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

**Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em
solos de Cerrado**

Marcos Rodrigues

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2013**

Marcos Rodrigues
Engenheiro Agrônomo

Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO SERGIO PAVINATO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2013

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

Rodrigues, Marcos

Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado / Marcos Rodrigues. - - Piracicaba, 2013.
113 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.
Bibliografia.

1. Plantio direto 2. Preparo convencional 3. Fracionamento de fósforo 4. Latossolos
I. Título

CDD 631.42
R698s

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

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Aroldo e Vilma,
pela minha criação, educação e
exemplo que sempre foram em minha vida.

Às minhas irmãs Gisele e Bruna,
pelo amável convívio e contínuo estímulo em toda minha vida.

À Vanessa, minha noiva, companheira e confidente em todos os momentos,
Pela força, paciência, carinho e todo o amor sempre concedido.

Ao meu filho, João Vitor,
pelo amor incondicional e renovação de minhas forças.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por todas as bênçãos em minha vida.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato, pelo estímulo, amizade, companheirismo, compreensão e pelos conselhos e orientação em todas as etapas desse projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas e ao Departamento de Ciência do Solo, por meio dos seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e pelo apoio técnico, científico e material em todas as fases do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de minha bolsa de Mestrado.

À Fundação AGRISUS, pelo apoio concedido ao projeto.

À empresa SLC Agrícola, ao diretor-presidente Dr. Aurélio Pavinato, e aos técnicos agrícolas Augusto Arnt, José Deniz, Carlos Deves e Tiago Bianchetto pela inestimável ajuda com a escolha das áreas e coletas de amostras de solo para o estudo realizado.

Aos técnicos dos Laboratórios de Química e Fertilidade do Solo, Microbiologia do Solo e Química Ambiental, Luiz Silva, Claudinei de Lara, Denise Mescolotti, Luiz Fernando Baldesin, e Marina Colzato por toda ajuda e sugestões.

Aos amigos e companheiros de república Flávio Henrique Silveira Rabêlo, Hugo Abelardo Gonzalez Villalba e Emanuel Júnior da Silva Nunes, por todo apoio e parceria nesses anos de convívio.

Aos amigos e companheiros de laboratório Ana Paula Bettoni Teles, Bruna Arruda, Ioná Rech, José Carlos Rojas Garcia, Valdevan Rosendo dos Santos, Wilfrand Ferney Bejarano Herrera, por todo o apoio e pelo companheirismo e amizade construída.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Raul Alfonso Filho, Elizeu Munhoz, Michelly Silva, Fabiana Schmidt, Tiago Garcez, Márcio Megda, Beatriz Nastaro, Carla Bastos, Carlos Nascimento, Eduardo Zavaschi, Cintia Lopes, Evandro Schoninger, Carmelice Bolf, Lucas Miachon, Eduardo Mariano, Paulo Lazzarini, José Marcos Leite, Adriano Anselmi, Gustavo Portz, Lucas Amaral, Fernando Guerra, Élcio Santos, Fernando Giovanetti, Riviane Donha, Danielle Oliveira, Fábio Coutinho César, Luiz Tadeu Jordão, Lucas Sartor, Murilo de Campos, Anderson Braz, Roberta Nogueirol, Ederlon Flávio e tantos outros colegas que tive nessa jornada.

Aos amigos, Daiane Martin Borges, Deyvison Asevedo Soares, Bruno Sattolo, Tobias Walzberg, Virgílio Nantes, Gabriel Novoletti e Nathanael Campos, por todo apoio concedido para realização desse projeto, durante a realização de seus estágios.

À Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), pela minha formação como engenheiro agrônomo e apoio profissional posterior, os quais me permitiram chegar até onde estou hoje.

A todos que, direta ou indiretamente, me auxiliaram na finalização desse projeto de formação profissional.

Muito Obrigado!

EPIGRAFE

*“Todo mundo é um gênio. Mas se
você julgar um peixe pela sua
habilidade de subir em árvores,
ele viverá o resto de sua vida
acreditando que é um idiota.”*

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Panorama do Cerrado Brasileiro.....	19
2.2 Sistemas de manejo do solo.....	21
2.3 Efeitos do manejo na fertilidade do solo	24
2.4 Dinâmica das formas de P no solo	26
2.5 Mudanças na dinâmica do P promovidas pelo manejo do solo	28
2.6 Fracionamento de P	30
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Descrição das áreas de estudo	33
3.2 Caracterização dos locais de estudo	36
3.3 Delineamento experimental.....	37
3.4 Atributos avaliados	38
3.4.1 Primeiro estudo: atributos químicos do solo	38
3.4.2 Segundo estudo: frações de P no solo	38
3.5 Análises estatísticas	39
4 RESULTADOS	41
4.1 Atributos químicos de fertilidade do solo	41
4.1.1 Teores de MO no solo	42
4.1.2 pH do solo.....	44
4.1.3 Teores de H + Al (acidez potencial do solo)	46
4.1.4 Teores de K no solo	47
4.1.5 Ca trocável no solo	49
4.1.6 Mg trocável no solo	51
4.1.7 Saturação por cátions não ácidos no solo (V%)	53
4.2 Frações de P no solo	55
4.2.1 Frações inorgânicas	57
4.2.1.1 P extraído por resina (P _{RTA}).....	57
4.2.1.2 P inorgânico extraído por NaHCO ₃	59
4.2.1.3 P inorgânico extraído por NaOH-0,1 mol L ⁻¹	61

