cálcio e magnésio no solo

Os teores de Ca trocável no solo (Ca-KCl), apresentados na Figura 4.3a, são muito baixos. No solo em primeira rotação, os teores variaram de  $56,3$  a  $167,8 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto no solo em terceira rotação os valores variaram de  $8,2$  a  $13,2 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004), os teores de Ca abaixo de  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  são considerados baixos,  $400$  a  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  são médios e acima de  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  são altos. Isso mostra que o teor de Ca é extremamente baixo já no solo em primeira rotação, mas fica ainda mais limitante no solo em terceira rotação. Mesmo se for levado em consideração o teor de Ca semi-total do solo (Figura 3.3b), os valores

ainda assim seriam classificados como “baixos”, segundo a (CQFS-RS/SC, 2004). Para ambas as formas de Ca foram detectadas diferenças significativas entre as rotações de *Pinus*, em todas as profundidades do solo avaliadas.

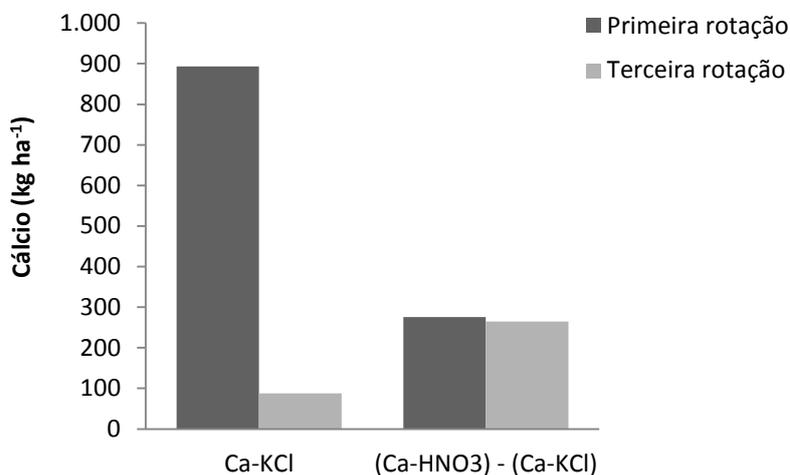
Além dos teores de Ca trocável serem extremamente baixos, as reservas semi-totais são baixas também. Na primeira rotação, o Ca trocável representou, em média, 75,3% do Ca semi-total. Os teores de C trocável foram tão baixos na terceira rotação que representaram apenas 28,6% do Ca semi-total (Figura 4.3b).



**Figura 4.3** Teores médios de cálcio trocável (Ca-KCl) e cálcio semi-total (Ca-HNO<sub>3</sub>+HCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.

O estoque de Ca trocável foi drasticamente menor na terceira rotação de *Pinus*, 87,7 kg ha<sup>-1</sup>, em relação à primeira rotação, 894 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto o Ca semi-total foi de 352 e 1169 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para terceira e primeira rotação (Figura 4.4). Como a análise de fracionamento não foi realizada de maneira seqüencial, para se estimar a fração mais estável de Ca, que teve baixíssimos

estoques na terceira (264 kg ha<sup>-1</sup>) e primeira rotação (276 kg ha<sup>-1</sup>), o Ca trocável foi subtraído do Ca-semitotal.



**Figura 4. 4** Estoques de cálcio na camada de 0-80 cm nas frações cálcio trocável (Ca-KCl) e cálcio não lábil (Ca-HNO<sub>3</sub>+HCl subtraído o Ca-KCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. O estoque da fração mais lábil foi subtraído da menos lábil. Otacílio Costa, 2012.

A diferença entre os estoques da primeira e terceira rotação ficam acima de uma exportação de nutrientes ocasionada por três rotações de *Pinus*, mesmo ao considerar uma alta de exportação (3 x 166 kg ha<sup>-1</sup> de Ca) com a colheita de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade (GONÇALVES et al., 2009). No entanto, é importante ressaltar que a terceira rotação não teria Ca suficiente para uma próxima rotação de *Pinus*, enquanto que a primeira rotação ainda teria Ca para três ou quatro rotações. Isso evidencia que este nutriente deve ser monitorado com cuidado nos solos da região, pois a baixa disponibilidade natural deste solo (MAFRA et al., 2008) aliada ao não uso de fertilizantes ou corretivos da acidez pode ser limitante ao crescimento do *Pinus*.

