

MINERALIZAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO EM SOLOS SOB
LEGUMINOSAS FLORESTAIS, FLORESTA SECUNDÁRIA E
PASTAGEM

DANIELLE APARECIDA DUARTE NUNES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO - 2011

MINERALIZAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO EM SOLOS SOB
LEGUMINOSAS FLORESTAIS, FLORESTA SECUNDÁRIA E
PASTAGEM

DANIELLE APARECIDA DUARTE NUNES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Orientador: Prof^o. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO - 2011

MINERALIZAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO EM SOLOS SOB
LEGUMINOSAS FLORESTAIS, FLORESTA SECUNDÁRIA E
PASTAGEM

DANIELLE APARECIDA DUARTE NUNES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Aprovada em 06 de julho de 2011.

Comissão examinadora:

Prof. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto (D.Sc., Produção vegetal) - UESB

Dr^o Francisco Costa Zaia (D.Sc., Produção vegetal) – UENF

Prof. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) – UENF

Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues (Ph. D., Solos e Nutrição de Plantas) –
UENF

Orientador

“Ao homem pertencem os planos do coração; mas a resposta é de Deus.”

Provérbios 16: 1

*“Eu sei os planos que concebo para vós, diz o senhor... Para vos dar a
esperança e o futuro que esperais.”*

Jeremias 29:11

A Deus

Por estar sempre presente em minha vida guiando meus passos, me amparando com imenso amor nos momentos mais difíceis e me dando saúde e forças para superar todos os obstáculos e realizar mais essa conquista.

AGRADEÇO

Aos meus queridos pais

João Nunes e Maria das Neves,
pela dedicação sem limites, apoio, segurança, grande incentivo,
exemplo de vida e coragem e amor incondicional que sempre me
ofereceram, me fazendo sentir a filha mais amada do mundo, o que
me deu segurança e força para lutar pelos meus ideais.

Ao meu amado esposo

Israel,
que sempre esteve presente durante os últimos nove anos de
minha vida, compartilhando momentos maravilhosos, mas também
muito difíceis, me incentivando e não medindo esforços para ajudar,
sempre confiando e acreditando em meu potencial, dedicando todo o
seu carinho e amor.

OFEREÇO

À minha adorável família

Ao meu bebê Daniel Vinícius que está por vir, à Irmã Rosângela, sobrinha Camilla, aos primos Maria da Penha, Diego, Marilene e Renato, sogros Maria Luisa e Silvio, tios José, Rosani, João e Elizeuda, cunhados Fabio e Marcos por me fazerem sentir especial, pelo grande carinho, momentos de descontração, felicidade, força e apoio que sempre me dedicaram.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade de realização desse curso e bolsa de estudo concedida;

Ao professor Antônio Carlos da Gama-Rodrigues pela orientação, confiança, compreensão e por ter proporcionado grande aprendizado;

À querida e especial professora Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues pelo grande carinho, orientação, confiança, compreensão, força e incentivo, que muitas vezes me deram forças para buscar os meus objetivos;

À técnica de laboratório de solos da UENF Vanilda Ribeiro de Sousa pela grande e importante ajuda nos procedimentos e análises laboratoriais, pela paciência, apoio, força, incentivo e grande carinho, me dando animo para prosseguir, pois faço minha as

palavras que sempre dizia “É muito difícil!”, mas ainda bem que com sua ajuda deu tudo certo;

À técnica de laboratório de solos da UENF Kátia Regina a quem sempre digo que tem um coração de mãesona, pela contribuição nos procedimentos e análises laboratoriais, nas disciplinas e principalmente pelas palavras de apoio e grande carinho, estando de alguma forma sempre ao meu lado como se fosse um anjo da guarda;

Ao técnico de laboratório de solos da UENF Ederaldo pela ajuda na coleta de solo, apoio, força, grande carinho e amizade;

À técnica de laboratório de solos da UENF Andréia pela colaboração nas análises laboratoriais, apoio e incentivo;

À minha colega de laboratório e mais nova amiga Ruthana, pois sem ela teria sido muito mais difícil terminar as análises, e por ter me conquistado com sua amizade, carinho, força, incentivo e grande coração, estando ao meu lado em momentos muito difíceis;

À minha colega de laboratório e grande amiga Carmen que além de me ajudar na realização deste trabalho de muitas formas, sempre esteve ao meu lado me confortando e apoiando com grande amor e carinho;

Ao pós-doutorando Francisco Zaia por repartir seus conhecimentos comigo, pelo apoio e amizade;

À Professora Patrícia Anjos Bittencourt Barreto por estar sempre me acompanhando à distância, se fazendo sempre presente com sua ajuda, grande apoio, carinho e amizade;

À doutora mais fofinha que conheço, Maria Kellen, que com seu coração enorme sempre me deu apoio, ajuda, incentivo, grande carinho e amizade;

À doutoranda Joice Maria pelo apoio, incentivo e amizade;

Aos professores Leda Martins, Cláudio Marciano e Marta Simone pelas sugestões e colaborações;

Aos colegas de laboratório e amigos Vitor, Amanda, Edson e David pelos momentos de descontração, apoio e amizade e em especial Natália, Avelino e Carol pela grande ajuda nos procedimentos laboratoriais;

Ao meu querido amigo Rodrigo pelo apoio na coleta de solo, pela amizade e grande carinho dedicado;

À minha querida amiga e companheira de lar Gabriela que esteve ao meu lado em todos os momentos, me ouvindo e sempre com uma palavra amiga, me dando muito apoio e incentivo;

Às minhas queridas amigas e companheiras Lidiane e Zelita por serem tão especiais, contribuindo grandiosamente com amor, apoio, carinho e amizade;

Aos amigos Alessandra Baldoino, Priscilla Manhães, Pedro, Dona Regina, Dona Lourdes e Dona Renata pelo companheirismo, amizade e por apesar da distância estarem sempre ao meu lado me apoiando de alguma forma;

Aos colegas e companheiros do mestrado e as pessoas que não me lembrei de agradecer, mas que de alguma forma contribuíram para esse trabalho, que considero mais uma vitória em minha vida.

“Melhor é serem dois do que um,... Porque se um cair, o outro levanta o seu companheiro; mas ai do que estiver só, pois caindo, não haverá outro que o levante”

Eclesiastes 4: 9 -10

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS..... | xi |
| LISTA DE FIGURAS..... | xiii |
| RESUMO..... | xiv |
| ABSTRACT..... | xvi |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 01 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 04 |
| 2.1 Fósforo e suas transformações no solo..... | 04 |
| 2.2 Importância das coberturas vegetais para a ciclagem do Po e recuperação de áreas degradadas..... | 06 |
| 2.3 Fósforo orgânico..... | 08 |
| 2.4 Determinação do Po..... | 10 |
| 2.4.1 Po total..... | 10 |
| 2.4.2 Po lábil..... | 12 |
| 2.5 Mineralização do Po..... | 13 |

| | |
|--|----|
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 18 |
| 3.1. Descrição da área de coleta..... | 18 |
| 3.2. Caracterização dos sítios experimentais..... | 18 |
| 3.3. Análise química e física do solo e serapilheira..... | 21 |
| 3.4. Incubação do solo..... | 22 |
| 3.5. Determinação do Po total..... | 23 |
| 3.6. Determinação do Po lábil..... | 26 |
| 3.7. Mineralização do Po..... | 27 |
| 3.8. Análises estatísticas..... | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 29 |
| 4.1. Frações de P antes da incubação dos solos..... | 29 |
| 4.2. Frações de P após incubação dos solos..... | 31 |
| 4.3. Influência da extração ácida e alcalina sobre o Po antes e após incubação dos solos..... | 37 |
| 4.4. Influência da adição de serapilheira sobre as frações de P dos solos incubados..... | 38 |
| 4.5. Mineralização de Po total e Po lábil..... | 41 |
| 4.5. Correlações..... | 48 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES..... | 50 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Valores de pH e teores de atributos químicos de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais. ----- 21
- Tabela 2.** Composição granulométrica de amostras de solos sob diferentes coberturas vegetais. ----- 21
- Tabela 3.** Teor de P total da serapilheira de diferentes coberturas vegetais. ---- 22
- Tabela 4.** Frações de P_i , P_o e P total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais antes da incubação.-----31
- Tabela 5.** Frações de P_i , P_o e P total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais, após 60 dias de incubação. ----- 32
- Tabela 6.** Frações de P_i , P_o e P total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais, após 173 dias de incubação.-----34

| | |
|--|----|
| Tabela 7. Relação (P_i/ P total) e (P_o/ P total) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.----- | 35 |
| Tabela 8. Relação P_i lábil/ P total lábil (P_{iL}/ PTL) e P_o lábil/ P total lábil (P_{oL}/ PTL) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.----- | 37 |
| Tabela 9. Relação ($P_o H^+/ P_oT$) e ($P_o OH^+/ P_oT$) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.----- | 38 |
| Tabela 10. Frações de P_i , P_o e P total nas formas lábil e total em amostras de solo e solos com adição de serapilheira sob diferentes coberturas vegetais após 60 dias de incubação.----- | 40 |
| Tabela 11. Frações de P_i , P_o e P total nas formas lábil e total em amostras de solo e solos com adição de serapilheira sob diferentes coberturas vegetais após 173 dias de incubação.----- | 41 |
| Tabela 12. Relação C_o Total/ P_o Total de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais----- | 44 |
| Tabela 13. Mineralização de P_o total e P_o lábil em amostras de solo e solos com adição de serapilheira sob diferentes coberturas vegetais após 60 dias de incubação.----- | 47 |
| Tabela 14. Mineralização de P_o total e P_o lábil em amostras de solo e solos com adição de serapilheira sob diferentes coberturas vegetais após 173 dias de incubação. ----- | 48 |
| Tabela 15. Coeficiente de correlação linear entre P_o total, e P_o lábil com algumas características de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.----- | 49 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Diagrama esquemático da mineralização do Po e imobilização de Pi por microrganismos.-----14
- Figura 2.** Fotos das coberturas de acácia, sabiá, capoeira e pasto onde foram coletadas as amostras de solo.-----20
- Figura 3.** Diagrama esquemático da extração sequencial de Po do solo.-----25
- Figura 4.** Diagrama esquemático do cálculo de Po total estimado.-----26
- Figura 5.** Diagrama esquemático do procedimento e cálculo utilizado para quantificação do Po lábil (Pol).-----27

RESUMO

Nunes, Danielle Aparecida Duarte; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Julho, 2011. **Mineralização de fósforo orgânico em solos sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem.** Orientador: Antonio Carlos da Gama-Rodrigues. Co-orientadora: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Em razão da baixa disponibilidade de P em solos mais intemperizados, o P orgânico (Po) pode ser uma importante fonte de fósforo (P) às plantas através da decomposição e mineralização da fração de Po lábil. As espécies florestais, especialmente as leguminosas arbóreas, adicionam grande quantidade de Po através da deposição de serapilheira. A mineralização de Po foi avaliada em amostras de quatro coberturas vegetais (*Mimosa caesalpinifolia* (sabiá), *Acacia auriculiformes* (acácia), capoeira e pasto), coletadas na profundidade de 0-10 cm. As amostras de solo foram coletadas em um Latossolo Vermelho Amarelo no município de Conceição de Macabu, RJ, e posteriormente incubadas em laboratório, por 60 e 173 dias a 40°C. O Po total foi obtido por meio do método de extração com HClO₄ e NaOH e o Po lábil, pelo método de extração com NaHCO₃. Foi encontrada maior quantidade de Po total pela extração ácida do que alcalina. A maior extração alcalina foi observada na capoeira. Os teores de Po total encontrados antes da incubação dos solos variaram entre 51,04 mg kg⁻¹ e 123,18

mg kg⁻¹ e foi maior para as leguminosas, representando de 19,20% a 30,69% do P total. Após 60 dias de incubação dos solos, o teor médio de Po total encontrado nas coberturas diminuiu 21,53%, apresentando uma mineralização que variou entre -61,43 e +34,15 mg kg⁻¹. Ao final dos 173 dias de incubação, a redução do Po total foi de 23,24%, e a mineralização variou entre -41,69 e +9,29 mg kg⁻¹. Após os dois tempos de incubação, a maior mineralização de Po total foi no solo do sabiá. A mineralização de Po total foi em média 91,65% maior para as coberturas que receberam serapilheira. Em relação aos teores de Po lábil, antes da incubação, o Po lábil representou em média 66% do P lábil total, apresentando teor médio de 4,93 mg kg⁻¹, que foi menor para o pasto. Após incubação de 60 dias, a serapilheira possibilitou maior teor apenas para o solo sob acácia (8,36 mg kg⁻¹), apresentando uma mineralização de -1,58 mg kg⁻¹ de Po lábil, enquanto após 173 dias, foi encontrada mineralização de Po lábil nos solos de acácia e sabiá que tiveram ou não adição de serapilheira, apesar de ter sido maior no solo da acácia (-1,13 mg kg⁻¹). O C orgânico total (Co) correlacionou-se positivamente com Po lábil, P disponível por Mehlich-1 e com argila. Foram verificadas correlações positivas entre Po total e pH do solo e entre Po lábil e P disponível por Mehlich-1. Havendo correlação negativa entre pH e argila. Através da deposição de serapilheira, as coberturas vegetais influenciaram em diferentes quantidades de Po total e Po lábil nos solos. A pequena redução na quantidade de Po total (2,19%) após 60 dias de incubação, indica que esse tempo foi suficiente para liberar P disponível de fontes mais lábeis. As maiores mineralizações de Po lábil encontradas nos solos sob as coberturas de acácia e sabiá indicam que dentre as coberturas estudadas, elas são as principais fornecedoras de P para o sistema.

ABSTRACT

Nunes, Danielle Aparecida Duarte; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. July, 2011. **Mineralization of organic phosphorus in forest soils under legumes, secondary forest and pasture.** Advisor: Antonio Carlos da Gama-Rodrigues. Co-advisor: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Due to the low availability of P in weathered soils, organic P (Po) can be an important source of P to plants through decomposition and mineralization of the labile fraction of Po. Forest species, especially leguminous trees, add large amounts of dust through the deposition of litter. Po mineralization were evaluated in four cover crops (*Mimosa caesalpinifolia* (sabiá), *Acacia auriculiformis* (Acácia), secondary forest and pasture) were collected at a depth of 0-10 cm. Soil samples were collected in an Oxisol in the Conceição de Macabu county, RJ, and incubated in the laboratory for 60 and 173 days at 40 °C. The total dust was obtained through extraction with HClO₄ and NaOH Po and labile, the method of extraction with NaHCO₃. There was more total amount of Po extracted by acid than alkaline. Most alkaline extraction was observed in capoeira. The total dust levels found before incubation of the soils ranged from 51.04 mg kg⁻¹ to 123.18 mg kg⁻¹ and was higher for legumes, representing 19.20% to 30.69% of total P. After 60 days of incubation of the soil, the average total dust found on the roof fell

21.53%, a mineralization that ranged between -61.43 and +34.15 mg kg⁻¹. At the end of 173 days of incubation, the total reduction of Po was 23.24%, and mineralization ranged between -41.69 and +9.29 mg kg⁻¹. After two days of incubation, most of Po mineralization in the soil was full of thrush. Total mineralization was on average 91.65% higher for the roofs receiving the litter. Regarding the levels of labile Po, before incubation, the labile Po represented on average 66% of the total labile P, with an average grade of 4.93 mg kg⁻¹, which was lower for the pasture. After incubation for 60 days, the highest level possible only litter to the soil under Acacia (8.36 mg kg⁻¹), with a mineralization -1.58 mg kg⁻¹ of labile Po, while after 173 days, was found mineralization in soil labile Po acacia and knew they had or not adding litter, although it was higher in the soil of acacia (-1.13 mg kg⁻¹). Total organic C (Co) correlated positively with labile Po, available P by Mehlich-1 and clay. We found positive correlations between total dust and soil pH between Po and labile and available P by Mehlich-1. Having negative correlation between pH and clay. Through Litterfall, influenced the vegetation covers in different amounts of total Po and Po in labile soil. The slight reduction in the total amount of Po (2.19%) after 60 days of incubation, indicates that this time was sufficient to release available P sources more labile. The more labile Po mineralization found in the soil under the canopy of acacia trees and knew indicate that among the coverages studied, they are the leading supplier of P to the system.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos nutrientes essenciais para a sobrevivência das plantas, estando presente em componentes estruturais das células, como nos ácidos nucleicos e fosfolipídios das biomembranas, e também em componentes metabólicos móveis armazenadores de energia, como o ATP (Gatiboni, 2003). Por esta razão, o P é um dos nutrientes que tem merecido maior preocupação, devido à sua baixa disponibilidade natural em solos mais intemperizados (Matos et al., 2006) e argilosos.

Na maioria dos solos dos trópicos úmidos, o P é considerado um dos nutrientes mais limitantes à produtividade das culturas (Acquaye, 1963; Fernandes et al., 2002; George et al., 2006; Galvão e Salcedo, 2009), visto que as condições de intenso intemperismo nesses solos, promovem redução da fração de P disponível, quase sempre abaixo das exigências mínimas das culturas. Essa característica está associada à alta capacidade que esses solos têm em reter o P na fase sólida do solo (Santos et al., 2008b). Assim, os solos passam gradualmente de fonte, para dreno de P, competindo com a planta (dreno) pelo P adicionado (Novais e Smith, 1999).

O modelo de disponibilização deste nutriente para as plantas considera dois compartimentos interligados, isto é, a solução do solo, que constitui o fator intensidade (I), e a fase sólida, que armazena os nutrientes que abastecem a

solução do solo, denominada de fator quantidade (Q), também chamada de fração lábil de P do solo. A cinética de como I é abastecida por Q, é chamada de fator capacidade (C), que representa a taxa de recomposição de I por Q (Gatiboni et al., 2002).