4.2.1.4 P extraído por HCl	63
4.2.1.5 P inorgânico extraído por NaOH-0,5 mol L ⁻¹	64
4.2.2 Frações orgânicas	66
4.2.2.1 P orgânico extraído por NaHCO ₃	66
4.2.2.2 P orgânico extraído por NaOH-0,1 mol L ⁻¹	68
4.2.2.3 P orgânico extraído por NaOH-0,5 mol L ⁻¹	70
4.2.3 P residual e P total do solo	72
4.3 Distribuição das frações de P com a labilidade.....	75
5 DISCUSSÕES.....	79
5.1 Atributos químicos de fertilidade do solo	79
5.2 Frações de P no solo.....	83
5.2.1 Frações inorgânicas.....	83
5.2.2 Frações orgânicas.....	86
5.2.3 P residual e P total do solo	88
6 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS	93
APÊNDICES.....	103

RESUMO

Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado

O sistema de manejo adotado e o tempo de cultivo acabam influenciando na disponibilidade de nutrientes, promovendo mudanças nas formas com que estes nutrientes se acumulam no solo, principalmente no caso do fósforo. Objetivou-se com o estudo avaliar as mudanças em longo prazo promovidas por sistemas de manejo do solo na fertilidade e nas frações de P em solos de Cerrado. Visando a melhor caracterização do bioma, foram analisados quatro experimentos de manejo do solo instalados em quatro locais representativos do Cerrado, sob Latossolo Vermelho (LV) ou Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), localizados em Costa Rica-MS (LV-1), Sapezal-MT (LV-2), Luziânia-GO (LVA-1) e Tasso Fragoso-MA (LVA-2). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, com parcelas constituídas pelos manejos, sendo eles o plantio direto (PD), o preparo convencional (PC) e a vegetação nativa (Cerrado), e como subparcelas foram consideradas as profundidades avaliadas: 0-5, 5-10 e 10-20 cm, com quatro repetições, totalizando 36 parcelas por área de estudo. Analisaram-se os atributos químicos do solo: potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, matéria orgânica (MO), acidez potencial ($H + Al$), e ainda a saturação por cátions no solo (V%). Realizou-se também o fracionamento do P visando identificar frações inorgânicas e orgânicas no solo. Os extratores, na sequência, foram: resina (P_{RTA}), $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi_{BIC} e Po_{BIC}), $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ($Pi_{HID-0,1}$ e $Po_{HID-0,1}$), HCl 1 mol L^{-1} (P_{HCl}), $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ($Pi_{Hid-0,5}$ e $Po_{Hid-0,5}$) e a digestão do resíduo ($P_{Residual}$, Pi e Po). A MO do solo foi influenciada diretamente pelo sistema de manejo, com aumento expressivo na camada superficial (0-5 cm) do solo quando manejado sob PD e com maior tempo no sistema. O pH, a acidez potencial e os teores trocáveis de K, Ca e Mg, bem como a saturação por bases do solo, em superfície (0-10 cm), foram maiores com a adoção do PD, comparado ao PC, em função deste manejo promover a deposição em superfície de corretivos, fertilizantes e resíduos vegetais no solo, o que não ocorre no PC. A adoção do PD resultou em acúmulo de frações orgânicas de P na camada superficial do solo e incrementou todas as frações inorgânicas de P, com maiores diferenças para o PC nos 10 primeiros cm do solo. O PC promoveu acúmulo de frações orgânicas de menor labilidade em subsuperfície nos solos argilosos. No solo mais arenoso a proporção das frações orgânicas de P foi muito inferior à observada em solos argilosos.

Palavras-chave: Plantio direto; Preparo convencional; Fracionamento de fósforo; Latossolos

ABSTRACT

Management systems affecting the dynamics of phosphorus and fertility in Cerrado soils

The soil management and cultivation time affect the availability of nutrients, changing the forms that they accumulate in the soil, especially in the case of phosphorus (P). This study aimed to evaluate the changes promoted by long-term tillage systems on soil fertility and on P fractions in Cerrado soils. To the better characterization of the biome, four experiments of soil management were analyzed, in four sites representing the Cerrado under Brazilian Oxisols (“Latossolo Vermelho”, LV and “Latossolo Vermelho-amarelo”, LVA), located in Costa Rica - MS (LV-1), Sapezal - MT (LV-2), Luziânia - GO (LVA-1) and Tasso Fragoso MA - (LVA-2). The experiments were distributed in a split plot randomized blocks design, with plots constituted of managements no-till (PD), conventional tillage (PC) and native vegetation (Cerrado), and the depths of 0-5, 5-10 and 10-20 cm were considered as subplots, with four replications, totaling 36 plots per study area. The soil chemical attributes analyzed were: exchangeable potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg), organic matter (MO), potential acidity (H+Al) and soil cations saturation (V%). Also, the fractionation of P was analyzed to identify organic and inorganic P fractions, using the following extractors: resin (P_{RTA}), NaHCO_3 0.5 mol L⁻¹ (P_{BIC} and P_{OBIC}), NaOH 0.1 mol L⁻¹ ($P_{HID-0,1}$ and $P_{OHID-0,1}$), HCl 1 mol L⁻¹ (P_{HCL}), NaOH 0.5 mol L⁻¹ ($P_{HID-0,5}$ and $P_{OHID-0,5}$) and residual P digestion ($P_{Residual}$). The soil OM was directly affected by management systems, with expressive increase in the soil surface layer (0-5 cm) when managed under PD and longer time. The pH, potential acidity and levels of exchangeable K, Ca, Mg, and V% in soil surface (0-5 and 5-10 cm) were higher with PD compared to PC, because of surface lime and fertilizer applications and crop residues deposition, which doesn't occur on PC management. The PD resulted in accumulation of organic P fractions in the soil surface layer and increased all the inorganic P fractions, with larger differences for the PC in the first 10 cm layer. The PC promoted accumulation of organic P fractions of lower lability in subsurface of the clayey soils. In sandy soil the proportion of organic P fractions was much lower than in clayey soils.