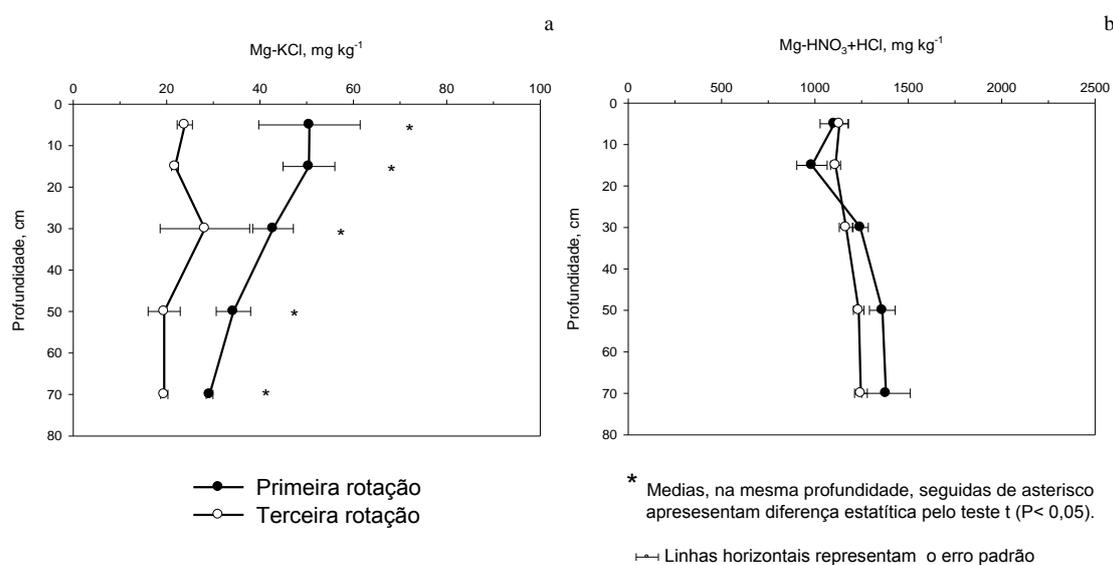
Chaves e Corrêa (2005 e 2003) diagnosticaram que as causas que levaram ao amarelecimento, necrose progressiva das acículas e morte precoce de *Pinus caribaea* em áreas de Cerrado, no oeste de Minas Gerais, foram um quadro complexo de deficiências no sistema solo-planta estudado, envolvendo principalmente os macronutrientes Ca e Mg. Os autores concluíram que a implantação e condução desses maciços florestais sem a correção das limitações nutricionais do solo causaram o problema, que se agravou pela natural resistência das acículas à decomposição, rompendo a ciclagem dos nutrientes.

Os teores de Mg trocável no solo (Mg-KCl), na primeira rotação, variaram de 29,2 a 50,6 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto na terceira rotação os valores variaram de 19,5 a 28,2 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4.5a). Para a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004), os teores de Mg abaixo de 60 mg kg<sup>-1</sup> são considerados baixos, de 60 a 120 mg kg<sup>-1</sup> são médios e acima de 120 mg kg<sup>-1</sup> são altos. Isso demonstra como o teor de Mg é baixo já no solo primeira rotação e, ainda mais baixo no solo em terceira rotação. Por outro lado, os teores de Mg semi-total do solo (Figura 3.5b) são muito altos, de 984 a 1380 mg kg<sup>-1</sup> e não diferiram entre primeira e terceira rotação.

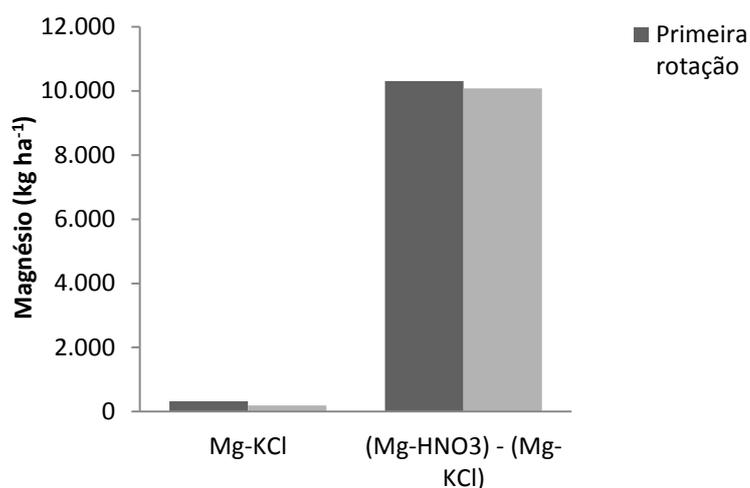
Em contraste ao ocorrido com o Ca, a percentagem de Mg trocável em relação ao Mg semi-total é pequena (Tabela 4.6), indicando que o solo ainda possui reservas consideráveis de Mg em formas menos disponíveis. Na primeira rotação o Mg trocável representou, em média, 3,6% do Mg semi-total, enquanto na terceira rotação esse valor baixou para 1,9% do Mg semi-total.

Para o cálculo do estoque, como a análise de fracionamento não foi realizada sequencialmente, o Mg trocável foi subtraído do Mg semi-total. Na primeira rotação o estoque de Mg trocável (326,3 kg ha<sup>-1</sup>) foi maior que o da terceira rotação de *Pinus*

(188,5 kg ha<sup>-1</sup>) (Figura 3.6). Enquanto o estoque de Mg semi-total foi de 9890,4 kg ha<sup>-1</sup> na primeira rotação foi de 10347,1 kg ha<sup>-1</sup> na terceira rotação de *Pinus*. A diferença total, foi de 594,5 kg ha<sup>-1</sup> de Mg menores na terceira rotação em relação a primeira rotação de *Pinus*. Considerando as exportações entre 31 e 51 kg ha<sup>-1</sup> de Mg com colheita de *Pinus taeda* com 16 anos de idade (GONÇALVES et al., 2009), Estima-se que, mesmo uma exportação de no máximo 153 kg ha<sup>-1</sup> de Mg em três rotações, seria menor que a diferença total de estoque entre primeira e terceira rotação, sendo mais coerente, ao relacionar o cultivo de *Pinus*, comparar as diferenças somente do estoque de Mg trocável (137,8 kg ha<sup>-1</sup> de Mg da primeira para a terceira rotação).



**Figura 4.5** Teores médios de Mg trocável (Mg-KCl) e Mg semi-total (Mg-HNO<sub>3</sub>+HCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. Otacílio Costa, 2012.