O fósforo do solo encontra-se distribuído na forma orgânica (Po) e inorgânica (Pi) (Guerra et al., 1996). Os métodos de avaliação da fertilidade do solo enfocam a fração inorgânica de P como indicadora da disponibilidade deste nutriente para as culturas, apesar da fração orgânica contribuir significativamente para o fornecimento de P às plantas (Novais e Smith, 1999).

Em condições onde a disponibilidade de P é baixa, o Po constitui-se em importante fonte desse nutriente às plantas através da decomposição e mineralização da fração lábil de Po (Po lábil), que é facilmente mineralizada, contribuindo com a disponibilidade de P para as plantas (Santos et al., 2008a). A mineralização é mediada por enzimas fosfatases, produzidas por plantas e microrganismos do solo, que catalisam a hidrólise dos componentes orgânicos de P (George et al., 2006), liberando Pi para a solução do solo, disponível para as plantas (Guerra et al, 1996).

A avaliação da mineralização do Po é importante porque é um indicativo da quantidade de P que pode ser liberado com o tempo para o sistema solo-planta, diferenciando-se dos tradicionais métodos de determinação do P disponível, que consistem em apenas uma extração, não refletindo, portanto a real capacidade do solo em suprir P para as plantas (Saggin et al., 2002).

A quantidade de Po mineralizado pode ser obtida através da determinação do Po pelo método de extração, ou pelo método de ignição. O primeiro método é mais indicado para amostras de solos em estágio avançado de intemperismo. Entre os métodos de extração, o método proposto por Bowmam (1989) é considerado mais rápido e preciso. Enquanto a quantidade de Po lábil mineralizado é estimado através da determinação do Po lábil pelo método de extração com NaHCO_3 de Bowman e Cole (1978).

A exploração agrícola inadequada dos solos promove um desequilíbrio no ecossistema (Araújo et al., 2004a), resultando em alterações negativas nas propriedades do solo (Muller et al., 2001) e conseqüentemente na fertilidade deste. A recuperação desses solos pode ser conseguida através da revegetação por espécies florestais de rápido crescimento, especialmente as leguminosas

arbóreas, inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos (Jesus et al., 2005), que se caracterizam pela associação com bactérias fixadoras de N atmosférico (N_2) e fungos micorrízicos que promovem melhoria na absorção de nutrientes e água, resultado da extensa rede micelial que aumenta a zona de absorção radicular e o volume de solo explorado (Carvalho et al. 2003). Esta é uma tecnologia de baixo custo e viável, pois promove a melhoria do solo através da formação de serapilheira, que ao ser decomposta promove adição de matéria orgânica e reciclagem de nutrientes no solo (Leitão, 1997). A mineralização do Po presente na matéria orgânica depositada no solo fornece Pi disponível às plantas, além disso, a matéria orgânica contribui para o aumento de Pi no solo, ao competir pelos sítios de adsorção da fase sólida do solo (Andrade et al., 2003).

Neste contexto, estudos sobre Po em solos sob diferentes coberturas vegetais, poderiam fornecer importantes subsídios para a compreensão do ciclo de P e elaboração de práticas de manejo da fertilização fosfatada que visem maximizar a capacidade produtiva dos solos de maneira sustentável. Dessa forma, objetivou-se neste trabalho: (1) verificar a influência das coberturas vegetais sobre o teor de fósforo orgânico dos solos; (2) avaliar a contribuição das frações lábeis de fósforo, distinguindo a participação da fração orgânica lábil (Po lábil) antes e após incubação dos solos; (3) avaliar a influência da adição de serapilheira sobre o teor de Po e Po lábil do solo; (4) determinar o teor de Po total e Po lábil mineralizado após o período de incubação dos solos, com e sem adição de serapilheira; e (5) relacionar o teor de Po total e Po lábil com o teor de argila e com alguns atributos químicos do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fósforo e suas transformações no solo

O P é crucial para o metabolismo das plantas, por ser componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese (Grant et al., 2001).

No solo, esse nutriente é proveniente do material de origem, denominado rocha, que segundo Anjos et al. (2008) é um material inorgânico, sólido e maciço, constituído predominantemente de minerais primários ou formados a partir da cristalização de soluções concentradas em determinados elementos. A atuação do intemperismo sobre a decomposição e alteração dos minerais primários e secundários para formar compostos de maior estabilidade, sob influência do clima e atividade biológica, promove a transformação de minerais primários em argilas 2:1. Com a continuação dos processos estas argilas são alteradas para argilas mais simples 1:1 e, ou óxidos, e outras substâncias de complexidade variável, entre elas, os minerais fosfatados. Estes podem estar precipitados, associados ou adsorvidos a superfícies de minerais secundários (Santos et al., 2008a),

disponibilizando elementos químicos e influenciando o fluxo de nutrientes no solo (Clemente & Azevedo, 2007).

Com o aumento do grau de intemperismo, há uma mudança gradual das características de um solo, no sentido de torná-lo menos eletronegativo e, portanto, mais eletropositivo, com mudanças direta ou indiretamente ligadas a esse perfil de carga. Sua capacidade de troca catiônica e a saturação por bases diminuem, enquanto cresce a retenção de ânions, como o fosfato (Duda, 2000).

O P pode ser precipitado pelas formas iônicas de Fe, Al e Ca na solução do solo, devido à sua grande afinidade a esses íons. Além disso, o P pode ser adsorvido pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, que se apresentam em grandes quantidades de modo particular em solos mais intemperizados e argilosos, podendo estar ocluso, retido no interior dos minerais em solos mais geneticamente evoluídos. Essas formas de retenção do P no solo, fazem com que haja pouco P presente na solução do solo disponível para as plantas (Novais e Smith, 1999), que absorvem este nutriente nas formas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (Novais et al., 2007; Borie e Rubio, 2003). Dessa forma, apesar de o teor total de P dos solos encontrar-se, de modo geral, entre 200 e 3000 mg Kg^{-1} de P, menos de 0,1% desse total encontra-se na solução do solo, disponível para as plantas (Novais et al., 2007).

A disponibilidade do P é muitas vezes descrita pelo grau de labilidade desse nutriente no solo, ou seja, pela forma e interação que o P está sofrendo pelos sítios de adsorção do solo. Se o mesmo está em solução ou fracamente adsorvido, então está na forma lábil, se está adsorvido com maior força nas argilas e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, então o grau de interação é que regulará a labilidade do P (Pavinato e Rosolem, 2008). Logo, o fósforo lábil, também denominado de “fator quantidade” (Q), indica o tamanho do estoque de P que irá repor retiradas do P em solução, onde o aumento do P em solução, também denominado de “fator intensidade” (I), implica aumento do P lábil, e vice-versa. Todavia, os solos diferem quanto à sensibilidade do P lábil a alterações do P em solução, e essa resistência do solo a mudar o P lábil, como consequência de mudanças no P em solução, denominada de Fator Capacidade de P do solo (FCP) ou poder tampão do solo, é maior em solos mais intemperizados e argilosos, devido a esses solos manterem o P em solução mais constante, quando submetidos à adição ou à retirada de P (Novais & Smith, 1999).

O P é encontrado no solo em duas formas: fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po). As formas de Pi compreendem, principalmente, aquelas adsorvidas aos grupos funcionais dos colóides inorgânicos, cuja energia de ligação com os colóides aumenta, na ordem inversa à sua labilidade, enquanto as formas de Po representam os íons fosfatos ligados aos compostos orgânicos, em que sua labilidade está diretamente relacionada à suscetibilidade de decomposição do radical orgânico ao qual o fosfato está ligado (Gatiboni et al., 2008).

Em solos como os Latossolos altamente intemperizados e Argissolos, que juntos representam até 70% de solos deficientes em P do mundo, o P encontra-se fortemente fixado, dessa forma, a ciclagem do P orgânico ao invés da liberação do Pi ligado à parte sólida do solo em equilíbrio com a solução do solo, assume especial importância (George et al., 2006). A formação de serapilheira e a transformação gradual do Po presente no material orgânico da serapilheira em Pi a partir da sua mineralização, fazem com que em solos mais intemperizados, o substrato mineral do solo não se envolva no equilíbrio atualmente existente, solucionando, por exemplo, o problema de manutenção de P das árvores como as de florestas tropicais, que absorvem o P proveniente da serapilheira, sem o acesso da fase mineral desses solos a essa fonte de P (Novais et al., 1998).

Plantios que propiciem adição de resíduos orgânicos e o acúmulo de formas orgânicas de P nos solos, principalmente nos mais ácidos e argilosos, com maior FCP, condições que limitam nos trópicos a disponibilidade deste nutriente, podem ser de grande importância para a agricultura nos trópicos. Sobretudo para a agricultura de baixa ou nenhuma utilização de insumos, por ser uma forma de suprir o P, e inclusive outros nutrientes gradualmente (Novais et al., 2007).

2.2. Importância das coberturas vegetais para a ciclagem do Po e recuperação de áreas degradadas.

A exploração agrícola e florestal intensivas, visando o ganho de produtividade, sem que haja preocupação com a sustentabilidade do solo, promove modificações negativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Júnior e Melo, 2000). O que resulta em alterações no estoque e no fluxo

de nutrientes, em magnitude que variam com as condições iniciais do solo, clima, material genético utilizado e com as técnicas de manejo adotadas (Gama-Rodrigues et al., 2008).

A recuperação de áreas degradadas torna-se necessária para a racionalização do uso da terra e melhoria da qualidade ambiental, e para tal, pode ser realizada a implantação de espécies vegetais facilitadoras da sucessão natural, em locais onde, a princípio, uma série de barreiras impede o desenvolvimento do processo. São apontadas como características desejáveis de espécies para plantios de reabilitação, a capacidade de estabelecimento em condições limitantes, a atração da fauna, o crescimento rápido e a grande deposição de serapilheira (Chada et al., 2004).

Fatores como tipo de vegetação, decíduosidade, estágio sucessional, altitude, latitude, precipitação, disponibilidade hídrica, temperatura, luminosidade, relevo, e características do solo, fazem com que as espécies vegetais apresentem diferenças na produção e conseqüentemente no acúmulo da serapilheira depositada, que junto à qualidade da serapilheira, modificam a velocidade de decomposição e a liberação de nutrientes para o solo, pois a fração lábil ou ativa da matéria orgânica do solo, embora pequena, é importante pela rápida taxa de ciclagem, em poucas semanas ou meses, ao contrário da fração passiva, em que a ciclagem ocorre lentamente (Parron et al., 2003).

Dentre as espécies mais promissoras para a restauração de solos empobrecidos estão as espécies de leguminosas arbóreas, que não só protegem o solo, e promovem melhoria do solo pela adição de matéria orgânica (Marinho et al., 2004), como participam vantajosamente da ciclagem de nutrientes, pela associação com bactérias que fixam o N_2 atmosférico (Leitão, 1997) e fungos micorrízicos que promovem melhoria na absorção de nutrientes (Melloni et al., 2000).

Costa et al. (2004) avaliaram o aporte de nutrientes pela serapilheira em área degradada e revegetada com leguminosas arbóreas e verificaram que na revegetação, o aporte de P variou de 4,9 a 7,9 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, sendo igual ou superior ao observado para a capoeira, de 4,9 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ em média. Estes autores concluíram que a revegetação com leguminosas, em áreas degradadas, adiciona, relativamente, em pouco tempo, grande quantidade de matéria orgânica por meio da produção de serapilheira, favorecendo a ciclagem de nutrientes e o

processo de recuperação, visto que alcançou valores na magnitude observada para a capoeira vizinha.

Silva (2005) estudando as mesmas coberturas do presente trabalho (*Mimosa caesalpinifolia* (sabiá), *Acacia auriculiformes* (acácia), capoeira e pasto) observou que houve alterações significativas na fertilidade do solo, como por exemplo, maior teor de P no solo sob a acácia (5,26 mg dm⁻³), que nas coberturas de sabiá (4,42 mg dm⁻³), capoeira (4,05 mg dm⁻³) e pasto (3,88 mg dm⁻³) na camada de 0-5 cm, indicando maior mineralização deste nutriente da serapilheira da acácia.

A mineralização da serapilheira depositada sobre o solo constitui o principal meio de aumentar a disponibilidade de fósforo em solos com baixa disponibilidade desse elemento, sendo por isso, de grande importância para solos tropicais (Acquaye, 1963). Nas florestas tropicais, a formação da serapilheira, associada a altas taxas de decomposição de matéria orgânica atende parte da demanda de P pelas plantas, através da ciclagem de resíduos orgânicos, possibilitando o acúmulo de Po no solo (Zaia, 2005). Além disso, a matéria orgânica pode diminuir a adsorção e, ou precipitação de fosfato pela liberação de ácidos orgânicos, que competem pelos sítios de adsorção, ou pela formação de compostos com o fosfato na solução do solo e, ou, formação de complexos com Al e Fe (Pavinato e Rosolem, 2008), resultando em maior aproveitamento de P pelas plantas.

2.3. Fósforo orgânico

As pesquisas de modo geral, dão forte ênfase ao fósforo inorgânico (Pi) em relação ao fósforo orgânico (Po), isso parece ser consequência de uma agricultura de grandes insumos e de uma pequena ou nula preocupação ambiental (Novais e Smith, 1999). Apesar disso, nos trópicos, em ambientes agrícolas ou florestais não manejados à base de altas quantidades de fertilizantes, o Pi proveniente da mineralização da fração orgânica de P depositada no solo, assume em relação ao Pi presente no solo, uma contribuição superior na conservação do P disponível às plantas, por reduzir os

efeitos do processo de adsorção do Pi, pela fase mineral do solo (Cunha et al., 2007).

Sistemas naturais como florestas e campos nativos, conseguem se manter sem adição de fertilizantes fosfatados, mesmo em solos com baixa disponibilidade de fósforo. Nesses sistemas, o P disponível é controlado pela ciclagem do P orgânico (Conte et al., 2002).

Os teores de Po encontrados nos solos são bastante variáveis, indo de 15% a 80%, onde as maiores proporções são observadas em solos orgânicos ou horizontes ricos em matéria orgânica, como os de solos sob florestas (Silva e Mendonça, 2007). Isso foi observado por Cunha et al. (2007), que estudando duas florestas naturais, eucalipto e pastagem, verificaram que o teor médio de Po total nos solos florestais (160 mg kg^{-1}), foi maior que nos solos sob pastagem ($69,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Esses autores encontraram correlação positiva entre os teores de Po e carbono orgânico (Co) e sugeriram que o uso do solo por atividade em que a extração de nutrientes e a taxa de mineralização são mais intensas, como no caso das pastagens, ocorre perda de Co e, conseqüentemente, de Po.

Borie e Rubio (2003) estudando o conteúdo de fósforo total (P total) e Po em solos agrícolas e florestais do Sul do Chile, verificaram que a quantidade de P total em solos vulcânicos (formados por depósitos de cinzas vulcânicas), variou de 354 a 1.414 mg kg^{-1} , e que em solos não vulcânicos variou de 357 a 413 mg kg^{-1} , de acordo com o grau de evolução e gênese. Eles também observaram que apesar de encontrar em solos florestais menores quantidades de P total em relação a solos agrícolas, o Po representou mais de 50% do P total em florestas.

Busato et al. (2005) observaram em Cambissolo, que o teor de Pi foi superior ao do Po, independente do manejo adotado na lavoura de cana (cana crua, cana queimada, cana com vinhaça e cana sem vinhaça) na camada de 0-0-20 m. Além disso, verificaram maior participação de Pi na cana colhida sem queima (1.917 mg kg^{-1} de Pi), que representou 84 % do teor de P total, e foi 335 % superior à quantidade de Pi na área onde a cana foi colhida com queima (441 mg kg^{-1}). Os autores sugeriram que o maior teor de Pi se deve, provavelmente, à mineralização dos resíduos de cultivo ou da matéria orgânica humificada do solo, favorecendo principalmente o compartimento disponível.

Zaia et al. (2008b), em agrossistemas de cacau, também verificaram que em Latossolos e Cambissolos o teor médio de Pi total (281,8 mg kg⁻¹ e 1044,45 mg kg⁻¹, respectivamente) foi maior que o de Po (76,7 mg kg⁻¹ e 426,4 mg kg⁻¹ respectivamente). Apesar disso, a fração de Po lábil (15,2 mg kg⁻¹ em média) desses solos, predominou sobre a fração de Pi lábil (12,2 mg kg⁻¹ em média), especialmente nos Latossolos, onde a contribuição de Po lábil foi 81% superior à do Pi lábil, quando comparados aos Cambissolos que apresentaram contribuição do Po lábil 21% superior à do Pi lábil.

Em um estudo envolvendo 17 solos de diversas classes, Guerra et al. (1996), observaram estreita correlação do Po com o P disponível para as plantas, o Po lábil representou acima de 60% do P lábil total, contribuindo em média com 26% do Po total. Esses autores também encontraram correlação positiva entre o Po lábil e o P disponível em Argissolos e Latossolos, o que segundo eles, demonstra que em solos onde os teores disponíveis são baixos, embora a disponibilidade do fósforo seja amplamente controlada pelo equilíbrio (FCP) entre o Pi na solução (I) e o Pi na fase sólida (C), a contribuição potencial da fração orgânica poderia estar subestimada em determinadas situações de clima, solo e cobertura vegetal. Isso evidencia a grande contribuição da fração orgânica na disponibilidade de P no solo, de forma que apenas a determinação do Pi, subestimaria o potencial de P disponível (Bowman e Cole, 1976).