Keywords: No-tillage; Conventional tillage; Phosphorus fractionation; Oxisols

1 INTRODUÇÃO

“Se a aparência e a essência das coisas coincidissem,
a ciência seria desnecessária.”

Karl Marx

A ocupação agrícola do Cerrado brasileiro tem sido uma necessidade mundial, pois a melhoria das condições econômicas e a utilização de produtos agrícolas como fonte de combustíveis têm provocado acelerado crescimento na demanda. O Cerrado brasileiro é a grande fronteira agrícola mundial da atualidade, onde existem condições técnicas e econômicas favoráveis à expansão da produção.

A expansão da produção de grandes culturas como soja, milho e algodão no Cerrado foi motivada por diversos fatores, entre os quais, topografia, possibilitando a mecanização completa do processo produtivo, regime de chuvas para obtenção de algodão de alta qualidade e maior organização técnica e administrativa do produtor, possibilitando obter alta produtividade. Porém, a sustentabilidade da rotação soja-milho-algodão vem à tona, sobretudo em função do manejo do solo, principalmente pelo uso do preparo convencional nos primeiros anos de cultivo após abertura do Cerrado.

Os solos do Cerrado são originalmente de baixa fertilidade. Para atingir alta produtividade são necessárias correções pesadas com calcário, fósforo (P), potássio, enxofre e micronutrientes, demandando expressivos investimentos de capital e energia. A evolução da fertilidade do solo é um indicador importante de sustentabilidade do sistema de produção, tanto no sentido de uso dos fertilizantes de forma mais eficiente, quanto na avaliação das possíveis perdas e respectivas consequências técnicas, econômicas e ambientais.

A utilização do sistema de preparo convencional (PC) do solo por muitos anos provoca erosão, alta taxa de mineralização da matéria orgânica e redução da qualidade do solo. Nesse sentido, o sistema plantio direto (PD) apresenta-se como uma boa alternativa para o manejo do solo, visto que esse sistema proporciona alterações na dinâmica de decomposição dos resíduos vegetais, pelo não revolvimento do solo. Os resíduos vegetais mantidos na superfície funcionam como um reservatório de nutrientes, que são liberados lentamente pela ação de microrganismos e, com o passar do tempo, ocorre um aumento no teor de matéria orgânica do solo (MO) quando comparado ao PC, devido à menor taxa de decomposição, aumentando a fertilidade de solos ácidos com cargas dependentes de pH associadas à matéria orgânica, predominantes no Cerrado (SIDIRAS; PAVAN, 1985; RHEINHEIMER et al., 1998).

Falando especificamente do P, os solos podem ser considerados como fonte ou dreno do nutriente. Solos em estágio avançado de intemperismo, como os solos tropicais do Cerrado brasileiro, apresentam características como maior eletropositividade, menor capacidade de troca de cátions, aumento da adsorção aniônica, diminuição da saturação por bases, entre outras. Neste caso, o solo compete com a planta pelo fertilizante adicionado, caracterizando-se como dreno (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O P no solo encontra-se em formas orgânicas e inorgânicas, retido nos argilominerais e compostos orgânicos com diferentes graus de energia, com maior concentração nos horizontes superficiais. O conteúdo total de P e sua distribuição variam em função, principalmente, do material de origem e do manejo do solo. As formas do P no solo vão desde o P ligado à rede cristalina de alguns minerais até formas orgânicas estáveis, as quais se encontram em equilíbrio dinâmico.

Sistemas conservacionistas como o PD alteram a dinâmica do P no solo, promovendo um acúmulo na camada superficial, que pode ter concentrações do nutriente de 4 a 7 vezes superiores às encontradas no PC (MUZILLI, 1983), com altos níveis de P orgânico, os quais podem compreender de 3 a 90% do P total do solo e de 1 a 3% da matéria orgânica. Além disso, o PD pode promover incrementos nas formas orgânicas lábeis de P (RHEINHEIMER; ANGHINONI; KAMINSKI, 2000; OLIBONE, 2005).

A avaliação de diferentes manejos da adubação fosfatada ou mesmo de rotação de culturas, sobre a dinâmica e a disponibilidade de P pode ser realizada através da utilização do fracionamento. A metodologia amplamente utilizada para estes estudos em sistemas agrícolas é a de Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Sua principais vantagens são a identificação concomitante do P inorgânico (P_i) e orgânico (P_o), as quais podem ser agrupadas segundo a labilidade no solo. Com o uso desta metodologia, portanto, é possível avaliar as diferentes frações no solo, as quais compreendem o P lábil (extraído com resina e com NaHCO_3), o P moderadamente lábil (ligado ao Fe e Al, extraído com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ somado ao ligado à cálcio, extraído com HCl 1 mol L^{-1}) e P de maior recalcitrância (usualmente conhecido como não-lábil), extraído com NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e com a digestão do residual.

As técnicas de fracionamento visam à identificação das formas preferenciais com que o P é retido no solo, sua ocorrência e magnitude com que contribuem para a capacidade de suprimento às plantas. Assim, estudar as frações desse nutriente é de suma importância, levando em consideração a variação existente entre diferentes tipos de solos e sistemas de cultivo, sobretudo no manejo das práticas de correção e adubação empregadas, o que altera o comportamento e a dinâmica das formas do P nos solos.

O objetivo geral deste estudo foi de avaliar as mudanças promovidas pelos sistemas de manejo do solo nos atributos químicos de fertilidade e nas frações de P em solos de Cerrado, comparado com áreas nativas, sem cultivo.