**Figura 4. 6** Estoques de Mg na camada de 0-80 cm nas frações Mg trocável (Mg-KCl) e Mg não lábil (Mg-HNO<sub>3</sub>+HCl subtraído o Mg-KCl) do solo em florestas de *Pinus taeda* em primeira e terceira rotação. O estoque da fração mais lábil foi subtraído da menos lábil. Otacílio Costa, 2012.

Devido ao grande estoque de Mg em formas menos lábeis, é provável que o Mg, diferentemente do Ca, não seja um nutriente que necessite monitoramento constante nos povoamentos de *Pinus* na região.

### 4.3 CONCLUSÕES

Para diagnóstico das modificações nos teores de potássio do solo com usos de longo prazo, a análise deve envolver a quantificação de formas trocáveis e não-trocáveis, pois ambas são responsáveis pelo suprimento de potássio às plantas.

As florestas há mais tempo cultivadas com *Pinus taeda* apresentaram menores estoques de potássio, cálcio e magnésio trocável e potássio e cálcio não trocável.

As reservas de potássio e magnésio em formas não-lábeis são elevadas nos solos estudados. Os estoques de cálcio trocável e cálcio semi-total são extremamente baixos nos solos estudados.

## 5. CONCLUSÕES GERAIS

A partição da matéria orgânica em diferentes formas de carbono é modificada com o plantio sucessivo de *Pinus*. A análise somente de teores totais de carbono, principalmente nas camadas superficiais do solo pode não expressar estas modificações químicas da matéria orgânica do solo, sendo as frações: ácido fúlvico, húmico e humina mais sensíveis no diagnóstico de modificações provocadas pelo manejo do solo florestal.

Com o plantio sucessivo de *Pinus* os teores das formas lábeis de fósforo inorgânico e orgânico diminuem, assim como também o fósforo residual. Por outro lado, os teores das formas inorgânicas moderadamente lábeis aumentam. Por isso, nos solos estudados, a análise da disponibilidade de fósforo deve levar em consideração pelo menos os teores de fósforo inorgânico e orgânico disponíveis por RTA e  $\text{NaHCO}_3$ .

Formas não trocáveis de potássio e de magnésio do solo florestal poderão atuar como fontes, reabastecendo as quantidades absorvidas pela floresta ao longo das rotações de *Pinus*, enquanto que os estoques de cálcio do solo não são suficientes à uma próxima rotação.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de avaliação do carbono no solo normalmente utilizados em rotina laboratorial se baseiam no carbono total (ou semi-total) não sendo possível interpretar a dinâmica do elemento apenas com os valores dessa determinação. Desta maneira, para fins de caracterização e monitoramento do carbono nos solos florestais deve ser feito, além da análise de carbono total, o fracionamento da matéria orgânica, que parece mais sensível às modificações de manejo e uso do solo.

Foi observado que não apenas o fósforo lábil atua na sustentação dos teores absorvidos pelas plantas e, por isso, seria indicada uma análise de solo complementar para diagnosticar o teor de fósforo disponível em médio prazo. No esquema de fracionamento usado, embora tenham sido detectadas modificações no P residual, essa análise pode superestimar o fósforo disponível para cultivos florestais. O uso de um extrator de força intermediária, como o NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> ou, ainda, a soma dos teores extraídos por RTA e NaHCO<sub>3</sub> pode fornecer o estoque de fósforo do solo que eventualmente poderia ser absorvido pela floresta. Deste modo, essa análise por NaOH seria uma informação complementar para diagnóstico inicial dos solos, ficando a critério do usuário definir se o teor total de fósforo extraído por esse método seria uma informação suficiente ou se seria importante a separação deste total em fósforo inorgânico e orgânico. Os resultados deste trabalho apontam que o fósforo orgânico tem grande participação no estoque de fósforo no solo

florestal, sendo essa separação em fósforo inorgânico e orgânico é importante, principalmente porque pode ocorrer acúmulo de fósforo orgânico com o uso continuado do solo para fins florestais.

Na situação estudada, o solo apresentou estoques grandes de magnésio e potássio em formas menos lábeis, permitindo inferir que a probabilidade de resposta ou necessidade de monitoramento frequente destes elementos não parece necessária ou, pelo menos, não é prioritária. Por outro lado, o solo apresentou uma disponibilidade de cálcio irrizória, tanto em formas disponíveis como em seu estoque de formas não trocáveis, permitindo inferir que este é o nutriente prioritário no monitoramento da fertilidade e também na fertilização. Assim, um dos manejos que deveriam ser considerados nestas áreas seria a aplicação de uma fonte de cálcio, que poderia ser calcário (em doses pequenas, apenas como fonte de cálcio) ou ainda resíduos ricos em cálcio da própria indústria de celulose, caso disponíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2010 ano base 2009**/ Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF. – Brasília, 2010.

ABRÃO, S. F. **Alterações físicas e químicas de um cambissolo húmico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações**. Dissertação de mestrado em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

ANDRAE, F. Ecologia Florestal. Santa Maria: UFSM – DCFL, 230 p, 1978.

AUER, C. G.; GHIZELINI, A. M., PIMENTEL I.C. Decomposição fúngica de acículas em plantios de *Pinus*. **Boletim de Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n.54, p.127-138, 2007.

BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Recomendação de fertilizantes em plantios de eucalipto. In: Gonçalves, J. L. M.; Benedetti, V. (Eds). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 270-286, 2000.

BAYER, C; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Metrópole, 2008.

BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WILDNER, L.P.; ERNANI, P.R. & ALBUQUERQUE, J. A. Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural**, 33: 469-475, 2003.