2.4. Determinação do fósforo orgânico

2.4.1. Fósforo orgânico total (Po total)

A determinação do Po total do solo pode ser realizada empregando o método de extração (Mehta et al., 1954) ou método de ignição (Saunders e Williams, 1955). O primeiro método consiste na solubilização das substâncias orgânicas através da adição de ácido e, em seguida, aumentando o pH do meio pela adição de solução alcalina, realizando-se a determinação de Pi no extrato ácido e alcalino. Parte dos dois extratos é digerido para a determinação do P total, obtendo-se o Po pela diferença entre o P total e o Pi das duas extrações (extração ácida e alcalina), encontrando-se o teor de Po total através da soma do teor de Po das duas extrações. O segundo método consiste na obtenção do

Po a partir da mineralização deste a 550°C em forno de mufla seguida por extração ácida, comparado a amostras não ignificadas (Santos et al., 2008a).

Segundo (Condrón et al., 1990), o método de extração, pode promover extração incompleta, hidrólise do Po e baixa reprodutibilidade dos valores de Po total devido à utilização de duas etapas na extração (extração ácida e alcalina). Esses autores verificaram em amostras de solos do nordeste brasileiro e de 3 solos de Gana, maior coeficiente de variação (CV), utilizando o método de extração de A & M com modificações (Anderson, 1960), com CV de 15% em média e utilizando o método de extração de BOW (Bowman, 1989), com CV de 11% em média, do que utilizando o método de ignição de S & W (Saunders e Williams, 1955), com CV de 6,4% em média. Apesar disso, segundo eles, o método de ignição pode apresentar problemas de superestimativa, por aumento da solubilidade do Pi das amostras ignificadas ou de subestimativa, pois durante a queima da matéria orgânica, podem ocorrer volatilização, destruição do fósforo orgânico, mineralização incompleta do Po e recuperação incompleta do P após a mineralização. Esses autores verificaram maiores quantidades de Po total ao utilizar o método de ignição de S & W (209 mg kg⁻¹ em média), em relação ao encontrado pelo método de extração de A & M (78 mg kg⁻¹ em média) e BOW (88 mg kg⁻¹ em média), sugerindo que os maiores valores de Po total encontrados pelo método de ignição se devem à complexação e, ou precipitação do Pi com AL e Fe, o que reflete em menores valores de Pi e maiores valores de Po total. Portanto, o método de ignição seria menos indicado para solos mais intemperizados, onde parte do Pi não é extraído, por ser perdido durante a ignição, resultando em aumento dos valores de Po total.

De acordo com Bowman (1989), os métodos podem não exprimir um valor de Po total definitivo, pois maiores valores de Po total obtidos por um método em relação a outro, pode não significar maior quantidade de Po total no solo, mas sim o aumento da solubilidade do P, sugerindo que um método desejável seria aquele que mantivesse a facilidade do método de ignição, preservasse praticamente todo o P orgânico no extrato e recuperasse a maior quantidade de P em forma inalterada.

Guerra (1993), ao comparar o método de extração proposto por B & C (Bowman e Cole, 1978) e por BOW (Bowman, 1989) com o método de ignição proposto por S & W (Saunders e Williams, 1955), verificou que em solos

brasileiros, os menores valores de P_i+P_o foram obtidos para B & C, quando comparado ao método de BOW e S & W. Esse autor também verificou maiores valores de P_i utilizando o método de BOW e S & W. Portanto, ao observar uma subestimativa do conteúdo de P_o encontrada pelo método de B & C, em relação ao de BOW e S & W, sugere que esta subestimativa ocorreu devido à baixa recuperação de P_o+P_i e P_i encontrada, por este método atuar sobre uma parte pequena do P total do solo, enquanto a superestimativa dos valores de P_o encontrados com S & W em relação aos outros métodos, foi em decorrência da baixa recuperação de P_i , influenciada pela alteração na solubilidade dessa fração pela ignição.

Outra vantagem encontrada com a utilização do método de Bowman (1989), é que este método possibilitou hidrólise mínima de ésteres de P orgânico, pela utilização de ácido sulfúrico concentrado (18M), onde aproximadamente 100% do P_o foi recuperado com a extração.

De acordo com Guerra et al. (1996), o método de extração proposto por Bowman (1989), consegue aliar praticidade e acurácia na caracterização do P_o total de amostras de solos com estágio avançado de intemperismo. Porém, por se tratar de uma medida indireta que requer a determinação do P total e P_i para obtenção do P_o pela diferença entre essas formas de P, e por necessitar de duas etapas de extração (extração ácida e alcalina) nas determinações, esta é uma determinação lenta, exigindo muita atenção, pois erros na determinação do P total e, ou P_i , comprometeriam a estimativa do conteúdo de P_o do solo.

2.4.2. Determinação do fósforo orgânico lábil (P_o lábil)

Além da determinação de P_o total, a determinação da fração de P_o lábil também é importante, pela indicação dos principais compartimentos de P_o que poderão ser acessados pelas plantas (Duda, 2000). A determinação de P_o lábil pode ser feita utilizando o método de extração de Bowman e Cole (1978), que extrai formas de P em ordem crescente de solubilidade ou de disponibilidade para as plantas, desde lábeis até não lábeis (fração lábil, moderadamente lábil, moderadamente resistente e altamente resistente). As formas de P extraíveis com NaHCO_3 , correspondem à fração de P lábil, que é facilmente mineralizada,

contribuindo com a disponibilidade de P para as plantas (Santos et al., 2008a). A quantificação do Po lábil também é uma medida indireta, estimada pela diferença entre o P total lábil determinado após digestão do extrato e o Pi lábil, ambos extraídos por NaHCO_3 (Bowman e Cole, 1978).

Bowman e Cole. (1976), estudando as transformações do Po de certos substratos (3 nucleotídeos, ácido ribonucléico (RNA), glicerofosfato e Na-fitato) extraídos com NaHCO_3 , em solos sob pastagens, observaram que RNA e glicerofosfato foram recuperados na solução NaHCO_3 na extração imediata (zero dias), enquanto para o Na-fitato o Po não foi recuperado, o que segundo eles pode ter ocorrido por este composto ter sido adsorvido pela argila ou complexos húmicos, verificado que após incubação desses substratos durante 18 dias para o Na-fitato, 18 dias para o glicerofosfato, 3 dias para o RNA e 3 dias para os 3 nucleotídeos, a mineralização líquida do Po lábil foi de 3,3%, 72,3%, 75 % e 62,5% em média, respectivamente. Esses autores sugerem que as perdas de P ocorreram devido à imobilização por reações de precipitação para o Na-fitato e por absorção microbiana para os outros substratos.

Apesar de o método de determinação de Po lábil de Bowman e Cole. (1976) se tratar de uma prática rápida e de simples execução, que em uma única extração determina o Po lábil, por ser uma medida indireta, também requer atenção, de forma a evitar que erros na determinação do P total lábil e, ou Pi lábil, comprometam a estimativa do conteúdo de Po lábil do solo.

2.5. Mineralização do Fósforo orgânico

A mineralização do fósforo orgânico (Po) do solo pode ser um indicador do potencial do solo em suprir a demanda de P pelas plantas, especialmente em solos onde a fração orgânica apresenta participação superior à do Pi. Isso porque, a degradação do Po presente no tecido vegetal promovida por enzimas fosfatases, produzidas por plantas e microrganismos, através da hidrólise de formas orgânicas de P, libera Pi para a solução do solo, tornando-o disponível para atender a demanda das plantas (Conte et al., 2002) (Figura 1).

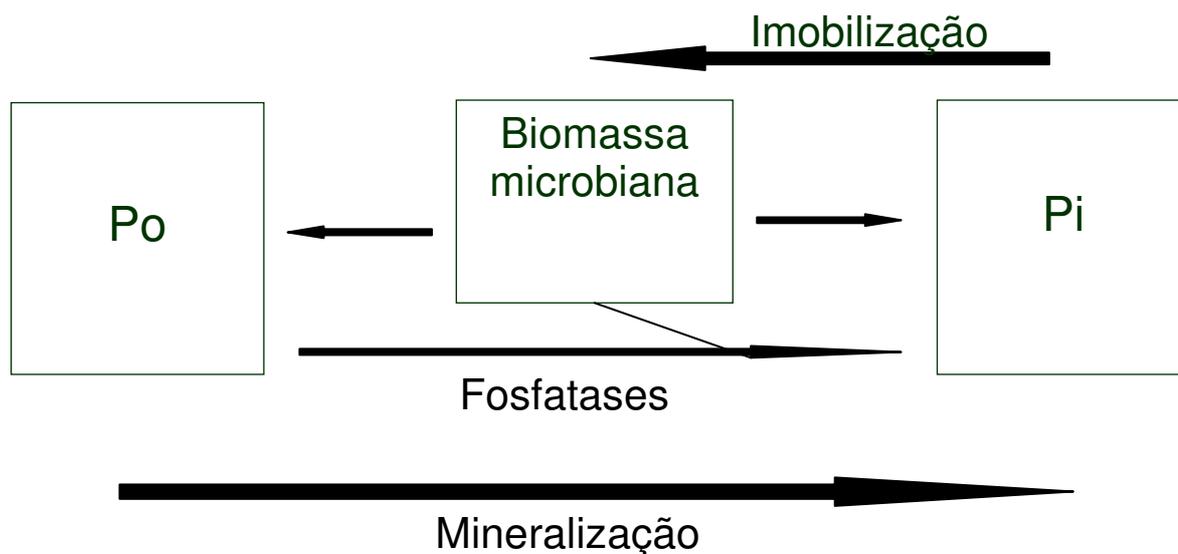


Figura 1. Diagrama esquemático da mineralização do Po e imobilização de Pi por microrganismos. Fonte. Saggari et al., 1998.

Nunes et al. (2008b) estudando a atividade de fosfatases em gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* e *Panicum maximum* cv. Tanzânia) em resposta à disponibilidade de fósforo no solo, encontraram efeito negativo de doses de P sobre a atividade da enzima ATPase, que foi em média, 2,78 e 2,54 vezes maior nas plantas com a menor dose de P na *Brachiaria* e no *Panicum*, respectivamente. Na atividade da RNase, essa mesma relação foi de 2,82 e 2,74 vezes maior. Esse resultado tem sido associado à maior remobilização de P, conferindo às plantas maior eficiência de utilização de P quando cultivadas em limitada disponibilidade deste nutriente. Isto explica o fato das plantas quando em condições de deficiência, utilizarem mecanismos que ativam a desfosforilação de compostos orgânicos, disponibilizando P inorgânico para manutenção do metabolismo celular como resposta adaptativa à baixa disponibilidade de P.

O processo de mineralização do Po do solo é influenciado por inúmeros fatores, em especial pelas condições ambientais que interferem na densidade e atividade microbiana e pela mineralogia do solo (Zaia, 2005). A intensidade da mineralização se relaciona positivamente com a quantidade relativa da forma orgânica em relação ao total, pH do solo e com a temperatura.

Bowman e Cole (1976), verificaram que o Po do solo, não se alterou significativamente após 3 meses de incubação sem controle da temperatura, e

que a quantidade de Po lábil extraída por NaHCO_3 de 0,5 a 6 horas, foi pequena, variando de 7,26 a 8,07 $\mu\text{g/g}$.

Acquaye (1963), estudou a mineralização de fósforo orgânico em amostras de solos de cacau em Gana mantidas a 50% da capacidade máxima de saturação do solo a cada 6 dias de incubação, e observou que a mineralização foi pequena durante 28 dias de incubação a 27 ° C, sendo substancial apenas após esse período, verificando que a quantidade de Po mineralizado em temperaturas de 40 °C (variando de 2,40 a 10,6 mg/ 100g de solo) e 50 °C (variando de 3,0 a 13,5 mg/ 100g de solo) após 14 dias de incubação, foi maior do que quando esses solos foram incubados por 70 dias a 27 ° C (variando de 1,8 a 7,5 mg/ 100g de solo).

A mineralização do Po também depende da qualidade da serapilheira adicionada ao solo. Em resíduos vegetais que possuem relação C/P abaixo de 200:1, com concentração de P acima de 2% ocorre a mineralização deste elemento (Novais e Smyth, 1999). Enquanto em resíduos que possuem relação C/P acima de 300:1 e concentração de P abaixo de 2%, ocorre o predomínio da imobilização do Pi pela biomassa microbiana sobre a mineralização (Cunha, 2002) para sua manutenção e crescimento. Apesar disso, o fósforo é reintroduzido na solução como Pi e, ou Po após a predação e, ou lise celular dos microrganismos (Guerra, 1993) (Figura 1).

Testes rotineiros de análises de solo são normalmente utilizados para monitorar o estado do P no solo em relação à sua disponibilidade às plantas e para definir requerimentos de fertilizantes para crescimento das culturas. Apesar disso, a determinação do P disponível em dado momento é uma medida estática e pode não refletir a real capacidade do solo de suprir as plantas, podendo haver uma subestimativa da capacidade do solo de fornecer fosfato, sendo de grande utilidade o estudo da mineralização do Po (Araújo et al., 2004b).

Gatiboni et al. (2002), verificaram em Latossolo, que uma única extração com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions (RTA) extraiu apenas 29, 35 e 37 % do fósforo potencialmente disponível, respectivamente. Foram necessárias sete extrações sucessivas com RTA e quatro com os extratores Mehlich⁻¹ e Mehlich⁻³ para extrair o fósforo potencialmente disponível, indicando que o solo tem uma capacidade de fornecimento de P bem maior que a medida por uma única extração. Essa informação pode ser corroborada por Araújo et al.

(2004b), que observaram em amostras de Latossolos, mantidos na umidade de 80% da capacidade máxima de saturação do solo a cada 15 dias de incubação, que o P extraído por dez extrações sucessivas com RTA, foi de duas a cinco vezes maior que o P extraído uma única vez, e de duas a nove vezes em Luvisolos, chegando a um limite de extração em torno de 1 kg ha^{-1} a partir da quarta extração nos Latossolos e da sexta, nos Luvisolos. Segundo esses autores, essa quantidade de P corresponde no perfil, a 11, 1 kg ha^{-1} em média nos Latossolos e $4,3 \text{ kg ha}^{-1}$ em média nos Luvisolos, que é suficiente para repor o P retirado por culturas de milho, feijão e algodão (1 a 5 kg ha^{-1}) no semiárido nordestino. Além disso, após quatro meses de incubação, o P extraído por RTA (uma extração), representou cerca de 20 a 30% dos teores obtidos inicialmente nos horizontes A ($1,8$ e $3,3 \text{ mg kg}^{-1}$) e 50 a 90% nos subsuperficiais ($1,1$ e $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$), apontando para um bom potencial de recuperação de P nestes solos.

Em uma avaliação do efeito do cultivo mínimo em comparação ao convencional, sobre a mineralização do Po, durante um período de incubação de 254 dias, Kingery et al. (1996) encontraram aproximadamente, uma duplicação das concentrações de Po após a incubação dos solos ($99,6 \text{ mg kg}^{-1}$ e $141,9 \text{ mg kg}^{-1}$ em média, respectivamente) em relação às concentrações obtidas antes da incubação (49 mg kg^{-1} e 78 mg kg^{-1} em média, respectivamente). Os autores também verificaram maiores teores de P disponível na presença de resíduos orgânicos, sugerindo, que os ácidos orgânicos dos resíduos formam complexos estáveis com Fe e Al, bloqueando conseqüentemente os sítios de retenção de P.

Duda (2000), em um ensaio de incubação durante 7 dias, com 14 classes de solos do Brasil sob diferentes cultivos, observou que na maioria dos solos estudados houve contribuição do Po para o P disponível e que, no geral, os valores percentuais de fósforo orgânico lábil (Po lábil) em relação ao P total lábil ultrapassaram 50%, chegando a 92%. O autor encontrou também, coeficientes de correlação positivos e significativos entre o Po lábil e P mineralizado, e sugeriu que entre as características químicas do solo, a que mais influencia positivamente o compartimento de Po mineralizável, é o Co.

Embora as reações de precipitação e adsorção do P, que regulam a retenção e liberação do P no solo, geralmente atuem com grande intensidade e rapidez, a mineralização permanente dos componentes orgânicos desse nutriente, também contribui para manter, principalmente em médio e longo prazo,

os níveis das formas lábeis de P no solo, disponíveis para as plantas (Novais et al., 2007).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de coleta

O estudo foi conduzido com solos da Fazenda Carrapeta, localizada no município de Conceição de Macabu, RJ. O clima da região, pela classificação de Köppen, é do tipo Am, quente e úmido, com temperatura média em torno de 26 °C e a precipitação pluvial média anual é de 1.400 mm, com período chuvoso entre outubro e março e seco entre junho e setembro (Gama-Rodrigues et al., 2008). O solo é um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilo-franco-arenosa, em todas as coberturas vegetais. O relevo é ondulado, com declividade em torno de 35 cm m⁻¹.

3.2. Caracterização dos sítios experimentais

Os sítios experimentais constituem-se de quatro coberturas vegetais (Figura 2) em parcelas de 1.500 m² (75 x 20 m), dispostas adjacentes uma da outra, na mesma cota de altitude.

Duas das coberturas vegetais estudadas foram implantadas para a recuperação da área degradada:

1. Plantios puros da espécie arbórea *Acacia auriculiformis* (acácia) inoculada com estirpes selecionadas de bactérias fixadoras de N₂ atmosférico (BR 3465 e BR 3609) e fungos micorrízicos (um combinado de *Gigaspora margarita* e *Glomus clarum*);
2. Plantios puros da espécie arbórea *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá) inoculada com estirpes selecionadas de bactérias fixadoras de N₂ atmosférico (BR 3407 e 3446) e fungos micorrízicos (um combinado de *Gigaspora margarita* e *Glomus clarum*).

As outras duas coberturas vegetais foram utilizadas como referência, ambas com aproximadamente 40 anos de idade:

3. Fragmento florestal de Mata Atlântica em sucessão secundária (capoeira), com espécies em diferentes estádios sucessionais;
4. Pasto degradado, que representa a vegetação anterior ao plantio das espécies arbóreas, com predomínio de capim-gordura (*Melinis minutiflora*), grama-pernambuco (*Paspalum maritimum*) e sapê (*Imperata brasiliensis*).