As hipóteses foram que:

- O sistema PD proporciona distribuição diferenciada de cátions no solo, proporcionando acúmulo em superfície de nutrientes essenciais às plantas e redução da acidez do solo, o que não ocorre no PC, com distribuição mais uniforme de nutrientes no perfil.

- A adoção do PD modifica a dinâmica do fósforo, promovendo acúmulo de frações orgânicas em camadas mais superficiais e aumento de frações de maior labilidade no solo, enquanto que no PC há maior mineralização da matéria orgânica e maior superfície de contato do P com elementos adsortivos no solo, promovendo a acumulação de P em frações de menor labilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama do Cerrado Brasileiro

O Cerrado brasileiro está localizado em região tipicamente tropical, com abrangência desde próximo da linha do Equador até próximo do trópico de Capricórnio. Com área de aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados, é o segundo maior bioma do Brasil (Figura 1), correspondendo a 23,92% do território nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2004). Segundo a classificação de Köppen, o clima é tropical (Aw), com estações chuvosa e seca bem definidas. A estação chuvosa compreende o período de setembro/outubro a abril/maio, com período de seca variando de quatro a sete meses, e precipitação média anual variando desde 600 a 2200 mm, de acordo com cada região. Em 81,6% da área do Cerrado chove acima de 1200 mm anuais, condição na qual normalmente não há déficit significativo de água para as culturas comerciais cultivadas no período chuvoso (PAVINATO, 2009).

O clima quente, com temperaturas médias elevadas em todos os meses do ano e a alta umidade durante o período chuvoso, cria condições para uma alta taxa de mineralização da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes em curto prazo. Por sua vez, a ausência de chuvas entre maio e setembro dificulta a produção de matéria seca com espécies utilizadas como culturas de cobertura de solo.

Figura 1- Mapa dos biomas do Brasil mostrando a localização geográfica do Cerrado

Fonte: IBGE (2004)

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004), em levantamento nacional dos biomas do Brasil, a vegetação do Cerrado, com 123,7 milhões de hectares de cobertura vegetal natural, apresenta sua maior parte (61%) ocupada por áreas com aspectos savânicos (áreas de estrato graminoso com distribuição de árvores e arbustos sem a formação de um dossel contínuo ou descontínuo), sendo que outros 32% são compostos por fisionomias florestais, e o restante (7%) pela vegetação campestre.

Quanto aos solos do Cerrado, estes são em sua maioria com potencial para cultivo agrícola, dependendo da localização geográfica e da topografia, havendo predomínio de Latossolos (45,7%), Neossolos (15,2%) e Argissolos (15,1%) (CORREIA; REATTO; SPERA, 2004). Os Latossolos são caracterizados por solos bem intemperizados, com baixo teor de nutrientes, elevada acidez e predominância de argilas de baixa atividade (caulinitas e oxi-hidróxidos de Fe e Al) (SOUSA; LOBATO, 2004). Isso se deve em muito ao processo de formação destes solos, a latolização, que consiste na remoção de sílica e das bases (sobretudo cálcio, Ca; magnésio, Mg e potássio, K) após transformação pelo intemperismo dos minerais primários constituintes. Entretanto, constituem-se de solos passíveis de utilização com culturas agrícolas, por normalmente apresentarem-se sob relevos planos a suave-ondulados, com declividade raramente superior a 7%, facilitando os processos envolvidos na mecanização (RESENDE et al., 1995).

Os Argissolos do Cerrado, por sua vez, são caracterizados por um horizonte A ou E (horizonte de perda de argila, ferro ou matéria orgânica, de coloração clara) seguidos de um horizonte B textural, ou seja, uma mudança abrupta na classe textural (SOUSA; LOBATO, 2004). Por serem solos de propriedades variadas e ampla variabilidade de características físicas e químicas, estes não podem ser generalizados quanto as suas qualidades. Já os Neossolos Quartzarênicos são solos originários de depósitos arenosos, apresentando textura entre areia ou areia franca, com teores de argila inferiores a 15%. Embora sejam considerados como de baixa aptidão agrícola, em consequência da demanda por novas áreas para o cultivo agrícola, sobretudo após a década de 1980, estes foram sendo incorporados ao sistema produtivo, inicialmente ocupados com pastagens, sendo posteriormente incorporados ao complexo de produção de grãos (MARTHA JUNIOR; VILELA; SOUSA, 2007). O uso contínuo desses solos, com culturas anuais, pode acarretar rápida degradação, porém o manejo correto pode elevar o seu potencial produtivo em curto prazo (SPERA et al., 1999).

Quanto à produção de grãos no Cerrado, a região central (Centro-oeste do Brasil) apresentou aumento significativo na área cultivada com grãos nos últimos anos, passando de 6,7 milhões de ha (1992/93) para 20,6 milhões de ha na safra 2012/13, representando um

aumento de mais de 300% na área cultivada. A produção, por sua vez, alcançou números ainda mais expressivos, saindo de 14,5 milhões de toneladas em 1992/93 para incríveis 77,6 milhões de toneladas de grãos produzidos em 2012/13, ou seja, um incremento de mais de 5 vezes na produção num intervalo de vinte anos, com produtividade média aumentando no mesmo período de 2.167 para 3.760 kg ha⁻¹. Tais números tornam o Cerrado brasileiro definitivamente o celeiro da produção agrícola do Brasil, concentrando aproximadamente 49% da produção nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

2.2 Sistemas de manejo do solo

O sistema de preparo convencional (PC), com a utilização de arados, grades e subsoladores, é um dos responsáveis pela degradação acelerada do solo e consequente perda de solo, água e nutrientes por erosão hídrica e eólica. Este sistema foi amplamente utilizado nas áreas agrícolas brasileiras até as décadas de 80 e 90, e continua ainda a ser utilizado em algumas regiões.