BECK, M. A.; SANCHES, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. **Soil Science**, Baltimore, v 34, p. 1424-1431, 1994.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos Físicos e Químicos do Solo e suas Relações com o Crescimento e a Produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, 2006.

BIZUTI, D. T. G.; PICCOLO, M. C.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINS, S. C. ; MARTINELLI, L. A. . Ciclagem do fósforo em Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Restinga da Mata Atlântica. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Solos nos Biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas, 2011, Uberlândia. **Anais...** CBCS: Viçosa : SBCS, . p. 1-4, 2011.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system. **Australian Journal of Agriculture Research**, v.46, p.1459-1466, 1995.

BRDE. Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul Agência de Florianópolis. Gerência de Planejamento. **Programa de suprimento florestal para a cadeia produtiva da madeira**. Florianópolis: BRDE, 2003.

BRUN, E. J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BROOKES, P.C. & POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal Science Food Agriculture**, 32:671-674, 1981.

CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AAMARAL-SOBRINHO; N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. Eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Gênese, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. p. 69-90. 1999.

CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA S.G. da; SILVA, M.B.E.; SANTOS, G. de A. Organic matter fractions in a toposequence of six soils in the State of Rio de Janeiro, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.133-143, 2000.

CAMARGO, F .A.O.; SANTOS , G.A. & GUERRA, J .G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS,G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Metrópole, 2008.

CARVALHO, F. **Atributos bioquímicos como indicadores da qualidade de solo em floresta de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze no Estado de São Paulo**. Tese de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz:Piracicaba, SP, 2005.

CASTRO, G. C. **Carbono orgânico nas frações granulométricas e húmicas em solos de diferentes texturas sob floresta da região noroeste mato-grossense**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso, Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambiental, 2008.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Macronutrientes no sistema solo- *Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas **Revista Árvore**. Viçosa- MG: SIF, vol. 29, n. 5, p. 691-700. 2005.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Micronutrientes no sistema solo- *Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas **Revista Árvore**, Viçosa-MG: SIF, v.27, n.6, p.769-778, 2003.

CHRISTENSEN, B.T. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. **Soil Biology Biochemistry**, v.19, n.4, p.429-435, 1987.

CQFS-RS/SC **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, Porto Alegre, 2004.

CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v 36, p.199-207, 1985.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.425-432, 1999.

COSTA LIMA, V. et al. Efeito da substituição de campo natural por *Pinus* na dinâmica do carbono do solo. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 14, n. 1-2, p. 7-12, 1995.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v 64, p. 197-214, 1995.

DE- POLLI, H & GUERRA, J.G.M. Carbono, Nitrogenio e Fósforo na Biomassa Microbiana. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da Matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, cap. 17. 2008.

DICK, D.P.; GOMES, J. & ROSINHA, P.B. Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22: 603 - 611, 1998.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p., 1997.

EVANS, J., Sustainability of productivity in successive rotations. International conference on timber plantation development. 7–9 November 2000, Manila, Philippines, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. **Anais Eletrônicos...** Italy: FAO, 2000. Disponível em:

<http://www.fao.org/forestry/5084-0cff9cd2dd78cc5b1b0bfee2b24991027.pdf>

Acesso em: out. 2010.

FAO, **State of the World's Forests**. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome. 2011. Disponível em:

<http://www.fao.org/docrep/013/i2000e/i2000e00.htm> Acesso em: dez. 2011.

FARIA, G. E.; BARROS N. F.; NOVAIS R. F.; SILVA, I.R; NEVES , J. C. L. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica do solo em diferentes distâncias do tronco de eucalipto **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.36, n.80, p. 265-277, 2008.

FONTAINE, S.; BAROT, S.; BARRÉ, P.; BDIQUI, N.; MARY, B.; RUMPEL, C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. **Nature** 450:277–281, 2007.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. ; FLORES, J.;CASSOL P. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 231p. 2003.

GONÇALVES, J. L. M. Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. **Anais eletrônicos** do 1º Seminário sobre Cultivo Mínimo do Solo em Florestas. Sem data. Disponível em:  
[http://www.ipef.br/publicacoes/seminario\\_cultivo\\_minimo/cap05.pdf](http://www.ipef.br/publicacoes/seminario_cultivo_minimo/cap05.pdf) Acesso Janeiro de 2008.

GONÇALVES, J. L. M.; MOREIRA, A. M.; STAHL, J.; ARTHUR JR, J. C.; PIRES, L. M.; SIXEL, R. M. M.; GOMEZ F. M. Sustentabilidade da produtividade de povoamento de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* com base na exportação e no estoque de nutrientes. **Relatório técnico de Pesquisas**. KLABIN. S.A. 2009.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL,V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: **Nutrição e Fertilização Florestal**. IPEF. Piracicaba 2005.

GUERRA, J.G.M. SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F.A.O.

Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da Matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p.19-26. 2008.

GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Oxford, v.163, p.822-833, 1998.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v 46, p. 970-976, 1982.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Censo agropecuário de 1996**.

Disponível em:

[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/1995\\_1996/default.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/1995_1996/default.shtm) Acesso em 29 de Janeiro de 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário de 2006**.

Disponível em: <http://etal..ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=430360>

Acesso em: 15 out 2010.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, 27:408-416, 1998.

JOHNSON, D. W. ; TODD JR. D. E.; TRETTIN, C. F. SEDINGER, J. S. Soil Carbon and Nitrogen Changes in Forests of Walker Branch Watershed, 1972 to 2004. **Soil Science Society of America journal**. 71:1639–1646. 2007.