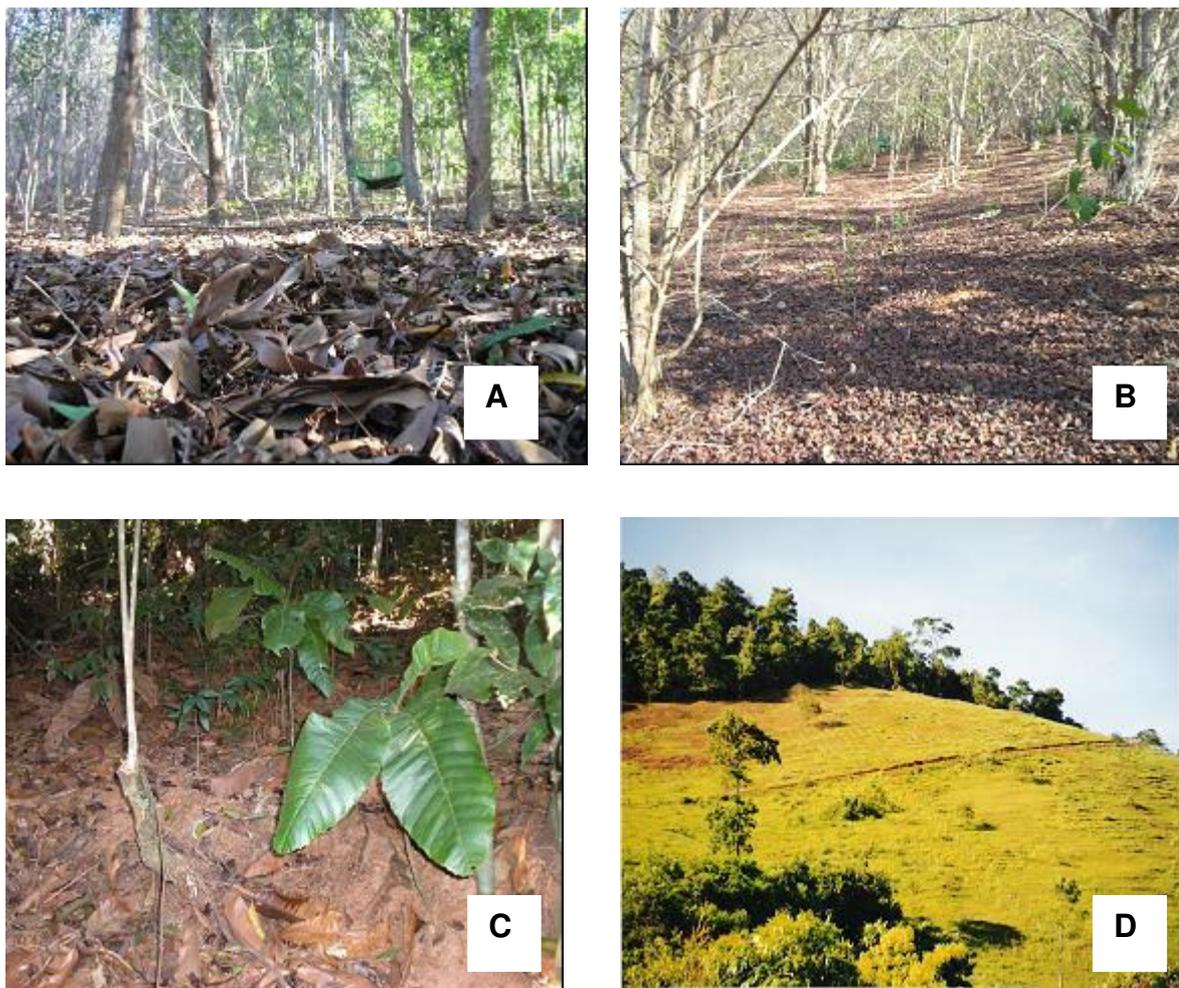


Figura 2. Fotos das coberturas onde foram coletadas as amostras de solo e serapilheira, na fazenda Carrapeta, Conceição de Macabu, RJ: A- *Acacia auriculiformis* (Acácia), B- *Mimosa caesalpinifolia* (Sabiá), C- Capoeira. D- Pasto.

Em julho de 2007, sob cada cobertura vegetal estudada foram coletadas quatro amostras compostas de solo, cada uma constituída por quinze amostras simples, ao acaso nas entrelinhas de plantio, na profundidade de 0-10 cm, do terço médio da topossequência.

As amostras de solo foram destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha e homogeneizadas, retirando-se as raízes e resíduos visíveis de plantas e animais do solo.

3.3. Análises químicas e físicas do solo e serapilheira.

Antes da incubação, foram feitas as seguintes determinações nas amostras de solos, conforme os métodos descritos em EMBRAPA (1997): pH

(H₂O); P e K extraíveis por Mehlich-1 e determinados, respectivamente, por colorimetria e fotometria de chama; Ca, Mg e Al trocáveis por KCl 1 mol L⁻¹, sendo Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹; H + Al por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0. O N total (NT) foi determinado pelo método Kjeldahl e o C orgânico (Co) por oxidação com K₂Cr₂O₇ 0,21 mol L⁻¹ em meio ácido (Anderson & Ingram, 1996) (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de pH e teores de atributos químicos de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.

| Cobertura | pH | Ca | Mg | Al | H+Al | CTC | P | K | Co | NT |
|-----------|---------------------|------|-------|------|------|-------|------|--------|--------|--------|
| | | | | | | | | | | |
| Acácia | 4,6a ⁽¹⁾ | 1,2a | 0,6a | 0,3c | 4,8d | 6,7c | 4,8a | 36,3b | 13,30b | 1,40a |
| Sabiá | 4,6a | ,5a | 0,5ab | 0,4c | 6,2c | 8,3b | 4,3a | 51,5a | 13,20b | 1,40a |
| Capoeira | 4,0b | 0,3b | 0,4bc | 1,8a | 9,6a | 10,4a | 4,8a | 28,0b | 14,90a | 1,30ab |
| Pasto | 4,3ab | 0,6b | 0,3c | 1,2b | 7,3b | 8,3b | 3,0a | 40,8ab | 12,20b | 0,80b |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta, conforme os métodos descritos em (EMBRAPA, 1999) (tabela 2).

Tabela 2. Composição granulométrica de amostras de solos sob diferentes coberturas vegetais.

| Coberturas | Areia | Silte | Argila |
|------------|------------------------|----------|----------|
| | | | |
| Acácia | 620,73 a ^{1/} | 141,06 b | 238,21 d |
| Sabiá | 609,54 b | 127,34 d | 263,12 b |
| Capoeira | 520,40 d | 133,62 c | 345,98 a |
| Pasto | 567,13 c | 168,48 a | 264,39 b |

^{1/} As médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5%. Fonte: Paulino. (2003).

Nas amostras de serapilheira foi realizada análise de fósforo total (PT), por digestão nitroperclórica, com determinação colorimétrica pelo método de vitamina C, modificado por Braga e Defelipo (1974) (Tabela 3).

Tabela 3: Teor de fósforo total da serapilheira de diferentes coberturas vegetais.

| Coberturas | Fósforo total |
|------------|---------------------------------|
| | ----- mg kg ⁻¹ ----- |
| Acácia | 250,00b ^{1/} |
| Sabiá | 453,13a |
| Capoeira | 362,50b |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

3.4. Incubação

A incubação foi realizada com solo, solo mais serapilheira, serapilheira mais areia e areia. Onde a areia serviu como branco. A umidade do solo foi padronizada para 80 % da capacidade máxima de saturação do solo. A quantidade de solo e areia utilizada para incubação foi de 50,00 g. As amostras de solo da acácia e areia que tiveram adição de serapilheira receberam 0,53 g de serapilheira moída de acácia, as amostras de sabiá receberam 0,33 g de serapilheira moída de sabiá e as amostras de capoeira receberam 0,36 g de serapilheira moída de capoeira. A quantidade de serapilheira adicionada foi calculada considerando os dados de serapilheira acumulada de cada cobertura vegetal, considerando as quantidades dos componentes (folhas, galhos, estrutura reprodutiva e material fragmentado) de Silva (2005). As amostras foram acondicionadas em frascos snap-caps dentro de estufa com temperatura controlada a 40°C. A cada 15 dias a umidade foi restabelecida ao nível inicial da incubação. A perda de umidade foi calculada pela diferença do peso dos frascos snap-caps com material incubado, retirados da estufa a cada 15 dias e o peso anterior à incubação, repondo-se a quantidade de água perdida com pipeta. As amostras foram incubadas por 173 dias, sendo retiradas da incubação para determinação de Po mineralizado no 60^o e 173^o dia.

3.5. Determinação do fósforo orgânico total (Po total)

A obtenção do Po total das amostras de solo, solo mais serapilheira, serapilheira mais areia e areia foi realizada utilizando o método de extração de Bowman (1989), que consiste na solubilização das substâncias orgânicas através da adição de ácido e, em seguida, aumentando o pH do meio pela adição de álcali (Figura 3). O Po é extraído junto às substâncias orgânicas, destruídas posteriormente por digestão do extrato.

Com o objetivo de clarear o extrato para a determinação do Pi extraído, foi utilizado carvão ativado, como modificação do método de Bowman (1989) proposta por Guerra (1993). Para isso, o carvão ativado deve estar livre de Pi para não influenciar as amostras, e, portanto, deve passar por lavagens sucessivas com HCl 6 mol L⁻¹ e logo após com a mesma solução utilizada para a extração, com exceção para extração com H₂SO₄, em que o carvão é lavado com HCl 6 mol L⁻¹.

Foi utilizado 2,0 g de terra fina seca ao ar (TFSA) peneirado em malha de 212 µm e colocado em tubos de centrífuga, sendo adicionado a estes tubos contendo o solo, 3 mL de H₂SO₄ concentrado (18 mol L⁻¹) em alíquotas de 1 mL, agitando o tubo suavemente para completa imersão e mistura da amostra com o ácido. Adicionou-se 4 mL de água destilada em alíquotas de 1 mL e logo após o volume foi completado com 43 mL de água destilada. Esse processo é seguido por agitação durante 10 minutos. Posteriormente, os tubos foram levados para a centrífuga a 2000 rpm por 10 minutos e o sobrenadante filtrado em frascos snap-caps utilizando papel filtro Whatman número 42.

O papel de filtro utilizado para a filtração do extrato ácido foi colocado novamente no mesmo tubo de centrífuga contendo solo, adicionando 40 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹. A solução foi agitada manualmente até que o solo solte do fundo do tubo de centrífuga. Posteriormente, o tubo de centrífuga é colocado em banho-maria a 80°C durante 2 horas, e após este período, o tubo de centrífuga é resfriado em água corrente e logo depois de centrifugado foi filtrado conforme na extração ácida.

Antes da filtração dos extratos ácido e alcalino, foi retirada uma alíquota de 5 mL de cada um para a determinação do P total, em um tubo de digestão. Acrescentou-se as alíquotas de extrato ácido, 1 mL de MgCl₂ · 6H₂O saturado e,

em seguida, 1 mL de HClO_4 concentrado e nas alíquotas de extrato alcalino foi adicionado apenas 1 mL de HClO_4 concentrado. O tubo foi agitado lentamente, e colocado em seguida no bloco digestor em temperatura inicial de 80°C , elevando até atingir 180°C . O fim da digestão é detectado quando ocorre a formação de gel no fundo do tubo. Após o resfriamento, foi adicionado ao tubo 9 mL de água destilada e em seguida o mesmo é aquecido dentro de um becker com água em uma placa aquecedora. Após este processo, retira-se uma alíquota para a quantificação do P total, pelo método de Murphy e Riley (1962), com neutralização da acidez pela adição, gota a gota, de NaOH 5 mol L^{-1} em presença de *p*-nitrofenol, sendo a dosagem do P realizada em espectrofotômetro (720 nm).

A determinação do P_i nos extratos ácido e alcalino foi realizada adicionando-se $0,5 \text{ cm}^3$ de carvão ativado purificado nos extratos em snap-caps, agitando-se manualmente. Em seguida, os extratos foram filtrados utilizando-se papel de filtro rápido, recolhendo o filtrado em outro frasco snap-cap. Nos extratos ácidos clarificados determinou-se o P_i pelo método Murphy e Riley (1962), e nos extratos alcalinos foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). A dosagem do P foi realizada em espectrofotômetro (720 nm).

O teor de P_o total foi estimado pela soma das subtrações dos valores de P total dos extratos ácidos e alcalinos e seus respectivos conteúdos de P_i (Figura 4).

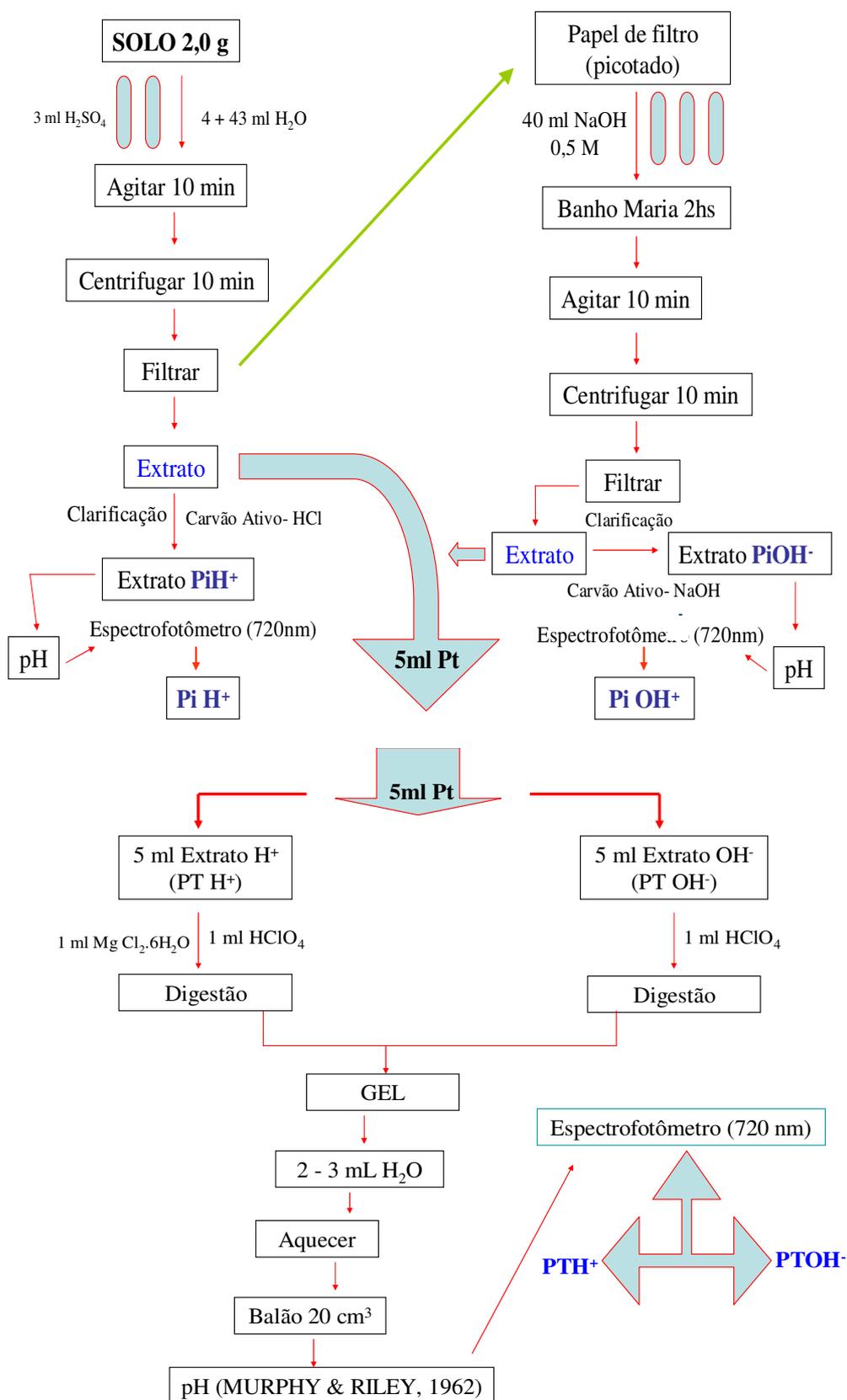


Figura 3. Diagrama esquemático da extração sequencial de Po do solo. Fonte: Zaia (2005).

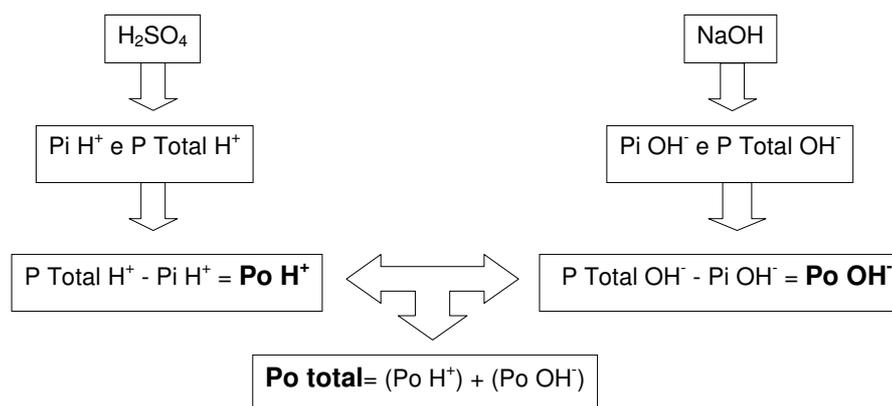


Figura 4. Diagrama esquemático do cálculo de Po total estimado.