O uso do PC causa a destruição de agregados do solo e, se executado na estação das chuvas, deixa a superfície do solo exposta, sem nenhuma cobertura vegetal ou restos de plantas. O resultado é o impacto direto da gota de chuva, causando encrostamento na superfície do solo, diminuição da infiltração de água e consequente formação de enxurradas (GOEDERT; SCHERMACK; FREITAS, 2002). A utilização do PC geralmente resulta em declínio da concentração de matéria orgânica do solo, ocasionado pelo uso indiscriminado de arações, gradagens e escarificações, as quais interferem na atuação da biomassa microbiana do solo, proporcionando estímulo a maior mineralização do material orgânico (PAUSTIAN et al., 2000; LAL, 2002).

As experiências no Sul do Brasil demonstraram que a utilização de práticas mecânicas (terraços, cordões vegetados ou de pedras, etc.), como única forma de controle da erosão, sem proteção da superfície do solo, não são suficientes para o controle efetivo da erosão hídrica do solo. As severas perdas econômicas e ambientais causadas pela erosão motivaram forte movimento em favor da adoção do PD (GOEDERT; SCHERMACK; FREITAS, 2002).

O sistema de plantio direto (PD) é a forma de manejo conservacionista que envolve um conjunto de técnicas integradas que visam otimizar a expressão do potencial genético de produção das culturas com simultânea melhoria das condições ambientais (água-solo-clima). O PD está fundamentado em três requisitos mínimos: revolvimento do solo restrito à cova ou

sulco de plantio, a biodiversidade pela rotação de culturas, e a cobertura permanente do solo com culturas específicas para formação de palhada. Estes requisitos são associados, ainda ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas invasoras (LOPES et al., 2004).

Considerado um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura Brasileira, a introdução do PD no Sul do Brasil se deu a partir do início da década de 1970. Seu objetivo básico inicial foi controlar a erosão hídrica. Com crescimento inicial pouco expressivo, em termos de área, foi a partir da década de 1990 que ocorreu grande expansão da área sob PD, tanto na região sul como na região do Cerrado.

Segundo Derpsch et al. (2010), no ano de 2010 estimava-se que no mundo existiam pouco mais de 116 milhões de ha sob PD, sendo os Estados Unidos os detentores da maior área sob esse sistema, com 26,5 milhões de hectares, seguidos pela Argentina e o Brasil, com 25,7 e 25,5 milhões de hectares sob PD, respectivamente. Entretanto, verifica-se um incremento nas áreas cultivadas sob PD no Brasil visto que, segundo a Federação Brasileira de plantio direto na palha (FEBRAPDP), em levantamento da área cultivada sob PD no Brasil (safra 2011/12), atualmente são cultivados no Brasil aproximadamente 30 milhões de hectares no sistema (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da área cultivada sob sistema Plantio Direto no Brasil. Adaptado de Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha - FEBRAPDP (2012)

No Cerrado, pouco antes do início da década de 1990, apenas 180 mil hectares eram cultivados sob PD (SATURNINO; LANDERS, 1997). Segundo EMBRAPA (2013), até 2002 registrou-se incremento da área cultivada sob o sistema na região para 5 milhões de ha, sendo que em 2005/06 dos 25 milhões de ha em PD no Brasil, 6 milhões de ha estavam no Cerrado, valores estes que subiram para 30 milhões de ha sob o sistema na safra 2011/2012 no país, com estimativa de que mais de 7 milhões de ha sob PD estejam no Cerrado (FEBRADP, 2012).

As transformações ocorridas no Cerrado trouxeram grandes danos ambientais neste ecossistema, por isto a disseminação de melhores práticas tornou-se uma prioridade, como ocorreu com a introdução do sistema de PD, visando a conservação dos solos. Em sua visão técnica, econômica e ambiental, o PD é visto como um sistema de produção que abrange um complexo ordenado de práticas agrícolas inter-relacionadas e interdependentes, incluindo o não revolvimento do solo, a rotação de culturas, além do uso de plantas de cobertura para formar e manter a palhada sobre o solo (MUZILLI, 1983). Como resultado, ocorre, nesses sistemas, um fluxo contínuo de carbono para o solo, alimentando as frações lábeis e recalcitrantes do material orgânico e os processos de reagregação do solo, originando estruturas mais estáveis, conforme caracterizado por Sá et al. (2001), resultando em rearranjo estrutural do solo como um todo.

O PD promove alterações no comportamento do solo, pela eliminação das ações mecânicas que promovem a homogeneização do solo. Com a distribuição das adições predominantemente na superfície, e a ação das plantas acumulando nutrientes na biomassa aérea, ocorre uma acumulação de nutrientes, especialmente P e K, na camada superficial, nos primeiros 10 cm. Com o tempo, há uma tendência de aumento da eficiência dos adubos aplicados, e da disponibilidade de nutrientes, pela ação de microrganismos (N), diminuição da fixação de nutrientes pela argila do solo (P), e movimentação de cátions no perfil do solo (SOUZA; LOBATO, 2004).