KNUDSEN, D.; PETERSON, G.A.; PRATT, P.F. Lithium, sodium and potassium. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods of soil analysis**: chemical and microbiological properties. Madison: Soil Sc. Society of America, p.225-246. 1982.

KONONOVA, M. M. **Matéria orgânica del solo; su natureraleza, propiedades y métodos de investigación**. Barcelona: Oikos-Tau, 365p. 1982

KUO, S. Phosphorus: In: SPARKS, D.L. (Ed.) **Methods of soil analysis**: Chemical methods. Part 3. New York: SSSA, p. 869-920. 1996.

LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.; GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolosob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, p.821-832, 2003.

LIMA, A. M. N. **Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamento de eucalipto no Vale do Rio Doce– MG**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

MAFRA, A. L, GUEDES, S. F. F.; KLAUBERG, O. F.; SANTOS, J. C. P.; ALMEIDA, J. A.; ROSA, J. D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.2, p.217-224, 2008.

MAIA C.; CANTARUTTI, R. B. Disponibilidade de nitrogênio pela oxidação do carbono lábil com permanganato de potássio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, p.489-493, 2003.

MARKEWITZ, D.; RICHTER, D.D Long-term soil potassium availability from a Kanhapludult to an aggrading loblolly pine ecosystem **Forest Ecology and Management**.130, 109±129, 2000.

MARKEWITZ, D.; SARTORI, F.; CRAF, C. Soil change and carbon storage in longleaf pine stands planted on marginal agricultural lands. *Ecological Applications* by the **Ecological Society of America** ISSN: 10510761, Volume: 12, Issue: 5, p. 1276–1285, DOI: [10.1890/1051-0761\(2002\)012\[1276:SCACSI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[1276:SCACSI]2.0.CO;2), 2002.

MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 107p., 2005.

MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.1, n.2-3, p.55-61,1977.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F. A.O., eds. **Fundamentos da Matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, cap. 17. 2008.

MIELNICZUK, J. O potássio no solo. Piracicaba: **Boletim Técnico Potafos**, 80p. 1978.

MIYAUCHI, M. H. **Propriedades microbiológicas e bioquímicas do ciclo do C em solo sob diferentes coberturas vegetais**. Dissertação – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

MOBLEY, M. L. & RICHTER D.D. Wanted Dead or Alive: A search for 50 years of Calhoun Carbon. Poster Presentation. **Global Soil Change Workshop**. Union County, SC, USA, 2009.

- MOBLEY, M.L. **An Dead Plant Carbon over 50 years of Old-Field Forest Development**. Duke University, 2011, 152 pages; Dissertation Ph.D Ecosystem, Jan 2012.
- MORALES, C. A. S. **Relação entre atributos do solo com a produtividade de *Pinus taeda***. Dissertação de Mestrado em Manejo do Solo – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC. – Lages, 2007.
- MORO, L. **Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema sisPinus**. Tese Doutorado em Ciências Florestais - Universidade Federal de Paraná. Curitiba, 2005.
- MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v 27, p. 31-36, 1962.
- NACHTIGALL, G.R., VAHL, L.C. Dinâmica de liberação de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.15, n.1, p.43-47, 1991.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, Organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L. (Ed.) **Methods of soil analysis: Chemical methods**. Part 3. New York:SSSA, p. 961-1010.,1996.
- NOVAIS, F. R.; SMYTH, T.J. **Fósforo em Solo e Planta em Condições Tropicais**. Viçosa: UFV, 399p. 1999.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário Florestal**. Curitiba: Doáci Antônio Brena e Sylvio Péllico Netto, 1997.

PILLON, C. N.; MIELNICZUK, J.; NETO, L.M. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. **Documentos 105**, Embrapa Clima Temperado, Pelotas: 2002. Disponível: [http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/documentos/documento\\_105.pdf](http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/documentos/documento_105.pdf)

PULROLNIK, K. **Estoque e qualidade de matéria orgânica do solo de plantações de eucalipto em área de cerrado**: Tese de doutorado UFV - Viçosa. MG, 2007.

QUALLS, R. G.; TAKIYAMA, A., & WERSHAW R. L. Formation and Loss of Humic Substances During Decomposition in a Pine Forest Floor. **Science Society of America journal**, vol. 67, may–june 2003.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.135-166.

RESCK, D.V.S.; FERREIRA, E.A.B.; FIGUEIREDO, C.C. & ZINN, Y.L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.359-417.

RHEINHEIMER, D. S.; CAMPOS, B. C.; GIACOMINI, S. J.; CONCEIÇÃO, P. C. & BORTOLUZZI, E. C. Comparação de métodos de determinação de Carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:435-440, 2008.

RICHTER, D.D.; MARKEWITZ, D.; WELLS, C.G.; ALLEN, H.L.; APRIL, R.; HEINE, P.R.; URREGO, B. Soil chemical change during three decades in an old-field loblolly pine (*Pinus taeda* L.) ecosystem. **Ecology** 75, 1463±1473. 1994.

RICHTER, D.D.; MARKEWITZ, D.; TRUMBORE S. E.; WELLS, C.G.; Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. **Nature** 400, 56-58 doi:10.1038/21867; 1999.

RICHTER, D.D.; ALLEN, H. L.; JIANWEI, L. MARKEWITZ, D.; RAIKES, J. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. **Oecologia** vol. 150, Number 2, 259-271, DOI: 10.1007/s00442-006-0510-4, 2006.