3.6. Determinação do fósforo orgânico lábil (Po lábil)

Para determinar o Po lábil das amostras de solo, solo mais serapilheira, serapilheira mais areia e areia, foi utilizado o método de extração com NaHCO₃ a 0,5 mol L⁻¹ conforme Bowman e Cole (1978) (Figura 5).

Foi colocado 2,5 g de TFSA em snap-cap, adicionando-se 50 mL de NaHCO₃ a 0,5 mol L⁻¹ com pH ajustado para 8,5. O snap-cap foi agitado por 30 minutos a 220 rpm, e após esse procedimento, a suspensão foi deixada em repouso por 30 minutos. Após esse período, filtrou-se o extrato em papel de filtro lento para um novo frasco snap-cap.

Foi retirado 5 mL do extrato filtrado, colocando em tubo de digestão, para determinação do fósforo total lábil (P total lábil). A essa alíquota foi adicionado 1 mL de HClO₄ concentrado. Agitou-se o tubo lentamente, colocando-o, em seguida no bloco digestor aquecido inicialmente a 80°C, elevando lentamente até atingir 180°C. A digestão foi realizada até a obtenção de um gel incolor no fundo do tubo. Após o resfriamento, é adicionado ao tubo 9 mL de água destilada e em seguida o mesmo é aquecido dentro de um becker com água em uma placa aquecedora, retirando-se uma alíquota para a determinação de Pi, da mesma forma que na determinação de P dos extratos ácidos e alcalino.

O volume restante, do extrato filtrado é colocado em um frasco, adicionando-se 0,5 cm³ de carvão ativado purificado com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹. A mistura foi agitada e posteriormente filtrada em papel de filtro rápido, recolhendo-se o filtrado em outro frasco. O Pi extraído foi quantificado pelo método de Murphy e Riley (1962) e a dosagem do P realizada em espectrofotômetro (720 nm).

O teor de Po lábil foi estimado pela subtração do Pi lábil do P total lábil, ambos extraídos por NaHCO_3 (Figura 5).

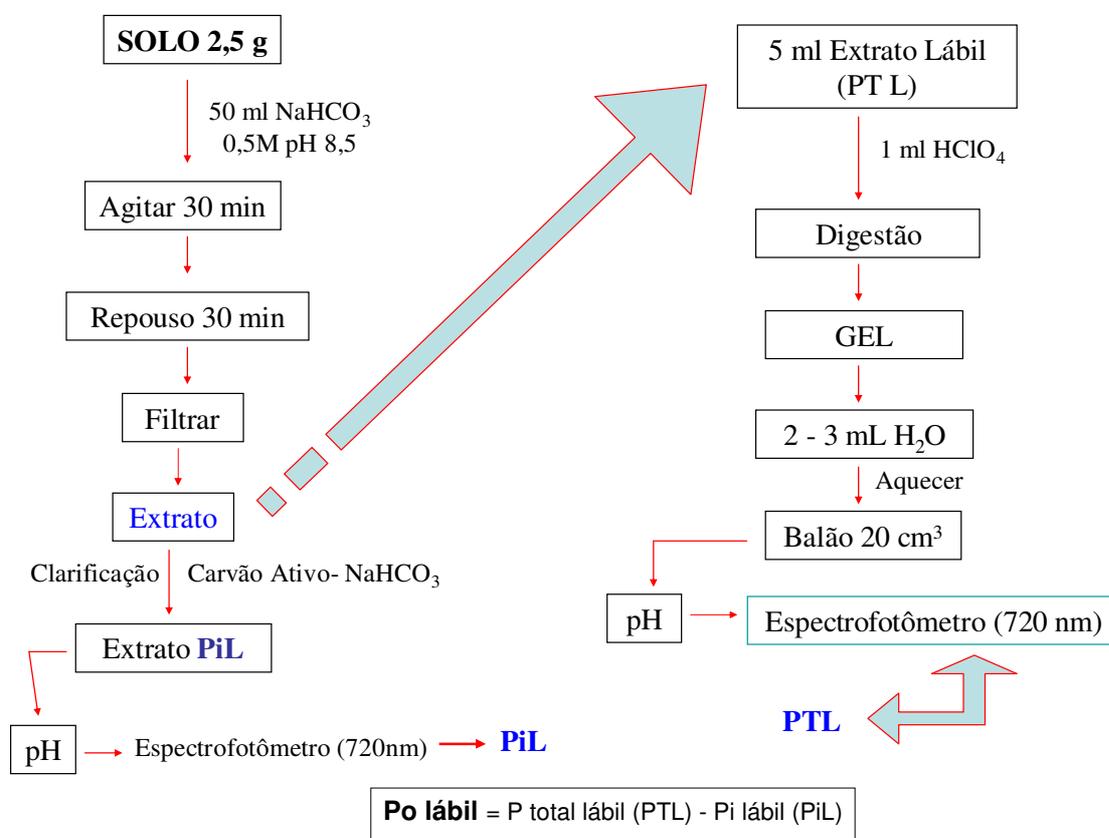


Figura 5. Diagrama esquemático do procedimento e cálculo utilizado para quantificação do Po lábil (Pol). Fonte: Zaia (2005).

3.7. Mineralização do Po

A estimativa da quantidade de Po total e Po lábil mineralizado durante os períodos de incubação de 60 e 173 dias nos solos sob as coberturas vegetais estudadas foi feita com base em Acquaye (1963), de acordo com as seguintes fórmulas:

P orgânico total mineralizado (Po M):

$$\text{Po M (mg kg}^{-1}\text{)} = \text{Po TP (mg kg}^{-1}\text{)} - \text{Po TI (mg kg}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Po M (\%)} = \{ \text{Po M (mg kg}^{-1}\text{)} / \text{Po TI (mg kg}^{-1}\text{)} \} * 100$$

Onde: Po M é o Po total mineralizado; Po TP é o teor de Po total posterior, determinado após incubação e o Po TI é o teor de Po total inicial, determinado antes da incubação.

P orgânico lábil mineralizado (Po lábil M):

$$\text{Po lábil M (mg kg}^{-1}\text{)} = \text{Po lábil TP (mg kg}^{-1}\text{)} - \text{Po lábil TI (mg kg}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Po lábil M (\%)} = \{ \text{Po lábil M (mg kg}^{-1}\text{)} / \text{Po lábil TI (mg kg}^{-1}\text{)} \} * 100$$

Onde: Po lábil M é o Po lábil mineralizado; Po lábil TP é o teor de Po lábil posterior, determinado após incubação e o Po lábil TI é o teor de Po lábil inicial, determinado antes da incubação.

Tanto no caso do Po M quanto do P lábil M, valores negativos significam que houve redução da quantidade de Po e Po lábil com o tempo de incubação, indicando que houve mineralização dessas frações. Valores positivos, significam que houve aumento da quantidade de Po e Po lábil com o tempo de incubação, indicando que não houve mineralização dessas frações.

3.8. Análises estatísticas

Para verificar as diferenças significativas das frações de P do solo entre as coberturas vegetais estudadas e das frações de P entre cada tratamento (solo e solo mais serapilheira) das diferentes coberturas vegetais foi realizada análise de variância, adotando-se o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, e as médias foram comparadas através do teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Foram realizadas correlações de Pearson a 5% de probabilidade entre as frações de Po total, Po lábil e o teor de argila e com alguns atributos químicos do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Frações de P antes da incubação dos solos

O Pi total dos solos avaliados antes da incubação do solo variou de 214,73 a 371,17 mg kg⁻¹, sendo o maior valor encontrado no solo sob sabiá, enquanto o Pi lábil variou de 2,00 a 2,92 mg kg⁻¹, que correspondem aos valores encontrados para pasto e capoeira, respectivamente, que são significativamente diferentes (Tabela 4).

O Po total do solo variou de 51,04 mg kg⁻¹ a 123,18 mg kg⁻¹ (Tabela 4). Guerra et al. (1996) estudando 17 solos de diversas classes, verificaram teores de Po total variando de 7,00 a 272,00 mg kg⁻¹, o que segundo os autores demonstra uma capacidade diferencial na acumulação de Po no solo. Neste trabalho, os maiores teores de Po total foram encontrados sob as leguminosas que não diferiram entre si: 117,85 mg kg⁻¹ na acácia e 123,18 mg kg⁻¹ no sabiá. As outras duas coberturas apresentaram valores menores e significativamente iguais: 57,63 mg kg⁻¹ na capoeira e 51,04 mg kg⁻¹ no pasto (Tabela 4). Zaia et al. (2008a) também verificaram nas mesmas áreas e profundidade do solo, que houve um maior teor de Po total na acácia (90,30 mg kg⁻¹) e sabiá (69,42 mg kg⁻¹). Pode-se sugerir que os maiores valores de Po total no solo das leguminosas em relação à capoeira e ao pasto estão relacionados aos maiores aportes de serapilheira da

acácia (4391, 67 mg ha⁻¹ ano⁻¹) e sabiá (5347, 33 mg ha⁻¹ ano⁻¹) em relação à capoeira (2651, 67 mg ha⁻¹ ano⁻¹) e provavelmente ao pasto (Garcez, 2005), resultando em menor adição de Po ao solo destas coberturas.

O Po lábil variou de 2,41 a 6,14 mg kg⁻¹, com um valor médio de 4,93 mg kg⁻¹ (Tabela 4). O menor valor de Po lábil foi encontrado no pasto, evidenciando que entre as coberturas estudadas, essa é a menor fornecedora de P para o sistema. Cunha (2002), verificou maior teor de Po total no solo de floresta (235,60 mg kg⁻¹), que foi 4,25 vezes superior ao menor valor encontrado no solo da pastagem. As coberturas de acácia, sabiá e capoeira não apresentaram diferenças significativas entre si (Tabela 4), mostrando que participam igualmente com maior adição de P ao sistema, em relação ao pasto, pois a fração de Po lábil é facilmente mineralizada (Bowman e Cole, 1976) e, portanto a principal forma de P disponível para as plantas.

O Pi + Po (P total) dos solos avaliados antes da incubação do solo foi em média de 358,12 mg kg⁻¹, (Tabela 4) sendo significativamente maior sob as leguminosas, semelhante aos resultados de Po total, apesar da acácia não diferir estatisticamente da capoeira e pasto. Esse valor de P total está próximo dos valores encontrados por Condrón et al. (1990) em amostras de vinte solos do nordeste brasileiro e de três solos de Gana, que foi em média de 482 mg kg⁻¹.

O P total lábil variou entre 4,41 mg kg⁻¹ e 8,93 mg kg⁻¹ e foi menor no pasto quando comparado às outras coberturas que foram significativamente iguais entre si, da mesma forma que ocorreu para os resultados de Po lábil (Tabela 4). Como o solo é o mesmo para todas as coberturas, pode-se inferir que o estoque total lábil de P no solo esteja sendo influenciado pela ação da cobertura vegetal, estando diretamente associado ao conteúdo e à qualidade da matéria orgânica. Zaia (2005) também verificou nas mesmas áreas do presente trabalho, na camada de 0-5 cm de solo que houve menor teor de P total lábil no pasto (13,14 mg kg⁻¹). O autor atribui o maior teor de P total lábil encontrado nesta camada, à maior ciclagem biogeoquímica de P em decorrência da maior deposição e posterior decomposição dos resíduos da parte aérea e de raízes finas na superfície do solo.

Tabela 4. Frações de fósforo inorgânico, fósforo orgânico e fósforo total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais, antes da incubação.

| Coberturas | P inorgânico | | P orgânico | | Pi + Po | |
|------------|---------------------------------|--------|------------|-------|----------|-------|
| | Total | Lábil | Total | Lábil | Total | Lábil |
| | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | |
| Acácia | 266,15b ^{1/} | 2,67ab | 117,85a | 6,14a | 384,00ab | 8,81a |
| Sabiá | 371,17a | 2,17ab | 123,18a | 5,14a | 494,35a | 7,12a |
| Capoeira | 230,73b | 2,92a | 57,63b | 6,01a | 288,36b | 8,93a |
| Pasto | 214,73b | 2,00b | 51,04b | 2,41b | 265,77b | 4,41b |
| Média | 270,70 | 2,44 | 87,43 | 4,93 | 358,12 | 7,32 |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

4.2. Frações de P após incubação dos solos

O Pi total dos solos avaliados após a incubação dos solos por 60 dias variou de 136,54 a 247,89 mg kg⁻¹ (Tabela 5). Os maiores valores foram encontrados no solo sob acácia, sabiá e capoeira, apesar da capoeira não diferir estatisticamente do pasto. O Pi lábil variou de 1,67 a 3,67 mg kg⁻¹, que correspondem aos valores encontrados no solo do pasto e capoeira, respectivamente (Tabela 5).

O Po total dos solos variou de 31,08 a 96,40 mg kg⁻¹ (Tabela 5). Houve uma redução de 21,53%, em média, do Po total encontrado antes da incubação entre as coberturas vegetais estudadas (Tabela 4 e 5). Essa redução ocorreu, provavelmente, devido à mineralização das fontes de Po, liberando P disponível para as plantas com o tempo, o que mostra a importância do estudo da mineralização de P, uma vez que a realização de apenas uma determinação do P disponível, pode não mostrar a real capacidade do solo em fornecer P para as plantas (Araújo et al., 2004b). Os menores teores de Po total foram verificados nos solos da capoeira e sabiá.

O teor médio de Po lábil encontrado no solo foi de 5,65 mg kg⁻¹ (Tabela 5). Os maiores valores de Po lábil foram encontrados no solo da capoeira (7,35 mg kg⁻¹) e sabiá (5,68 mg kg⁻¹), embora o sabiá não tenha diferido

significativamente da acácia e pasto. Os maiores teores de Po lábil nos solos da capoeira e sabiá, sugerem que apesar desses solos apresentarem os menores teores de Po total, fornecem grande quantidade de P ao sistema solo-planta.

O P total encontrado no solo foi em média de 271,79 mg kg⁻¹ (Tabela 5), e assim como ocorreu para o Po total, houve uma redução de 24,11% em relação ao P total encontrado antes da incubação entre as coberturas vegetais estudadas (Tabela 4 e 5). Os menores valores de P total foram encontrados sob a capoeira, sabiá e pasto, embora o sabiá e pasto tenham sido significativamente iguais à acácia, enquanto a fração P total lábil que variou entre 6,67 mg kg⁻¹ e 11,02 mg kg⁻¹ foi significativamente maior sob a cobertura da capoeira (Tabela 5).

Tabela 5. Frações de fósforo inorgânico, fósforo orgânico e fósforo total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais, após 60 dias de incubação.

| Coberturas | P inorgânico | | P orgânico | | Pi + Po | |
|---------------------------------|-----------------------|-------|------------|--------|----------|--------|
| | Total | Lábil | Total | Lábil | Total | Lábil |
| ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Acácia | 245,52a ^{1/} | 2,25b | 96,40a | 4,56b | 341,92a | 6,81b |
| Sabiá | 247,89a | 2,00b | 61,75ab | 5,68ab | 309,64ab | 7,68b |
| Capoeira | 182,75ab | 3,67a | 31,08b | 7,35a | 213,83b | 11,02a |
| Pasto | 136,54b | 1,67b | 85,21a | 5,00b | 221,76ab | 6,67b |
| Média | 203,18 | 2,40 | 68,61 | 5,65 | 271,79 | 8,04 |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Após a incubação dos solos por 173 dias, foi verificado um teor médio de Pi total de 203,18 mg kg⁻¹, não havendo diferença significativa entre as coberturas vegetais estudadas, enquanto o Pi lábil variou de 2,00 a 4,00 mg kg⁻¹ e foi significativamente maior na capoeira (Tabela 6).

O Po total dos solos avaliados foi em média de 67,11 mg kg⁻¹ (Tabela 6), havendo uma redução média de 23,24%, em relação ao valor de P total encontrado antes da incubação (Tabela 4 e 6) e uma redução média de apenas 2,19% em relação ao P total encontrado após 60 dias de incubação (Tabela 5 e 6). Não houve diferença significativa dos teores de Po total entre as coberturas

vegetais estudadas, enquanto o Po lábil variou de 4,31 a 6,67 mg kg⁻¹ e foi significativamente maior na capoeira, acácia e sabiá, embora a acácia e sabiá tenham sido significativamente iguais ao pasto (Tabela 6).

O P total dos solos foi em média 270,29 mg kg⁻¹ (Tabela 6), havendo uma redução média de 24,53% em relação ao P total encontrado antes da incubação (Tabela 4 e 6) e uma redução de média de 0,66% em relação ao P total encontrado após 60 dias de incubação (Tabela 5 e 6). Assim como ocorreu para o Pi total e Po total, não houve diferença significativa entre os teores de P total entre as coberturas vegetais estudadas (Tabela 6).

As pequenas diferenças dos teores de P total e Po total entre os períodos de 60 a 173 dias, sugerem que os 60 dias de incubação à temperatura de 40°C seriam suficientes para liberar P disponível, provenientes de fontes mais lábeis para o sistema solo-planta, acarretando em uma estabilização da quantidade de P total do solo. De acordo com Grierson et al. (1999), a taxa de mineralização de P inicial é rápida, seguida por um marcado abrandamento da taxa de mineralização nos períodos posteriores.

O P total lábil variou entre 6,31 mg kg⁻¹ e 10,67 mg kg⁻¹ (Tabela 6) e semelhante ao que ocorreu na fração de Po total lábil e Pi total lábil, o maior valor foi encontrado no solo da capoeira. Apesar do menor aporte de serapilheira observado nesta cobertura (Garcez, 2005) e os menores teores de Po total observados neste trabalho (Tabela 4, 5 e 6), possivelmente a maior diversidade da comunidade vegetal que ocorre nessa cobertura promove um aporte heterogêneo de serapilheira (Correia & Andrade, 1999), com diferentes níveis de decomposição e presença de diferentes organismos no solo. Essa condição favorece a intensa atividade destes, que representam a maior diversidade biológica e fisiológica do solo, bem como maior poder de decomposição e reciclagem de nutrientes (Eira, 1995), favorecendo a liberação de P para as plantas.