Segundo Sá et al. (2001), o PD pode ser distinguido em quatro fases, sendo estas as fases inicial, de transição, de consolidação e de manutenção. Na fase inicial, compreendida pelos primeiros cinco anos da adoção do PD, ocorrem o reestabelecimento da biomassa microbiana e rearranjo da estrutura do solo, sendo que os teores de matéria orgânica e o acúmulo de palhada no solo são baixos. No período seguinte (5 – 10 anos), denominado fase de transição, verifica-se o acúmulo de palhada, de carbono e de outros nutrientes (N, P e S) na forma orgânica e formação de macroagregados, ocorrendo também uma tendência de nulidade na relação imobilização/mineralização de nutrientes na biomassa microbiana. A fase de

consolidação (10 – 20 anos) é caracterizada pelo contínuo acúmulo de palhada e matéria orgânica no solo, com respectivo aumento da capacidade de troca de cátions e de retenção de água, alta ciclagem de nutrientes, com declínio da imobilização de nutrientes (sobretudo N). Após 20 anos (fase de manutenção), o sistema passa a ser caracterizado pelo alto acúmulo de palhada, além de fluxos contínuos de carbono e de nitrogênio, alta ciclagem de nutrientes, com pronunciadas reduções na exigência de N e P para o sistema, além da maior capacidade de retenção de água pelo solo.

2.3 Efeitos do manejo na fertilidade do solo

Em solos cultivados, as entradas de fertilizantes afetam o crescimento das plantas e a reciclagem de nutrientes pelos resíduos vegetais, afetando também a dinâmica de carbono orgânico do solo (CRASWELL; LEFROY, 2001). Portanto, os padrões de declínio de carbono orgânico e esgotamento de nutrientes em Latossolos sob cultivo em longo prazo são de grande preocupação para a produção agrícola sustentável nestes solos.

A presença de nutrientes e o manejo adequado do solo são aspectos fundamentais que garantem a manutenção ou melhoria da qualidade dos solos, principalmente no caso de agrossistemas em regiões de clima tropical (BALOTA et al., 2004). Assim, práticas agrícolas que reduzam a perda de solo por cultivos intensivos e mantenham a presença de plantas de cobertura na entressafra, podem favorecer a sustentabilidade da produção em região sob Cerrado (BOER et al., 2007).

A prática de revolvimento do solo, adotada desde os tempos primórdios na agricultura (entretanto com uso intensificado a partir da Revolução Industrial de 1850) tem por principais objetivos, sobretudo em terras localizadas nas regiões das altas latitudes, acelerar o aquecimento do solo durante a primavera, controlar ervas daninhas e criar condições edáficas propícias para o estabelecimento de plântulas e crescimento das culturas (LYNCH, 1984 citado por SÁ et al., 2009). A maioria dos solos tropicais possui baixa fertilidade natural, devido ao baixo pH, além de altos teores de Al^{3+} , baixa saturação por bases e baixo P disponível (PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009a). Alguns solos também apresentam profundidade efetiva das raízes muito superficial, devido à alta acidez do subsolo e condições físicas restritivas ao crescimento das raízes (CARNEIRO et al., 2009). Assim, o PC nos trópicos tem sido usado para incorporar corretivos de acidez e melhorar as condições físicas do solo de maneira a possibilitar o crescimento de raízes em profundidade (ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2004, FAGERIA, 2008). No entanto, a erosão causada pelo uso

intensivo do PC, especialmente nas regiões de alta erosividade da chuva, exaure a matéria orgânica do solo, além de reduzir sua fertilidade e acentuar os custos de restauração da qualidade agrícola do solo.

A adoção de práticas conservacionistas normalmente tem efeito positivo sobre o teor e a qualidade da matéria orgânica do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997), com reflexos diretos ou indiretos sobre as características químicas e disponibilidade de nutrientes (FRAZÃO et al., 2008). Entre os sistemas conservacionistas, destacam-se as alterações promovidas pela adoção do sistema de plantio direto (PD).

Em áreas sob PD, preconiza-se a manutenção de resíduos culturais sobre o solo e a mínima alteração da sua estrutura, para minimizar seu contato com o solo e diminuir, com isso, a velocidade de decomposição desses resíduos. A adoção dessas práticas em solos arenosos e, ou, argilosos com pouco aporte de matéria vegetal durante o ano e, principalmente em regiões de inverno seco, como é o caso das regiões do cerrado brasileiro, pode aumentar ou pelo menos manter sua capacidade produtiva, em razão do possível aumento na CTC do solo e da maior disponibilidade de nutrientes às plantas em função do acúmulo de MO (BAYER; MIELNICZUK, 1997; FRAZÃO et al., 2008). A comparação com a mata nativa, situação original do solo, permite inferir o comportamento dos solos quanto à fertilidade e a evolução nos atributos químicos do solo relacionados ao manejo (VINCENT; TURNER; TANNER, 2010).

A dinâmica de nutrientes essenciais e elementos tóxicos são modificados pelo PD quando comparado com o PC (HOUX III; WIEBOLD; FRITSCHI, 2011). Geralmente, os fertilizantes são aplicados sobre a superfície do solo no PD, e com a mínima perturbação do solo, a capacidade de retenção de nutrientes, culminando com sua indisponibilização às plantas, tem sua atividade mais lenta nesse sistema. Isso ocorre porque elementos como P, K, cálcio (Ca), magnésio (Mg), os micronutrientes catiônicos e os metais pesados, os quais tem grande afinidade de adsorção aos grupos funcionais de coloides do solo em solos tropicais, tem suas reações de sorção reduzidas tanto pela sua permanência em resíduos na superfície, como pela consequente redução do contato do material orgânico com o complexo sortivo dos minerais do solo. No PD, os resíduos depositados na superfície do solo maximizam os ciclos biológicos, além da reciclagem de nutrientes de camadas mais profundas para as superiores do solo.