RIGATTO, P. A; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG: SIF, v.29, n.5, p.701-709, 2005.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**. Vol 338, Numbers 1-2 (2011), 143-158, DOI: 10.1007/s11104-010-0391-5 Published online: 15 May 2010.

SAS, Statistics Analysis System. **SAS user's guide**: statistics. SAS Institute (Cary, Estados Unidos). 5<sup>th</sup> ed. Cary, 1985. 956p.

SALCEDO, I. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. **Revista de Geografia**, Recife, 2314 12, 2009.

SCHLESINGER W. H. & LICHTER. J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO<sub>2</sub> **Nature** 411, 466-469 (24 May 2001) doi:10.1038/35078060; 2001.

SFB - Serviço Florestal Brasileiro, **Florestas do Brasil em resumo**: dados de 2005-2010. /Serviço Florestal Brasileiro. – Brasília: SFB, 2010.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**, Baltimore, v.162, p.795-807, 1997.

SOLLINS, P.; HOFMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma** 74, 65-105. 1996.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706196000365>

SYLVIA, D. M. et al. **Principles and applications of soil microbiology**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 550 p.

STEVENSON, F.J. **Humus Chemistry** -Genesis, Composition, Reactions. 2nd ed., Wiley, New York. 1994.

SWIFT, R.S. Organic matter characterization. p. 1011–1069. In **Methods of soil analysis**: Part 3. Chemical methods: D.L. Sparks et al. (ed.) SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison WI. 1996.

TATE. K.R. The bio1oica1 transformation of P in sou. **Plant and Soil**. Dordrecht. v. 76. p. 245- 256. 1984.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre. UFRGS/FA/DS, 1995.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Science**, 48:853-858, 1984.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. NewYork: Macmillan,634p., 1993.

TRETTIN, C.C.; JOHNSON, D.W.; TODD JR. D.E. Forest nutrient and carbon pools at Walker Branch Watershed: changes during a 21-year period. **Science Society of America journal**. . 63:1436-1448. 1999.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

USEPA. **Method 3050 B**. Disponível em:

<http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf>. Acesso em: set. 2010. 1998.

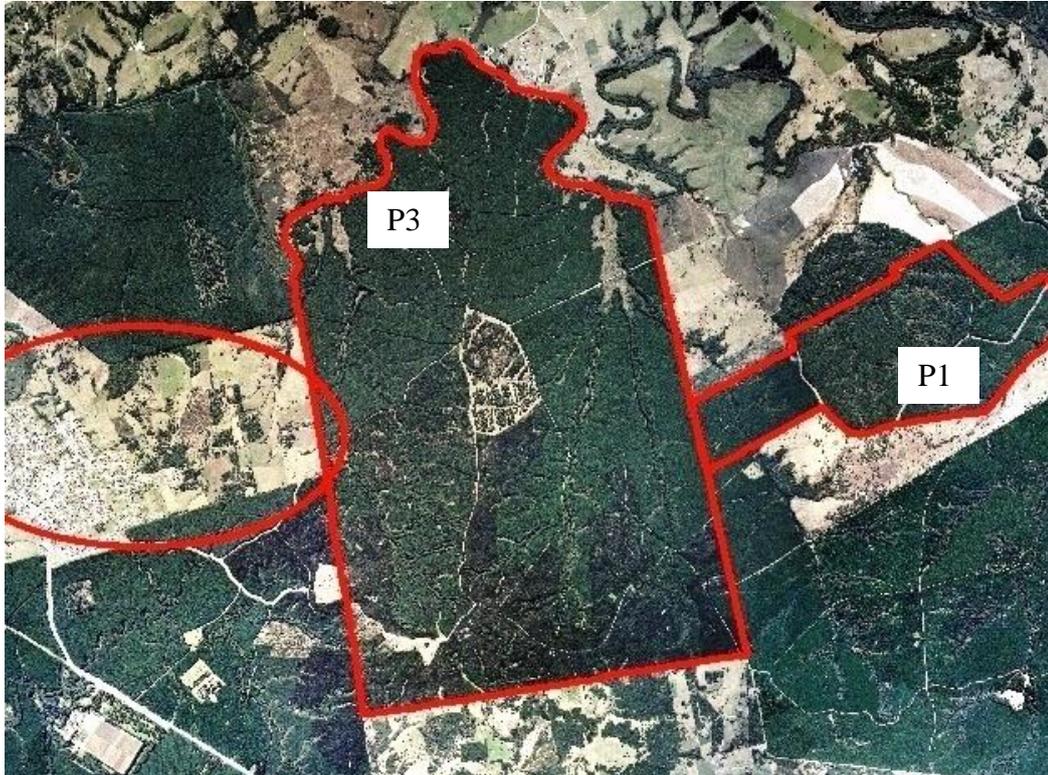
VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. L'humus des sols du Brésil: Nature et relation avec l'environnement. Cahiers ORSTOM, **Série Pédologie**, 24:83-95, 1988.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19:1467-1476, 1988.

ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S.; SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.166, p.285-294, 2002.

**ANEXOS**

## ANEXO I Localização das áreas de estudo



Localização das unidades modais selecionadas conforme critérios de homogeneidade e representatividade de *Pinus taeda* em primeira (P1) e terceira rotação (P3). Otacilio Costa, SC-Brasil.



Aspecto do interior da floresta de *Pinus* em primeira rotação e do exterior da floresta em terceira rotação. Otacilio Costa, SC-Brasil.