Tabela 6. Frações de fósforo inorgânico, fósforo orgânico e fósforo total nas formas lábil e total das amostras de solo, sob diferentes coberturas vegetais, após 173 dias de incubação.

| Coberturas | P inorgânico | | P orgânico | | Pi + Po | |
|---------------------------------|-----------------------|-------|------------|--------|---------|--------|
| | Total | Lábil | Total | Lábil | Total | Lábil |
| ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Acácia | 244,43a ^{1/} | 2,92b | 80,26a | 5,01ab | 324,68a | 7,92b |
| Sabiá | 192,33a | 2,00c | 81,49a | 5,10ab | 273,82a | 7,10b |
| Capoeira | 208,63a | 4,00a | 46,35a | 6,67a | 254,97a | 10,67a |
| Pasto | 167,33a | 2,00c | 60,33a | 4,31b | 227,67a | 6,31b |
| Média | 203,18 | 2,73 | 67,11 | 5,27 | 270,29 | 8,00 |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

O estudo da contribuição do Po e Pi para o P total dos solos antes e após incubação mostra que houve um predomínio da fração Pi em relação à fração Po sob todas as coberturas vegetais (Tabela 7). Antes da incubação dos solos, o Po representou de 19,20 a 30,69% do P total extraído. Duda (2000), estudando amostras do horizonte superficial e subsuperficial de 26 classes de solos, encontrou que a relação Po/ Ptotal foi em média de 30,6% no horizonte superficial e de 21,2% no horizonte subsuperficial. Após a incubação dos solos, a contribuição de Po e Pi do P total do solo sob todas as coberturas vegetais continua mostrando predomínio da fração Pi em relação à fração de Po, embora em quantidades diferentes (Tabela 7). Após 60 dias, o Po representou de 14,53 a 38,42% do P total extraído, enquanto após 173 dias o Po representou de 18,18 a 29,76% do P total extraído.

Antes da incubação dos solos, as maiores relações Po/ Ptotal foram encontradas no solo da acácia e sabiá, embora o solo do sabiá não tenha diferido significativamente do pasto e capoeira, que mostraram as menores relações Po/ P total (Tabela 7). Cunha (2002), também verificou redução na concentração de Po total em relação ao tipo de uso. Ele observou uma redução de 53% do teor de Po total da pastagem em relação ao plantio de eucalipto, sugerindo que embora as pastagens de modo geral sejam consideradas uma cobertura eficiente na proteção do solo, quando mal manejadas, a transferência de nutrientes para o

sistema vegetação – animal e, ou, perdas por erosão, causam diminuição nos níveis de Po total do solo.

Após incubação de 60 dias, a maior relação Po/ Ptotal foi verificada no solo do pasto, enquanto as menores relações Po/ Ptotal foram encontradas nos solos da capoeira e sabiá (Tabela 7). Nos solos incubados por 173 dias, as maiores relações Po/ Ptotal foram verificadas no sabiá, pasto e acácia, embora o solo da acácia não tenha diferido significativamente da capoeira, que mostrou a menor relação Po/ Ptotal (Tabela 7).

Antes ou após incubação dos solos durante os dois tempos estudados, observa-se que a capoeira apresenta uma das menores proporções de Po em relação ao P total do solo, embora a maior parte dele seja lábil (Tabela 7). Em ecossistemas florestais, as entradas de Po são provenientes da matéria orgânica da serapilheira e organismos do solo, que geralmente em menos de 1 ano nos trópicos úmidos, fornecem uma grande quantidade de fósforo em solos tropicais fortemente intemperizados, onde o fósforo liberado durante a decomposição é absorvido tão rapidamente pelas raízes e micorrizas, que quase não é adsorvido por óxidos de ferro e alumínio no solo (Vincent et al., 2010).

Tabela 7. Relação (Pi/ P total) e (Po/ P total) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.

| Coberturas | Pi/ P total | Po/ P total | Pi/ P total | Po/ P total | Pi/ P total | Po/ P total |
|------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| | Antes da incubação | | Após 60 dias | | Após 173 dias | |
| | -----%----- | | | | | |
| Acácia | 69,31b ^{1/} | 30,69a ^{2/} | 71,81b | 28,19b | 75,28ab | 24,72ab |
| Sabiá | 75,08ab | 24,92ab | 80,06a | 19,94c | 70,24b | 29,76a |
| Capoeira | 80,01a | 19,99b | 85,47a | 14,53c | 81,83a | 18,18b |
| Pasto | 80,80a | 19,20b | 61,57c | 38,42a | 73,50b | 26,50a |
| Média | 76,30 | 23,70 | 74,72 | 25,27 | 75,21 | 24,79 |

^{1/} Pi/ P total= Quantidade de Pi em relação ao P total do solo, ^{2/} Po/ P total= Quantidade de Po em relação ao P total do solo.

Observando a contribuição do Pi lábil e Po lábil para o P total lábil, antes e após incubação dos solos, verifica-se um comportamento inverso ao de Pi e Po em relação ao P total dos solos (Tabela 8), havendo um predomínio da fração Po lábil em relação à fração Pi lábil. Antes da incubação dos solos, o Po lábil

representou de 55,00 a 72,00% do P total lábil extraído. Após a incubação, a contribuição de Po lábil e Pi lábil do P total lábil dos solos sob todas as coberturas vegetais, continua mostrando predomínio da fração Po lábil em relação à fração de Pi lábil, embora em quantidades diferentes (Tabela 8). Após 60 e 173 dias de incubação, em média, 70,66% e 66,31% ,respectivamente do P total lábil das diferentes coberturas vegetais foi constituído por Po lábil.

Antes da incubação dos solos, as maiores relações PoL/ PTL (Po lábil/ P total lábil) foram encontradas nos solos da acácia, sabiá e capoeira que não diferiram significativamente entre si, enquanto a menor relação Po lábil/ P total lábil foi verificada no solo do pasto (Tabela 8). As maiores contribuições de Po lábil em relação ao P total lábil verificadas nas leguminosas e capoeira em relação ao pasto se devem provavelmente aos maiores valores de Ca, Mg e N nas leguminosas e ao maior valor de Co na capoeira, que conferem maior qualidade ao resíduo vegetal, favorecendo o fornecimento de P lábil na forma orgânica para o solo. Isso mostra que apesar de os métodos de avaliação da fertilidade do solo geralmente enfocarem a fração inorgânica de P como indicadora da disponibilidade deste nutriente para as culturas, a fração orgânica contribui significativamente para o fornecimento de P às plantas, pelo processo de mineralização (Rocha et al., 2004), reduzindo os efeitos do processo de adsorção do Pi, pela fase mineral do solo.

As relações Po lábil/ P total lábil verificadas após incubação de 60 dias, foram significativamente iguais para o solo de todas as coberturas vegetais estudadas (Tabela 8). Nos solos incubados por 173 dias, as maiores relações Po lábil/ P total lábil foram encontradas nos solos da acácia, sabiá e pasto, embora a acácia e o pasto não tenham diferido significativamente da capoeira (Tabela 8).

Após a incubação do solo durante os dois tempos estudados, o pasto passou a apresentar junto a outras coberturas, as maiores proporções de Po lábil em relação ao P total lábil (Tabela 8). Provavelmente por esta cobertura apresentar um resíduo vegetal menos lábil que as demais coberturas vegetais, resultando na liberação de Po de fontes mais estáveis após a incubação, pois no solo, ocorre rápida decomposição inicial de material lábil e, posteriormente, em um processo mais lento, de materiais mais estáveis (Fernandes et al., 2006).

Tabela 8. Relação (PiL/ PTL) e (PoL / PTL) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.

| Coberturas | PiL/ PTL | PoL/ PTL | PiL/ PTL | PoL/ PTL | PiL/ PTL | PoL/ PTL |
|-------------|----------------------|----------------------|--------------|----------|---------------|----------|
| | Antes da incubação | | Após 60 dias | | Após 173 dias | |
| -----%----- | | | | | | |
| Acácia | 30,27b ^{1/} | 69,73a ^{2/} | 33,04a | 66,96a | 36,81ab | 63,19ab |
| Sabiá | 30,43b | 72,18a | 26,03a | 73,97a | 28,15b | 71,85a |
| Capoeira | 32,67b | 67,33a | 33,28a | 66,72a | 37,49a | 62,51b |
| Pasto | 45,38a | 54,62b | 25,00a | 75,00a | 31,69ab | 68,31ab |
| Média | 34,69 | 65,97 | 29,34 | 70,66 | 33,54 | 66,31 |

^{1/} PiL/ PTL= Quantidade de Pi lábil em relação ao P total lábil do solo, ^{2/} PoL/ PTL= Quantidade de Po lábil em relação ao P total lábil do solo.

4. 3. Influência da extração ácida e alcalina sobre o Po antes e após incubação dos solos

De modo geral foi observado que o aumento do Po total não é influenciado pela relação $Po\ H^+ / PoT$ (extração ácida em relação ao Po total do solo) e ou $Po\ OH^- / PoT$ (extração alcalina em relação ao Po total do solo), sendo verificado que mesmo no solo sob o pasto que obteve maior quantidade de Po total após a incubação de 60 e 173 dias (Tabela 4, 5 e 6), a proporção de Po total obtido na extração ácida e alcalina em todos os períodos de incubação estudados apresenta valores percentuais muito próximos (Tabela 9). Além disso, foi verificado que a extração ácida predominou sobre a extração alcalina, sendo encontrado antes da incubação, valor médio de extração ácida de 76,02% e valores médios de 73,31% e 78,02% de extração ácida nos solos incubados por 60 e 173 dias, respectivamente (Tabela 9).

O predomínio de Po solúvel em ácido pode ter importância para a avaliação da fertilidade do solo, tendo em vista que a fração de Po solúvel em meio ácido representa a fração de Po moderadamente lábil que está associada a substâncias não-húmicas e aos ácidos fúlvicos, e portanto mais acessível aos microrganismos e às plantas (Bowman e Cole, 1978), enquanto o P associado aos ácidos húmicos que é solúvel em meio alcalino, possui alta resistência à mineralização (Duda, 2000). Assim, o solo da capoeira, com maior relação $Po\ OH^- / PoT$, ou seja, maior percentual de Po extraído em meio alcalino que as demais

coberturas, provavelmente apresenta um material menos lábil que as demais coberturas (Tabela 9). Condrón et al. (1990) encontraram valores percentuais na extração ácida que variaram entre 62% e 91% do total, observando uma variação entre 79% e 91% para 20 dos 23 solos estudados, sugerindo, portanto, que é possível a utilização apenas da extração ácida na extração da fração de Po, como um único passo rápido para o método de determinação do P orgânico em estudos de curto prazo de transformações de P em solos tropicais.

Tabela 9. Relação (Po H⁺/ PoT) e (Po OH⁻/ PoT) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.

| Coberturas | PoH ⁺ /PoT | PoOH ⁻ /PoT | PoH ⁺ /PoT | PoOH ⁻ /PoT | PoH ⁺ /PoT | PoOH ⁻ /PoT |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Antes da incubação | | Após 60 dias | | Após 173 dias | |
| | ------%----- | | | | | |
| Acácia | 84,46a ^{1/} | 15,54b ^{2/} | 82,55a | 17,45c | 78,54a | 21,46a |
| Sabiá | 82,89a | 17,11b | 78,75ab | 20,76c | 78,33a | 21,67a |
| Capoeira | 62,42b | 37,58a | 60,50c | 39,50a | 77,48a | 22,52a |
| Pasto | 74,32a | 25,68b | 71,45b | 28,55b | 77,71a | 22,29a |
| Média | 76,02 | 23,98 | 73,31 | 26,57 | 78,02 | 21,99 |

^{1/} Po H⁺/ PoT= Po obtido na extração ácida em relação ao Po total do solo, ^{2/} Po OH⁻/ PoT= Po obtido na extração alcalina em relação ao Po total do solo.

4. 4. Influência da adição de serapilheira sobre as frações de P dos solos incubados

Estudando as diferenças de comportamento das frações de fósforo entre o solo e solo mais adição de serapilheira após incubação dos solos sob cobertura de acácia, capoeira e sabiá, foi verificado que as frações Pi, Po e P total nas formas lábil e total apresentaram comportamentos semelhantes (Tabela 10 e 11).

Após a incubação de 60 e 173 dias, os solos que tiveram adição de serapilheira, apresentaram valores das frações de Pi total, Po total e P total significativamente iguais ao das mesmas frações encontradas nos solos que não tiveram adição de serapilheira (Tabela 10 e 11).

Com a adição de serapilheira nos solos, apenas houve incremento da quantidade de P total lábil e Po lábil, no solo da acácia incubado por 60 dias, que apresentou valor médio de 11,36 mg kg⁻¹ de P total lábil e 8,36 mg kg⁻¹ de

Po lábil, que foram 40,05 % e 45,45 % ,respectivamente maiores que no solo de acácia que não recebeu adição de serapilheira (Tabela 10). Matos et al. (2006) avaliando o efeito da adubação mineral (N, P e K) e orgânica (Palhada de soja + feijão + esterco bovino) em plantação de milho e milho consorciado com feijão, verificaram menor quantidade de P total lábil no tratamento sem adubação (12,6 mg kg⁻¹ de P) que no tratamento com adubo mineral (19,2 mg kg⁻¹ de P) e adubo mineral + composto orgânico (32,4 mg kg⁻¹de P) na camada de 0–10 cm de solo, indicando que a preservação de resíduo vegetal contribui para a melhoria da fertilidade do solo. As maiores quantidades de P total lábil e Po lábil verificadas neste trabalho apenas para o solo da acácia que teve adição de serapilheira em relação aos solos que não tiveram adição de serapilheira, podem ser atribuídas ao fato desta cobertura apresentar antes da incubação uma serapilheira com compostos orgânicos mais estáveis, por apresentar os menores teores nutricionais e as maiores relações lignina:N e polifenóis:N, que as coberturas de sabiá e capoeira (Silva, 2005). O que confere uma decomposição mais lenta ao resíduo vegetal desta cobertura, que se torna mais decomponível, liberando maior quantidade de Po lábil, somente após o período de incubação, aumentando, portanto a quantidade de P total lábil no sistema solo-planta.

A fração Pi lábil dos solos incubados por 60 dias que tiveram adição de serapilheira, variou entre 2,75 mg kg⁻¹ e 3,50 mg kg⁻¹, e foi maior nos solos da acácia e sabiá em 25% e 27,27% ,respectivamente em relação aos solos das mesmas coberturas que não receberam adição deste resíduo vegetal (Tabela 10). Nunes (2009) estudando as mesmas coberturas do presente trabalho verificou que os solos sob as coberturas de acácia, capoeira e sabiá que receberam a adição de serapilheira, apresentaram um maior potencial de mineralização de carbono, com uma diferença de 53%, 28% e 21% ,respectivamente, dos solos sob as mesmas coberturas que não receberam adição de serapilheira. Isso evidencia a importância da manutenção ou implantação de coberturas vegetais que favoreçam a deposição e o acúmulo de serapilheira no solo, pois uma alta taxa respiratória indica maior atividade microbiana e uma decomposição mais rápida do material orgânico do solo, com consequente liberação de nutrientes para as plantas (Marques et al., 2000). Nos solos incubados por 173 dias que receberam adição de serapilheira, a fração Pi lábil variou entre 2,00 e 3,75. Havendo

diferença significativa apenas entre os solos da acácia que receberam e não receberam adição de serapilheira, apresentando um teor de Pi lábil 31,51% maior no solo que não recebeu adição de serapilheira (Tabela 11). Essa maior quantidade de Pi lábil encontrada neste solo, possivelmente está relacionada à mineralização do Po, que pode ter diminuído a capacidade de adsorção de P e a energia de ligação do fosfato aos grupos funcionais dos colóides inorgânicos do solo (Rheinheimer et al., 2003). Acarretando em maior quantidade de Pi disponível no solo.

Tabela 10. Frações de fósforo inorgânico, fósforo orgânico e fósforo total nas formas lábil e total em amostras de solo (So) e solos com adição de serapilheira (Se) sob diferentes coberturas vegetais após 60 dias de incubação.

| Tratamento | P inorgânico | | P orgânico | | Pi + Po | |
|---------------------------------|--------------|-------|------------|-------|---------|--------|
| | Total | Lábil | Total | Lábil | Total | Lábil |
| ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Acácia | | | | | | |
| Solo | 245,52a | 2,25b | 96,40a | 4,56b | 341,92a | 6,81b |
| So + Se | 245,85a | 3,00a | 52,07a | 8,36a | 297,93a | 11,36a |
| Sabiá | | | | | | |
| Solo | 247,89a | 2,00b | 61,75a | 5,68a | 309,64a | 7,68a |
| So + Se | 269,16a | 2,75a | 56,84a | 6,49a | 325,99a | 9,24a |
| Capoeira | | | | | | |
| Solo | 182,75a | 3,67a | 31,08a | 7,35a | 213,83a | 11,02a |
| So + Se | 221,52a | 3,50a | 35,91a | 7,46a | 257,43a | 10,96a |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 11. Frações de fósforo inorgânico, fósforo orgânico e fósforo total nas formas lábil e total em amostras de solo (So) e solos com adição de serapilheira (Se) sob diferentes coberturas vegetais após 173 dias de incubação.

| Tratamento | P inorgânico | | P orgânico | | Pi + Po | |
|---------------------------------|-----------------------|-------|------------|-------|---------|--------|
| | Total | Lábil | Total | Lábil | Total | Lábil |
| ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Acácia | | | | | | |
| Solo | 244,43a ^{1/} | 2,92a | 80,26a | 5,01a | 324,68a | 7,92a |
| So + Se | 234,94a | 2,00b | 81,83a | 5,12a | 316,77a | 7,12a |
| Sabiá | | | | | | |
| Solo | 192,33a | 2,00a | 81,49a | 5,10a | 273,82a | 7,10a |
| So + Se | 234,77a | 2,00a | 84,10a | 5,04a | 318,88a | 7,04a |
| Capoeira | | | | | | |
| Solo | 208,63a | 4,00a | 46,35a | 6,67a | 254,97a | 10,67a |
| So + Se | 208,00a | 3,75a | 33,39a | 6,35a | 241,39a | 10,10a |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

4.5. Mineralização de Po total e Po lábil

Avaliando as quantidades de Po total mineralizado após incubação dos solos por 60 e 173 dias em temperatura de 40°C, foi verificado que a mineralização de Po nos solos incubados por 60 dias variou entre -61,43 e +34,15 mg kg⁻¹. Este resultado representa uma variação de -73,72 a +40,98 kg de Po ha⁻¹, na camada 0-10 cm, considerando densidade do solo de 1,2 g cm⁻³. A mineralização de Po total nos solos incubados por 173 dias variou entre -41,69 e +9,29 mg kg⁻¹ (-50,70 a 11,148 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm) (Tabela 13 e 14).