O manejo de solo em PD provoca alterações nas propriedades químicas de solo, tendo reflexo na fertilidade e na eficiência de uso de nutrientes pelas espécies (RHEINHEIMER et al., 1998; COSTA et al., 2007; FREIRIA et al., 2008). Vários estudos têm mostrado que o PD

forma um gradiente de disponibilidade de nutrientes rapidamente no perfil, com maior concentração nas camadas superficiais do solo, principalmente quando o fertilizantes aplicados é superior à saída de nutrientes (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001, 2003).

Os trabalhos com sistemas de produção de grãos que avaliam a qualidade de solo em PD têm evidenciado acúmulos de Ca, Mg, P e K na camada superficial (0-5 cm), em relação às camadas mais profundas. Nesses estudos, foram obtidas ainda informações sobre diminuição do pH e acúmulo de matéria orgânica (MO) na camada superficial do solo (PAVINATO, 2009, PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009a). Além disso, efeitos positivos no PD têm sido atribuídos pelo uso de plantas de cobertura de solo na entressafra, as quais podem promover a liberação de ácidos orgânicos solúveis em água, capazes de complexar o alumínio trocável, mobilizar o Ca e o Mg (ZAMBROSI et al., 2008) e reter o K, evitando sua perda por lixiviação (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2003; BOER et al., 2007).

A acidez do solo é, na maioria das vezes, um dos principais limitantes da produção em áreas agrícolas brasileiras. A deposição de resíduos vegetais pode promover a elevação do pH do solo na camada superficial, pela troca ou complexação dos íons H e Al, por Ca, Mg, K e outros compostos presentes no resíduo vegetal, aumentando assim a saturação por bases (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004). As reações de troca de ligantes entre ânions orgânicos e os grupos funcionais dos óxidos de Fe e Al têm sido propostas como uma das causas da elevação de pH do solo após a adição dos resíduos de plantas (FRANCHINI et al., 1999). Com isso, a formação e manutenção da palhada proporcionadas pelo PD podem não somente favorecer a disponibilidade de nutrientes no solo, mas também proporcionar maior tamponamento do pH e, conseqüentemente, da acidez do solo.

De acordo com dados apresentados por vários autores, o PD, quando associado à rotação de culturas anuais, aumenta os teores de matéria orgânica (PAVINATO, 2009), a capacidade de troca catiônica (SOUZA; ALVES, 2003), bem como as bases trocáveis e o P disponível (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004), além de haver diminuição na acidez (ALMEIDA et al., 2005).

2.4 Dinâmica das formas de P no solo

O teor total de P dos solos, de modo geral, pode variar de 35 até 5300 mg kg⁻¹, com valores médios situando-se em torno de 800 mg kg⁻¹ (ESSINGTON, 2004). O P no solo possui grande habilidade para formar compostos de alta energia de ligação com os colóides,

sendo predominante sua presença na fase sólida. Assim, apenas uma pequena fração do nutriente tem baixa energia de ligação, que possibilita sua dessorção e disponibilidade às plantas, mesmo que os teores totais de P no solo sejam elevados (GATIBONI, 2003).

Sob o ponto de vista da fertilidade do solo, independentemente da natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade de reposição na solução do solo. A divisão em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis é bastante acadêmica, mas tem embasamento científico. O conceito de labilidade está associado a uma escala de tempo pois, segundo Guo e Yost (1998), a longo prazo não há P não lábil. Assim, o P do solo pode ser classificado em dois grandes grupos, sendo eles inorgânico (Pi) e orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado. Entretanto, a identificação das formas de P dentro destes dois grupos se faz complicada, devido à infinidade de reações que o elemento pode sofrer e seus compostos resultantes (GATIBONI, 2003).

O grupo do Pi pode ser separado em duas partes, o P dos minerais primários ou estrutural, e o P adsorvido, além daquele presente na solução do solo, encontrado em pequenas quantidades. A identificação direta dos minerais primários fosfatados por difratometria de raios X é difícil, porque perfazem apenas uma pequena parte dos minerais do solo, variando de 0,02 a 0,5% (LINDSAY; VLEK; CHIEN, 1989). Já o P adsorvido pode ocorrer em todos os minerais presentes no solo por causa de sua facilidade em formar complexos de alta energia de ligação, podendo ser encontrado como precipitado, com formas iônicas de Fe, Al e Ca, adsorvido a argilas silicatadas do tipo 1:1, adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions e, principalmente, adsorvido aos oxi-hidróxidos de Fe e Al (PARFITT, 1978), resultando assim em baixos teores na solução do solo.

O segundo grupo, o Po, é de grade relevância aos solos tropicais, pois atua ativamente na disponibilidade às plantas (CROSS; SCHLESINGER, 1995) e deve ser levado em consideração em estudos envolvendo a sua dinâmica e biodisponibilidade. O Po é originário dos resíduos vegetais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição. As principais formas de Po são os fosfatos de inositol, que compõem de 10 a 80% do P orgânico total, além dos fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (cerca de 3%) e outros ésteres fosfato (aproximadamente 5%) (DALAL, 1977). A estabilidade destes compostos é dependente de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, pois são usados como fonte de carbono e elétrons pelos microrganismos, cujo resultado é a sua mineralização e disponibilização do fósforo.

Segundo Marschner (1995), a maioria do P utilizado pelas plantas está em formas inorgânicas. Condron e Tiessen (2005), entretanto, relatam que o estoque de P orgânico no

solo pode corresponder de 15 a 80% do P total, sendo que tanto as frações inorgânicas (Pi) como orgânicas (Po) são capazes de atuar como fonte ou dreno de P para a solução do solo, dependendo da textura, teor e qualidade da matéria orgânica do solo e tipo de mineral. Além disso, o histórico de uso e manejo do solo pode influenciar na disponibilidade e, conseqüentemente, na absorção de P pelas plantas.