## ANEXO I: Atributos químicos e físicos do solo

### Anexo I - I: Atributos do solo em primeira rotação de *Pinus*

Camada(cm)	pH		C %	Al cmol <sub>e</sub> /L	Ca cmol <sub>c</sub> 100g <sup>-1</sup>	Mg cmol <sub>c</sub> 100g <sup>-1</sup>	K mg kg <sup>-1</sup>	P mg kg <sup>-1</sup>
	H <sub>2</sub> O	SMP						
0-10	4,32	3,97	3,6	9,64	0,68	0,25	65,0	8,2
10-20	4,37	3,95	3,0	8,24	0,84	0,25	66,8	6,0
30-40	4,47	3,90	3,1	10,24	0,72	0,21	60,8	3,6
45-60	4,42	3,96	3,1	6,61	0,40	0,17	55,3	2,2
60-80	4,42	3,96	2,3	6,61	0,28	0,15	59,4	1,8

Camada(cm)	Densidade	Microporosidade %	Macroporosidade	Porosidade total
10-20	1,08	41	23	64
30-40	1,01	46	20	66
45-60	1,02	47	19	66
60-80	1,01	47	20	67

### Anexo I -II: Atributos do solo em terceira rotação de *Pinus*

Camada(cm)	pH		C %	Al cmol <sub>e</sub> /L	Ca cmol <sub>c</sub> 100g <sup>-1</sup>	Mg cmol <sub>c</sub> 100g <sup>-1</sup>	K mg kg <sup>-1</sup>	P mg kg <sup>-1</sup>
	H <sub>2</sub> O	SMP						
0-10	4,0	3,90	3,3	12,3	0,05	0,12	36,3	5,7
10-20	4,1	3,85	3,1	10,3	0,07	0,11	25,0	2,5
30-40	4,1	3,95	2,9	9,7	0,04	0,14	28,4	1,1
45-60	4,2	4,01	1,5	8,7	0,06	0,10	31,6	1,8
60-80	4,3	4,02	0,8	9,1	0,05	0,10	32,5	2,6

Camada(cm)	Densidade	Microporosidade	Macroporosidade	Porosidade total
10-20	0,97	52	14	66
30-40	1,04	49	13	62
40-60	1,12	49	11	60
60-80	1,12	48	11	59

### ANEXO III: Características do perfil do solo

#### Anexo III - I: Atributos físicos do solo em primeira rotação de *Pinus taeda*

Horizonte	Prof.	Granulometria			Textura
		Areia total	Silte	Argila	
	cm	%			
AP	0-5	18,2	33,6	48,2	Argilosa
A2	5-20	14,7	41,5	43,8	Argilosa siltosa
A3	20-48	12,1	27,8	60,2	Muito argilosa
AB	48- 60/63	12,1	27,8	60,2	Muito argilosa
BA	60/63 -75	14,6	25,9	59,6	Argilosa
Bi	75 -104	13,7	30,3	55,9	Argilosa
BC	104-140	36,8	22,2	40,9	Argilosa
C	140-200	35,4	35,2	29,4	Franco argilosa

#### Anexo III - I: Descrição do perfil do solo em primeira rotação de *Pinus taeda*

PERFIL: 1

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo Húmico Alumínico Argiloso

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Otacílio Costa.

Fazenda Gavazzoti, estrada perimetral norte.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL– Trincheira situada no terço superior de encosta com cerca de 8% de declive.e sob cobertura de *Pinus taeda*.

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Formação Rio do Rastro.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Siltitos formação Rio do Rastro.

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso.

ALTITUDE: 878m

ROCHOSIDADE – Não rochoso.

RELEVO REGIONAL – Suave Ondulado.

RELEVO LOCAL – Ondulado.

CLIMA: cfb.

EROSÃO – Não

DRENAGEM – Moderadamente drenado (presença de mosqueado).

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: floresta ombrófila mista.

USO ATUAL – reflorestamento com *Pinus taeda*.

DESCRITO E COLETADO – Cristiane Ottes Vargas e Jaime Antonio de Almeida

## DESCRIÇÃO HORIZONTES

- Ap – 0-5 cm, com transição clara e plana, estrutura moderada pequena e granular com blocos subangulares, com poucas raízes, consistência friável;
- A2 – 5-20 cm, com transição clara e plana, estrutura moderada a fraca média e pequena com blocos subangulares, com poucas raízes, consistência friável;
- A3 – 20-48 cm, com transição gradual e plana, estrutura moderada média e pequena granular, raízes comuns, consistência muito friável;
- AB – 48-60/63 cm, com transição clara e plana, estrutura moderada a fraca média e pequenos blocos subangulares, raízes comuns, consistência friável a firme;
- BA – 60/63-75 cm, com transição gradual e plana, estrutura moderada a fraca média e pequenos blocos subangulares, com poucas raízes, consistência friável a firme;
- Bi – 75-104 cm, com transição gradual e plana, estrutura moderada a fraca média com blocos subangulares, com poucas raízes, consistência firme;
- BC – 104-140 cm, com transição gradual e plana, estrutura fraca média e grande com blocos subangulares, raras raízes, consistência firme;
- C – 140-200 cm, com transição gradual e plana, estrutura fraca com blocos subangulares, raras raízes, consistência friável a firme.

OBSERVAÇÕES: Há poucas zonas de depleção de Fe em BC e muitas em C, este acompanhado com mosqueados bruno avermelhados. Os horizontes Ap e A2 possuem coloração bruna menos escurecida que A3 e AB. Há aparente teor de argila em A2 em relação a A3.