Acquaye (1973) incubou diferentes solos com e sem adição de N, P, K e Mg por 14, 28, 42, 56 e 70 dias de mineralização e encontrou nesses tempos, valores de Po total que variaram de -18 a +30, -9 a +35, -8 a -58, -9 a -62 e -13 a -75 mg kg⁻¹, respectivamente, verificando que a quantidade de Po total mineralizado, tende a ser maior com o aumento do tempo de incubação, apesar de a taxa de decomposição e consequentemente a taxa de mineralização

tenderem a diminuir com o tempo. Outro fator observado por este autor é que a mineralização é mais dependente da temperatura do que da duração do período da incubação.

Grierson et al. (1999), avaliando o efeito da fertilização com diferentes nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mg, Mn e Zn) e da temperatura após incubação dos solos por 14 e 42 dias, encontraram valores médios de P mineralizado de 4,54 mg kg⁻¹ e 3,81 mg kg⁻¹, respectivamente para solos não fertilizados e 4,97 mg kg⁻¹ e 5,28 mg kg⁻¹, respectivamente para solos fertilizados, incubados em temperatura de 15°C, observando que ao mudar a temperatura para 38°C ocorreu um aumento de 14% na quantidade de P mineralizado no tratamento não fertilizado e um aumento de 33% no tratamento fertilizado, enquanto após incubação durante 42 dias, houve 53% mais P mineralizado na temperatura de 38°C que em 15°C no tratamento não-fertilizado, apesar de encontrar um aumento de apenas 13% no tratamento fertilizado, que de acordo com ele ocorre devido à imobilização no período de 14 dias para 42 dias.

A maior relação Co total: Po total (Co/ Po) observada foi de 25,85 (Tabela 12). Isso indica que a direção do processo de transformação de P atua no sentido da mineralização, não ocorrendo imobilização de P nos solos, pois a imobilização do P pelos microrganismos do solo para sua manutenção e crescimento, ocorre quando os solos apresentam relação Co/ Po, acima de 300 (Siqueira & Moreira, 2001). Dessa forma, a mineralização de P medida durante a incubação pode não ser uma verdadeira representação do processo, pois a mineralização e imobilização microbiana ocorrem simultaneamente e podem assumir grande importância em solos que tenham alta Relação (Co/ Po) (Saggar et al., 1998). Acquaye (1963) avaliando o efeito da adição de N e P na mineralização do Po observou que ocorreu aumento da mineralização com a aplicação de N e P, onde a adição de N realizada para aumentar a decomposição de materiais vegetais com baixa quantidade de nitrogênio, tende a diminuir a relação Co/ Po, da mesma forma que a adição de fosfato inorgânico, proporciona a redução da relação Co/ Po, proporcionando maior mineralização de Po.

Após 60 dias de incubação dos solos que não tiveram adição de serapilheira, o sabiá foi a cobertura que mostrou a maior mineralização de Po total com -61,43 mg kg⁻¹ (-73,72 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm), apresentando uma

mineralização de 49,87% (Tabela 13). Este valor foi cerca de 56,78%, 65,08% e 100% superior ao valor encontrado na capoeira, acácia e pasto, respectivamente. Nos solos incubados por 173 dias, o sabiá também foi a cobertura que apresentou maior mineralização de Po total $-41,69 \text{ mg kg}^{-1}$ ($50,03 \text{ kg ha}^{-1}$ na camada 0-10 cm), apresentando uma mineralização de 33,84%, sendo este valor cerca de 9,83%, 72,94% e 100% superior ao encontrado na acácia, capoeira e pasto, respectivamente (Quadro 14). A maior mineralização de Po total encontrada no solo do sabiá para os dois tempos de incubação estudados (Tabela 13 e 14), se deve provavelmente ao maior teor de P total na serapilheira desta cobertura ($453,13 \text{ mg kg}^{-1}$) em relação à acácia ($250,00 \text{ mg kg}^{-1}$) e capoeira ($362,50 \text{ mg kg}^{-1}$) (Tabela 3).

O solo do pasto, por apresentar valores positivos de mineralização de Po total após os dois tempos de incubação estudados, que foram em média de $+34,17 \text{ mg kg}^{-1}$ ($41,00 \text{ kg ha}^{-1}$ na camada 0-10 cm) para os solos incubados por 60 dias e em média de $+9,29 \text{ mg kg}^{-1}$ ($11,15 \text{ kg ha}^{-1}$ na camada 0-10 cm) para os solos incubados por 173 dias (Quadro 13 e 14), não apresentou mineralização de Po, sugerindo que entre as coberturas estudadas, esta é a cobertura que apresenta o menor potencial em mineralizar Po, o que pode ter resultado do aporte de um material orgânico ao solo mais pobre em P, em menor quantidade e com maior relação Co/ Po junto à capoeira em relação à acácia e ao sabiá (Tabela 12), resultando em uma decomposição mais lenta e em uma menor quantidade de Po mineralizado. Manhães et al. (2006), trabalhando com os mesmos solos do presente trabalho, encontraram menor densidade e diversidade de fauna no solo sob pasto.

Valores positivos de mineralização de Po e Pi em alguns solos também foram encontrados por outros autores, a exemplo de Acquaye., 1963; Grierson et al., 1998 e Araújo et al., 2004b. O que pode ter sido causado pelas condições de incubação, que influenciaram na atividade da população microbiana, aumentando a quantidade de Po mineralizado (Araújo et al., 2004b).

Neste trabalho os valores positivos de Po mineralizado podem ter ocorrido devido à manutenção da umidade a 80% da capacidade de campo, que pode ter sido maior do que o necessário para a mineralização de Po, pois o acúmulo de água propicia a formação de um ambiente redutor, inibindo a atividade microbiana, resultando em taxas menores de mineralização e

consequentemente maior acumulação de Po. De acordo com Grierson et al. (1998), é igualmente necessário avaliar a influência da umidade do solo e da temperatura sobre a mineralização do P, que podem variar com a qualidade e quantidade do substrato, uma vez que no geral ocorre uma relação negativa entre o teor de umidade do solo e da biomassa microbiana, que varia sazonalmente em resposta a mudanças na umidade e temperatura. Estes autores verificaram em seus trabalhos que com a diminuição do potencial de água, houve uma diminuição na quantidade média de Pi em todos os tratamentos e incubações. O que pode ter ocorrido em virtude do teor de Po ter diminuído, resultando em menor quantidade de Pi liberado pela mineralização das fontes de Po.

Outro fator que associado à umidade elevada pode ter propiciado aumento do Po total foi o aumento do pH desse solo durante a incubação (Tabela 13 e 14). Tendo em vista que o aumento do pH, por sua vez, possivelmente diminui a adsorção de P solúvel pela diminuição da atividade de Fe e Al, controlando a mineralização das formas menos solúveis de P (Po) (Galvão et al., 2009), resultando em aumento do Po total e, também de Po lábil.

Tabela12. Relação (Co/ Po) de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais

| Coberturas | Co/ Po |
|------------|----------------------|
| | ----- % ----- |
| Acácia | 11,29b ^{1/} |
| Sabiá | 10,72b |
| Pasto | 25,85a |
| Capoeira | 23,90a |

^{1/} Co/ Po= C orgânico total/ P orgânico total

Os solos que tiveram um período de incubação de 60 dias e receberam adição de serapilheira apresentaram uma mineralização de Po total que variou entre -519,47 mg kg⁻¹ e -315,78 mg kg⁻¹ (de -623,36 a -378,94 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm) e foi maior que os solos que não tiveram adição de serapilheira em 93,20%, 88,17% e 93,09% para as coberturas de acácia, sabiá e capoeira (Tabela 13), enquanto os solos que tiveram um período de incubação por 173 dias apresentaram uma mineralização de Po total que variou entre -492,21 mg kg⁻¹ e -

285,17 mg kg⁻¹ (de -590,65 a -342,20 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm), e também foi maior que os solos que não tiveram adição de serapilheira em 86,82%, 91,53%, 97,08% para as coberturas de acácia, sabiá e capoeira (Tabela 14).

Kingery et al. (1996), avaliando o efeito da adição de cama de frango e da fertilização contendo N, P, K e Zn sobre a liberação do Po durante um período de incubação de 254 dias em solos com preparo convencional, verificaram que no solo onde não houve adição de adubo, a mineralização de Po foi de 127,2%, sendo cerca de 11,17% e 18,08% inferior aos solos que obtiveram adição de fertilizante e cama de frango, respectivamente. Segundo os autores, a presença de maior quantidade de Po e P disponível nos solos que tiveram adição de resíduos orgânicos, é semelhante ao que ocorre em outros trabalhos, sendo importante porque além de maior quantidade de Po ser liberada para o solo a partir da decomposição dos resíduos vegetais, os ácidos orgânicos dos resíduos formam complexos estáveis com óxidos de Fe e Al presentes no solo, bloqueando os sítios de retenção de P, aumentando a disponibilidade de Pi no solo.

Realizando a adição de serapilheira sobre os solos das coberturas estudadas, a maior mineralização de Po total após 60 dias de incubação, foi verificada no sabiá com -519,47 mg kg⁻¹ (-623,36 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm) que apresentou uma mineralização de 90,14% (Tabela 13). Este valor foi 26,03% e 39,21% superior à capoeira e acácia, respectivamente. Após 173 dias de incubação, a maior mineralização de Po foi encontrada também sob o solo do sabiá com -492,21 mg kg⁻¹ (-590,65 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm), que apresentou uma mineralização de 85,41%, superior em 21,43% e 42,06% à capoeira e acácia, respectivamente (Tabela 14). Nunes (2008a), estudando as mesmas coberturas do presente trabalho, também verificou que o solo sob sabiá mostrou o maior potencial de mineralização de N (No), apresentando ao final do período de incubação No de 169,68 mg kg⁻¹ (203,62 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm), onde este valor foi em torno de 6%, 15% e 21% superior ao valor encontrado na capoeira, pasto e acácia, respectivamente, o que segundo ela sugere que o sabiá apresenta um material orgânico mais prontamente mineralizável.

Após incubação dos solos por 60 dias foi verificado que a mineralização de Po lábil nos solos incubados por 60 dias variou entre -1,58 e +2,59 mg kg⁻¹ (de -1,90 a -3,11 kg ha⁻¹ na camada 0-10 cm). Já a mineralização de Po lábil nos

solos incubados por 173 dias variou entre $-1,13$ e $+1,90$ mg kg^{-1} (de $-0,05$ a $-2,28$ kg ha^{-1} na camada 0-10 cm) (Quadro 14 e 15).

Na mineralização de Po lábil, apenas o solo sob a acácia que não recebeu adição de serapilheira apresentou mineralização após 60 dias de incubação (Quadro 13), apresentando uma mineralização de Po lábil de $-1,58$ mg kg^{-1} ($-1,90$ kg ha^{-1} na camada 0-10 cm), que corresponde a uma mineralização de 25,73%. Após 173 dias de incubação houve mineralização de Po lábil nos solos sob acácia e sabiá, apesar da maior mineralização de Po lábil ter ocorrido sob a cobertura de acácia, tanto nos solos que não tiveram adição de serapilheira $-1,13$ mg kg^{-1} ($-1,36$ kg ha^{-1} na camada 0-10 cm), quanto nos solos que receberam adição de serapilheira $-1,02$ mg kg^{-1} ($-1,22$ kg ha^{-1} na camada 0-10 cm), correspondendo a uma mineralização de 18,14% e 16,61% ,respectivamente (Tabela 14). Estes valores foram cerca de 96,46% e 90,2% superiores aos encontrados nos solos sob sabiá sem e com adição de serapilheira.

A maior mineralização de Po lábil encontrada no solo sob a acácia, apesar de no geral, esta cobertura vegetal ter apresentado menor mineralização de Po total, sugere que a acácia seria a principal fornecedora de P para o sistema solo/planta a partir da mineralização, uma vez que como o Po lábil está ligado fracamente à fase sólida do solo, estando dessa forma mais acessível à mineralização, o reservatório lábil de P orgânico pode ocupar um importante papel na fertilidade do solo, através da capacidade de detectar variações significativas do tipo de uso da área.

Como as frações lábeis de P estão intimamente ligadas às frações orgânicas (Guerra et al., 1996), os maiores valores de Po total mineralizado, junto ao segundo maior valor de Po lábil mineralizado encontrado no solo sob o sabiá, também são indicativo de que essa cobertura é de grande importância para a adição de P a partir da mineralização, já que o Po representa o mais importante reservatório de P lábil para as plantas.

As coberturas de pasto e capoeira, por terem apresentado valores de mineralização de Po lábil positivo (Tabela 13 e 14), devido ao aumento da quantidade de Po lábil após a incubação, não apresentaram mineralização desta fração, o que indica que estas coberturas apresentam um material com maior estabilidade inicial que as coberturas de acácia e sabiá, possibilitando o aumento de Po lábil após a incubação, através da liberação de fontes de P menos

disponíveis.

Tabela 13. Mineralização de fósforo orgânico total e fósforo orgânico lábil em amostras de solo (So) e solos com adição de serapilheira (Se) sob diferentes coberturas vegetais após 60 dias de incubação. Valores negativos significam decréscimos e positivos acréscimos.

| Tratamento | P orgânico total | | P orgânico lábil | | pH |
|------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|-----|
| | --mg kg ⁻¹ -- | --%-- | --mg kg ⁻¹ -- | --%-- | |
| Acácia | | | | | |
| Solo | -21,45 ^{1/} | 18,20 | -1,58 | 25,73 | 5,7 |
| So + Se | -315,78 | 85,84 | +2,22 | - | 6,0 |
| Sabiá | | | | | |
| Solo | -61,43 | 49,87 | +0,54 | - | 5,1 |
| So + Se | -519,47 | 90,14 | +1,35 | - | 5,9 |
| Capoeira | | | | | |
| Solo | -26,55 | 46,07 | +1,34 | - | 4,2 |
| So + Se | -384,22 | 91,45 | +1,45 | - | 4,6 |
| Pasto | | | | | |
| Solo | +34,17 | - | +2,59 | - | 3,7 |

^{1/}médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 14. Mineralização de fósforo orgânico total e fósforo orgânico lábil em amostras de solo (So) e solos com adição de serapilheira (Se) sob diferentes coberturas vegetais após 173 dias de incubação. Valores negativos significam decréscimos e positivos acréscimos.

| Tratamento | P orgânico total | | P orgânico lábil | | pH |
|------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|------|
| | --mg kg ⁻¹ -- | --%-- | --mg kg ⁻¹ -- | --%-- | |
| Acácia | | | | | |
| Solo | -37,591 ¹ | 31,90 | -1,13 | 18,40 | 6,00 |
| So + Se | -285,17 | 77,52 | -1,02 | 16,61 | 6,01 |
| Sabiá | | | | | |
| Solo | -41,69 | 33,84 | -0,04 | 0,78 | 6,10 |
| So + Se | -492,21 | 85,41 | -0,10 | 1,95 | 5,90 |
| Capoeira | | | | | |
| Solo | -11,28 | 19,57 | +0,66 | - | 4,80 |
| So + Se | -386,74 | 92,05 | +0,34 | - | 4,80 |
| Pasto | | | | | |
| Solo | +9,29 | - | +1,90 | - | 4,80 |

¹médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

4.6. Correlações

Os coeficientes de correlação simples entre o Po total, Po lábil e algumas características do solo são apresentados na tabela 15. Foi observada correlação positiva e significativa entre o Po total e pH. Essa informação corrobora com os resultados encontrados de Po, que no geral aumentam à medida que ocorre elevação do pH do solo (Tabela 13 e 14).

O Po lábil correlacionou-se positivamente com o P disponível extraído por Mehlich-1 (Tabela 15), indicando que em solos mais intemperizados como os solos tropicais, onde o Pi sofre forte adsorção pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, a mineralização da fração lábil de Po, assume grande importância (Silva e Mendonça, 2007), disponibilizando Pi para o sistema solo-planta. Outro fator que pode explicar essa correlação positiva, é que quanto maior a concentração de P disponível, maior o teor de Po lábil, devido à menor mineralização desta fração pelas fosfatases (Nunes et al., 2008b).

A correlação positiva e significativa entre Co e Po lábil e entre o Co e o P disponível extraído por Mehlich-1 (Tabela 15), mostra a grande dependência do Po lábil a esse compartimento (Gerra et al., 1996), indicando que a acumulação do Co resulta em aumento do Po lábil, que disponibiliza P para o sistema. De modo que sistemas de manejo que privilegiem o contínuo aporte de material orgânico podem aumentar a ciclagem do P (Andrade et al., 2003).