### ANEXO III: Características do perfil do solo

#### Anexo III - II: Atributos físicos do solo em primeira terceira de *Pinus taeda*

Horizonte	Prof.	Granulometria			Textura
		Areia total	Silte	Argila	
	cm	%			
AP	0-5/10	17,08	36,44	46,48	Argilosa
A2	5/10-36	22,84	35,80	41,36	Argilosa
A3	36-52	23,64	25,40	50,96	Argilosa
AB	52- 65	19,71	35,38	44,91	Argilosa
BA	65-80/85	18,07	26,47	55,45	Argilosa
B	80/85 -125/130	16,41	27,36	56,23	Argilosa
BC	125/130-150/160	24,76	32,64	42,60	Argilosa
CR	150/160-200 cm	14,70	39,38	45,91	Argilosa

#### Anexo III - I: Descrição do perfil do solo em terceira rotação de *Pinus taeda*

PERFIL: 2

CLASSIFICAÇÃO: Cambissolo Húmico Alumínico Argiloso

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Otacílio Costa.

Fazenda Gavazzoti, Fazenda Gavazzoti, estrada perimetral norte, geral ao fundo do campo, atrás da Vila Fátima, a 100 metros da estrada do lado direito entrando na propriedade do Senhor Nelci Francisco de Souza.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL– descrito em trincheira em topo de elevação e relevo suave ondulado Trincheira situada no terço superior de encosta com cerca de 7% de declive e sob cobertura de *Pinus taeda*.

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Formação Rio do Rastro.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Siltitos formação Rio do Rastro.

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso.

ALTITUDE: 897 metros.

ROCHOSIDADE – Não rochoso.

RELEVO REGIONAL – Suave Ondulado.

RELEVO LOCAL – Ondulado.

CLIMA: cfb.

EROSÃO – Não

DRENAGEM – Moderadamente drenado (presença de mosqueado).

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: floresta ombrófila mista.

USO ATUAL – reflorestamento com *Pinus taeda*.

DESCRITO E COLETADO – Cristiane Ottes Vargas e Jaime Antonio de Almeida

#### DESCRIÇÃO HORIZONTES

Ap – 0-5/10 cm, com transição clara e ondulada, estrutura fraca a moderada média com blocos subangulares e moderada média granular, consistência friável;

A2 – 5/10-36 cm, com transição clara e plana, estrutura fraca a moderada média com blocos subangulares e moderada média granular, consistência friável;

A3 – 36-52 cm, com transição gradual e plana, estrutura moderada pequena e muito pequena granular e média com blocos subangulares, consistência friável;

AB – 52-65 cm, com transição clara e plana, estrutura moderada a fraca média com pequenos blocos subangulares, consistência friável a firme;

BA – 65-80/85 cm, com transição clara e ondulada, estrutura moderada a fraca média com blocos subangulares, consistência friável a firme;

B – 80/85-125/130 cm, com transição gradual e ondulada, estrutura fraca média com grandes blocos subangulares, consistência firme;

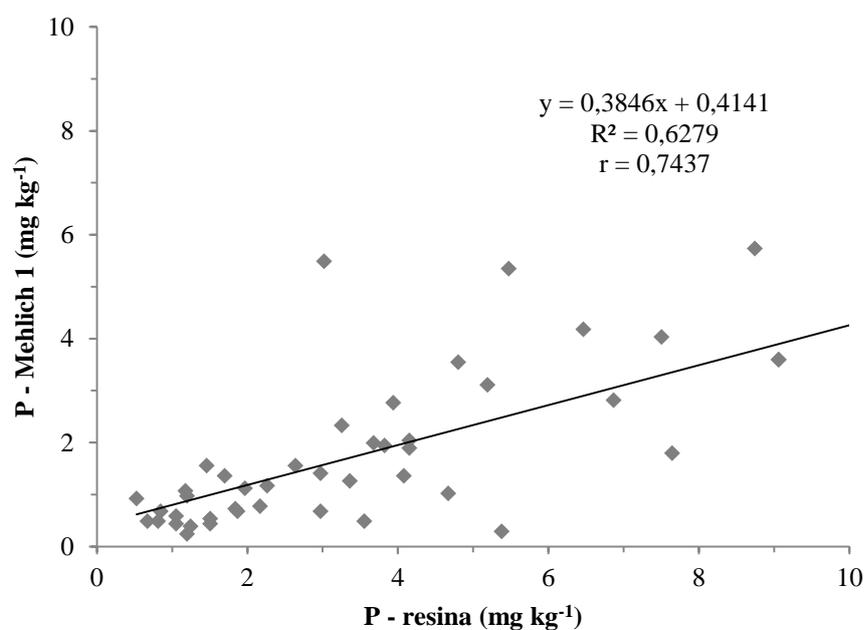
BC – 125/130-150/160 cm, com transição abrupta e ondulada, estrutura fraca com grandes blocos subangulares e angulares, consistência firme;

CR– 150/160-200 cm, com transição abrupta e ondulada, estrutura maciça, consistência firme a muito firme.

OBSERVAÇÕES: Há poucas zonas de depleção de Fe em BC e muitas em C, este acompanhado com mosqueados bruno avermelhados. Os horizontes Ap e A2 possuem coloração bruna menos escurecida que A3 e AB. Há aparente teor de argila em A2 em relação a A3.

## ANEXO VI

**Anexo IV - II:** Relação entre os teores de fósforo extraídos por resina trocadora de ânions (Pi-RTA) e o teor de fósforo disponível por Mehlich 1.



**Anexo IV - II:** Relação entre os teores de potássio extraídos por NH<sub>4</sub>OAc e o teor de potássio disponível por Mehlich 1.