O coeficiente de correlação positivo e significativo entre a argila e o Co indica que em solos mais argilosos ocorre maior acumulação de C e conseqüentemente de Po. Enquanto a correlação negativa significativa entre a argila e o pH do solo, indica que quanto mais argiloso é o solo, menor o pH (Novais et al., 2007) e, portanto, maior a concentração dos íons Fe e al, que se ligam ao P, aumentando a capacidade de adsorção do solo.

Tabela 15. Coeficiente de correlação linear entre Po total, Po lábil e algumas características de amostras de solo sob diferentes coberturas vegetais.

| Variáveis | Po total | Po lábil | P | Co | pH | Argila |
|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Po total | 1,00 | 0,45 | 0,47 | -0,08 | 0,95* | -0,58 |
| Po lábil | | 1,00 | 0,96* | 0,74* | 0,43 | 0,22 |
| P | | | 1,00 | 0,79* | 0,40 | 0,26 |
| Co | | | | 1,00 | -0,18 | 0,80* |
| pH | | | | | 1,00 | -0,68 |
| Argila | | | | | | 1,00 |

* significativo em nível de 5% de probabilidade

Variáveis: Po total = fósforo orgânico total; Po lábil = fósforo orgânico lábil; P = fósforo extraído por Mehlich-1; Co = carbono orgânico total; pH = pH em água.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

RESUMO

Antes da incubação dos solos os maiores teores de P total e Po total do solo foram encontrados sob as leguminosas, enquanto os menores teores de Pt lábil e Po lábil foram encontrados sob o solo do pasto. Como o solo é o mesmo para todas as coberturas, o estoque total lábil de P no solo está sendo influenciado pela ação da cobertura vegetal, sugerindo que com exceção do pasto as demais coberturas participam igualmente com maior adição de P ao sistema. Ocorre um predomínio da fração Pi em relação à fração Po do solo sob todas as coberturas vegetais. Inversamente, o compartimento Po lábil foi maior do que o de Pi lábil. Entre as coberturas houve maior extração alcalina sob os solos da capoeira, indicando que essa cobertura apresenta um material menos lábil que as demais coberturas. Ao final do período de incubação de 173 dias, a quantidade de Po total e P total dos solos sofreu uma redução muito próxima do encontrado após 60 dias de incubação (apenas 2,19% e 0,66% maior, respectivamente), sugerindo que 60 dias de incubação à temperatura de 40°C seriam suficientes para liberar P disponível, proveniente de fontes mais lábeis para o sistema solo-planta. A adição de serapilheira não resultou em aumento de Po total nos solos

incubados. Somente houve aumento do teor de Po lábil quando se adicionou serapilheira, no solo da acácia incubado por 60 dias. Para os dois tempos de incubação estudados a maior mineralização de Po total no solo foi no sabiá, enquanto o solo sob pasto não apresentou mineralização de Po total. Os solos que receberam adição de serapilheira apresentaram maior mineralização de Po total, nos dois tempos estudados. Em relação à mineralização de Po lábil, após incubação de 60 dias, apenas o solo da acácia, tanto para os solos que receberam adição de serapilheira quanto para os solos que não receberam adição de serapilheira apresentaram mineralização. Após 173 dias, foi encontrada mineralização de Po lábil nos solos de acácia e sabiá que tiveram ou não adição de serapilheira, apesar de ter sido maior no solo da acácia, indicando que essas coberturas seriam as principais fornecedoras de P para o sistema. A correlação positiva entre Po total e pH do solo sugere que o Po total, no geral, aumenta a medida que ocorre elevação do pH do solo. O Co correlacionou-se positivamente com Po lábil e P disponível por Mehlich-1, indicando que a acumulação do Co resulta em aumento do Po lábil, que disponibiliza P para o sistema. A correlação positiva entre Po lábil e P disponível por Mehlich-1 mostra que o P é disponibilizado ao sistema através da mineralização do Po lábil. A correlação positiva entre a argila e o Co indica que solos mais argilosos acumulam mais C e conseqüentemente Po, enquanto a correlação negativa entre a argila e pH do solo, mostra que quanto mais argiloso é o solo, menor o pH e maior a concentração dos íons Fe e Al, que se ligam ao P, promovendo maior capacidade de adsorção ao solo.

CONCLUSÕES

1. Os diferentes teores de Po total e Po lábil encontrados antes e após incubação dos solos foram influenciados pela cobertura vegetal presente;
2. Antes e após incubação dos solos, a fração Po lábil predominou em relação à fração Pi lábil do solo, indicando que a fração orgânica contribui significativamente para o fornecimento de P às plantas;

3. O tempo de incubação de 60 dias foi suficiente para que ocorresse a liberação do P de fontes mais lábeis para o sistema solo-planta, promovendo a estabilização da quantidade de P total do solo;
4. A adição de serapilheira proporcionou maior quantidade de Po lábil no solo da acácia, somente após 60 dias de incubação, sugerindo que esta cobertura apresenta uma decomposição mais lenta que as demais;
5. O solo do sabiá apresentou a maior mineralização de Po total, devido ao maior teor de P na serapilheira, que a torna mais lábil;
6. O solo do pasto não apresentou mineralização de Po total, indicando que este apresenta o menor potencial em mineralizar Po;
7. A maior mineralização de Po lábil nas coberturas de acácia e sabiá com e sem adição de serapilheira, indica que estas coberturas são as principais fornecedoras de P para o sistema;
8. O Po lábil apresentou correlação positiva com o P disponível e com o Co, evidenciando a dependência do P em relação à fonte orgânica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACQUAYE, D. K. (1963) Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil*, 1: 65-80.
- ANDERSON, G. (1960) Factors affecting the estimation of phosphate esters in soil. *J. Sci. Food Agric.* 9:497-503.
- ANDERSON, J. D.; INGRAM, J. S. I. (1996) Tropical soil biology and fertility. In: *A handbook of methods*. 2. ed. Wallingford, UK CAB International, 171.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F. (2003) Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1003-1011.
- ANJOS, L. H. C., PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. (2008) Matéria orgânica e pedogênese In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F. A. O. *Fundamentos da matéria orgânica do solo- ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. Metrópole, Porto Alegre, p. 65-82.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. (2004a) Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:337-345.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. (2004 b) Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em

- Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 27:985-1002.
- BOWMAN, R. A. (1989) A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and diluted base for soil organic phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J., 53:326-366.
- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. (1978) An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Sci., 125:49-54.
- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. (1976) Transformation of organic phosphorus substrates in soil as evaluated by NaHCO₃ extraction. Soil Sci., 125:49-54.
- BORIE, F.; RUBIO, R. (2003) Total and organic phosphorus in Chilean volcanic soils. Gayana Bot. 60: (1) 69-78.
- BRAGA, J.M., DEFELIPO, B.V. (1974) Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solo e material vegetal. R. Ceres, Viçosa, 21: 73-85.
- BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. (2005) Fósforo num cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo I-fracionamento seqüencial. R. Bras. Ci. Solo, 29:935-944.
- CARVALHO, M. M. D. F.; XAVIER & M.J. ALVIM. (2003) *Arborização melhora a fertilidade do solo em pastagens cultivadas*. Embrapa Gado de Leite, 4 p. (Comunicado técnico, 29).
- CHADA, S. S.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. (2004) Sucessão vegetal em uma encosta reflorestada com leguminosas arbóreas em Angra dos Reis, RJ. Viçosa. Rev. Árvore, 28: (6) 801-809.
- CLEMENTE, C. A.; AZEVEDO, A. C. (2007) Mineral weathering in acid saprolites from Subtropical, southern Brazil. Sci. Agric. Piracicaba, Braz., 64: (6) 601-607.
- CONDRON, L.M.; MOIR, J.O.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. (1990) Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1261-1266.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. (2002) Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 26: 925-930.
- CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. G. (1999) Formação de serrapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, S. A. O. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. 1. Ed. Porto Alegre, Gênese, p. 197-225.
- COSTA, G. S.; FRANCO, A. A.; DAMASCENO, R. N.; FARIA, S. M. (2004) Aporte de nutrientes pela serrapilheira em uma área degradada e revegetada com leguminosas arbóreas. R. Bras. Ci. Solo, 28: 918-927.

- CUNHA, G. M. (2002) Balanço e ciclagem de nutrientes em florestas montanas da mata atlântica e em plantio de eucalipto na região Norte Fluminense. Tese (doutorado em produção vegetal) - Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 122p.
- CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S.; VELLOSO, A.C.X. (2007) Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. R. Bras. Ci. Solo, 31:667-671.
- DUDA, G.P. (2000) Conteúdo de fósforo microbiano, orgânico e biodisponível em diferentes classes de solos. Tese (doutorado) – Itaguaí – RJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 158p.
- DICK W. A.; TABATABAI, M. A. (1977) Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. J. Environ. Qual. 6:82-85.
- EIRA, A. F. (1995) Influência da cobertura morta na biologia do solo. In: I Seminário sobre Cultivo mínimo do solo em Florestas, Curitiba - PR, p.11-18.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1999). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, 379p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1997). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 212p.
- FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; NETO, A. E. F.; CURI, N. (2002) Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. Pesq. agropec. bras., Brasília, 37: (3) 373-383.
- FERNANDES, M. M.; PEREIRA, M. G.; MAGALHÃES, L. M. S.; CRUZ, A. R.; GIÁCOMO, R. G. (2006) Aporte e decomposição de serapilheira em áreas de floresta secundária, plantio de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) na flona Mário Xavier, RJ. Santa Maria. Ciência Florestal, 16: (2) 163-175.
- GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; VIANA, A. P.; SANTOS, G.A. (2008) Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 32:1489-1499.
- GARCEZ, S. F. (2005) Produção, decomposição e liberação de nutrientes do folheto de diferentes coberturas florestais na região norte fluminense. Iniciação Científica. (Graduando em Agronomia) – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 8p.

- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; SAGGIN, A. (2002) Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em latossolo vermelho Distroférico. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1023-1029.
- GATIBONI, L. C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. (2003) Tese (doutorado) - Santa Maria - RS. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 231p.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. (2008) Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 43: (8) 1085-1091.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H. (2009) Soil phosphorus fractions in sandy soils amended with cattle manure for long periods. *R. Bras. Ci. Solo*, 33: 613-622.
- GEORGE, T. S.; TURNER, B. L.; GREGORY, P. J.; CADE-MENUM, B. J.; RICHARDSON, A. E. (2006) Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. *Eur. J. Soil Sci.*, 57: 1-47.
- GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. (2001) A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. *Informações agronômicas, POTAFOS*, setembro, nº 95.
- GRIERSON, P. F.; COMERFORD, N. B.; JOKELA, E. J. (1999) Phosphorus mineralization and microbial biomass in a Florida Spodosol: effects of water potential, temperature and fertilizer application. *Biol Fertil Soils* 28 :244–252.
- GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.J.; SANTOS, G.A.; FERNANDES, M.S. (1996) Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesq. Agropec. Bras*, 31: 291-299.
- GUERRA, J. G. M. (1993). Produção sazonal de *Brachiaria decumbens* Stapf., conteúdo de fósforo orgânico e microbiano em solos tropicais de baixa fertilidade natural. Tese (doutorado) – Itaguaí - RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 234p.
- LEITÃO, M. R. S. M. M. (1997) Fixação biológica de Nitrogênio por espécies arbóreas. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, H. *Biologia dos solos dos cerrados*, 1. ed. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 56-59.
- JESUS, E. C.; SCHIAVO, J. A.; FARIA, S. M. (2005) Dependência de micorrizas para a nodulação de leguminosas arbóreas tropicais. *R. Árvore*, Viçosa-MG, 29: (4) 545-552.
- KINGERY, W.L.; WOOD, C.W.; WILLIAMS J.C. (1996) Tillage and amendment effects on soil carbon and nitrogen mineralization and phosphorus release. *Soil & Tillage Research* 37: 239-250.

- JÚNIOR, M. M.; MELO, W. J. (2000) Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 35: (6) 1177-1182.
- MANHÃES, C. M. C.; GAMA RODRIGUES, E. F. DA; MOÇO M. K. DA S.; GAMA-RODRIGUES, A. C. DA. (2006) Caracterização da fauna do solo e da serapilheira de leguminosas florestais em pastagem. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais: *Bases científicas para o desenvolvimento sustentável*, 6, Campos dos Goytacazes: Sociedade Brasileira de Sistemas Agroflorestais/ UENF. CD-Rom.
- MARINHO, N. F.; CAPRONI, A. L.; FRANCO, A. A. & BERBARA, R. L. L. (2004) Respostas de *Acacia mangium* Willd e *Sclerobium paniculatum* Vogel a fungos micorrízicos arbusculares nativos provenientes de áreas degradadas pela mineração de bauxita na Amazônia. *Acta bot. bras.* 18(1): 141-149.
- MARQUES, T. C. L. DE S. E M. M.; VASCONCELLOS, C. A.; FILHO, I. P.; FRANÇA, G. E. & CRUZ, J. C. (2000) Envolvimento de dióxido de carbono e mineralização de nitrogênio em latossolo vermelho-escuro com diferentes manejos. *Pesq. Agropec. Bras.* Brasília, 35: 581-589.
- MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. (2006) Formas de fósforo no solo em sistemas de Milho exclusivo e consorciado com feijão Sob adubação orgânica e mineral. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:625-632.
- MEHTA, N. C., LEGG, J. O. GORING, C. A. I., BLACK, C. A. (1954) Determination of organic phosphorus in soils. I. Extraction method. *Soil Science Society American Proceedings*. 18:443-449.
- MELLONI, R.; NOGUEIRA, M. A.; FREIRE V. F.; CARDOSO, E. J. B. N. (2000) Fósforo adicionado e fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e nutrição mineral de limoeiro-cravo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:767-775.
- MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MARTINS. P. F. S. (2001) Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 36: (11) 1409-1418.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27:31-36.
- NOVAIS, R.F.; SMITH, T. J.; BARROS, N. F. (1998) A natureza não tem palito de fósforo. *Boletim sobre mineralização de fósforo*. Viçosa, MG. P. 22-30.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. (1999) Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 399p.
- NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. & NUNES, F. N. Fósforo. (2007) In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; BARROS. N. F.; FONTES, R. B. C.; NEVES, J. C. L.

- Fertilidade do solo 2007. 1. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Viçosa, M G, p. 471-550.
- NUNES, D. A. D.; GAMA-RODRIGUES, E. F. GAMA-RODRIGUES. A. C. (2009) Potencial de mineralização de C em solos com e sem adição de serapilheira sob diferentes coberturas vegetais. Rev. Bras. De Agroecologia, 4: (2).
- NUNES, D.A.D. (2008a) Mineralização de C e N em solos sob diferentes coberturas vegetais. (monografia) - Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 26p.
- NUNES, F. N.; CANTARUTTI, R. B.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; TÓTOLA, M. R.; RIBEIRO, B. N. (2008b) Atividade de fosfatases em gramíneas forrageiras em resposta à disponibilidade de fósforo no solo e à altura de corte das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 32:1899-1909.
- PARRON, L. M.; BUSTAMANTE, M. M. da C.; PRADO, C. L. C. (2003) *Mineralização de nitrogênio e biomassa microbiana em solos de mata de galerias: efeito do gradiente topográfico*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. EMBRAPA. (Comunicado técnico, 88).
- PAULINO, G. M.(2003). Cobertura florestal e qualidade de solo em terras degradadas no Norte Fluminense. Tese (Mestrado) - Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 89p.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. (2008) Disponibilidade de nutrientes no Solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de Resíduos vegetais. R. Bras. Ci. Solo, 32:911-920.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. (2003) Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. R. Bras. Ci. Solo, 27:41-49.
- ROCHA, A. T.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO, M. R. (2005) Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9: 178-184.
- SAGGAR, S.; PARFITT, R.L.; SALT, G.; SKINNER, M.F. (1998) Carbon and phosphorus transformations during decomposition of pine forest floor with different phosphorus status. Biol Fertl Soils, 27 :197–204.
- SAGGIN, A.; GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINKI, J.; BRUNETTO, G.; FLORES, J. P. C.; POCOJESKI, E.; SANA, R. S. (2002) labilidade de formas de fósforo às plantas estimada por cultivos sucessivos com plantas. In: Congresso FertBio. CD-Rom.
- SANTOS, D. R.; CASSOL, P. C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (2008a) Fundamentos da matéria orgânica do solo- ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed.

Metrópole, Porto Alegre, p. 65-82.

- SANTOS, J. Z. L.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. (2008b) Frações de fósforo em solo adubado com Fosfatos em diferentes modos de Aplicação e cultivado com milho. R. Bras. Ci. Solo, 32:705-714.
- SAUNDERS, W. M.H.; WILLIAMS, E. G. (1955) Observation on the determination of total organic phosphorus in soils. Journal of Soil Science. Cambridge. 6: 254-267.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. (2007) Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. B. C.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo 2007. 1. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Viçosa, M G, p. 275-374.
- SILVA, M. P. S. (2005) Biomassa e caracterização química da serrapilheira e nível de fertilidade do solo sob diferentes coberturas florestais na Região Norte Fluminense. (monografia) - Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 24p.
- SIQUEIRA, J.O. & MOREIRA, F.M.S. (2001) Biologia e bioquímica do solo. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 291p.
- VINCENT, A . G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. (2010) Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*. 61: 48–57.
- ZAIA, F.C. (2005). Frações de fósforo do solo sob diferentes coberturas vegetais no norte fluminense e em plantios de cacau no sul da Bahia. Tese (Mestrado) - Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 89p.
- ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F. (2008a) Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. R. Bras. Ci. Solo, 32: (3) 1191-1197.
- ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MACHADO, R. C. R. (2008b) Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. R. Bras. Ci. Solo, 32:1987-1995.