2.5 Mudanças na dinâmica do P promovidas pelo manejo do solo

A mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos proporciona a liberação e a redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção. Além disso, podem manter um fluxo contínuo de diferentes formas de carbono (C), as quais competem com os íons fosfato pelos sítios de carga positiva dos colóides inorgânicos e complexam íons de Al^{3+} e Fe^{3+} , formando compostos hidrossolúveis complexos e estáveis, resultando em aumento da disponibilidade de P para as raízes (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

Diferentes sistemas de uso e manejo dos solos podem interferir na dinâmica do P, podendo promover alterações dos compartimentos de P (MATOS et al., 2006). Em relação ao Po no solo, este é bastante relevante, pois, de acordo com Condrón e Tiessen (2005), parece provável que a aquisição de P pelas plantas que crescem em solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos tropicais, é regulada pela mineralização do Po. Conforme Nziguheba e Bunemann (2005), há evidências indiretas de que o Po em solos tropicais cultivados pode ser relativamente lábil, sendo bastante influenciado pelo histórico de uso do solo (GUGGENBERGER et al., 1996). O manejo do solo e o tipo de vegetação afetam as formas de P do solo, principalmente as orgânicas, por estarem diretamente relacionadas com a atividade biológica do solo (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2002). Quando uma floresta tropical é convertida em pastagem ou área de cultivo de grãos, a ciclagem de nutrientes é fortemente afetada (MAGID, 1993), de modo a alterar a quantidade das frações de P no solo.

Segundo Vincent, Turner e Tanner (2010), em solos minerais tropicais, em torno de 30% do P total está presente na forma orgânica e, dependendo da labilidade, esse estoque pode constituir-se numa importante fonte de P para as plantas. Xavier et al. (2010), avaliando as frações de P em diferentes agroecossistemas, verificaram que a distribuição desse nutriente nos compartimentos orgânicos e inorgânicos foi dependente das características específicas de

cada agroecossistema e que a disponibilidade de P estava associada à ciclagem do seu compartimento orgânico.

Chapuis-Lardy, Brossard e Hervé (2001), estudando o P orgânico em Latossolos de ambientes distintos em solos tropicais, verificaram que a vegetação que proporcionava maior entrada de matéria orgânica continha mais Po na forma lábil do que as demais, enquanto o Po foi pouco influenciado pelo histórico de uso do solo. Dessa forma, esses resultados mostram que a compreensão das mudanças na disponibilidade de P em função da mineralogia, manejo e histórico de uso do solo pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo que proporcionarão melhora na aquisição de P pela planta e, por conseguinte, maior produtividade nos solos tropicais.

Rheinheimer (2000) estudou as formas de P em solos do Rio Grande do Sul com diferentes teores de argila, conduzidos sob PC e PD, com distintas rotações de cultura. Em todos os solos, o PD resultou no aumento dos teores de P nas camadas superficiais, principalmente de formas inorgânicas lábeis (P-RTA e Pi-NaHCO_3) e moderadamente lábeis ($\text{Pi-NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e Pi-HCl), permitindo a manutenção de teores na solução do solo mais elevados do que no sistema convencional. Observou-se ainda acúmulo de formas orgânicas de P, pela maior adição de palhada e, conseqüentemente, maior matéria orgânica. Dessa forma, o P orgânico teria grande participação na nutrição das plantas. Resultados semelhantes foram observados por outros autores (TOKURA et al., 2002; ZAMUNER; PICONE; ECHEVERRIA, 2008).

Negassa e Leinweber (2009), em revisão acerca do uso do fracionamento de Hedley para estudo de agroecossistemas com diferentes usos e manejos do solo, concluíram que todas as frações inorgânicas e orgânicas de P podem atuar como fonte ou dreno do nutriente disponível, dependendo do manejo e da adubação. A produção de resíduos vegetais, ainda que seja omitida a fertilização do solo, é promovida pelo tamponamento do P da solução pelas formas orgânicas de P, que são mais expressivas nesta situação. Em contrapartida, quando a adubação é realizada em níveis satisfatórios, ocorre o acúmulo de P em formas inorgânicas, as quais estariam atuando como tamponantes da solução do solo, resultando em acumulação das formas orgânicas de P menos solúveis. Segundo os autores, a redistribuição das frações de P tende a ocorrer para todas as frações de Pi e Po, entretanto, os efeitos de acúmulo são mais pronunciados nas formas inorgânicas lábeis.

2.6 Fracionamento de P

O fracionamento de P no solo utilizando diferentes extratores tem sido uma boa ferramenta para compreender a disponibilidade e solubilidade de P total no solo. É uma técnica que permite avaliar, além do P disponível quantificado por métodos de rotina, as formas do nutriente no solo e sua distribuição, de modo a identificar possíveis mudanças na dinâmica do nutriente no solo.

Os métodos de fracionamento do P em solos pressupõem a extração sequencial em uma amostra de solo, de maneira que os reagentes utilizados tenham uma seletividade na extração pela dissolução de distintos compostos contendo fósforo. Existem inúmeros esquemas de fracionamento de P em solos, com distintas aptidões, resumidas por Condrón e Newman (2011) nas seguintes classes: fracionamentos para formas inorgânicas de P; fracionamentos para formas orgânicas de P; fracionamento para formas inorgânicas e orgânicas de P; e fracionamentos para formas inorgânicas, orgânicas e P microbiano.

O método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) visa a quantificação concomitante de formas inorgânicas e orgânicas de P no solo, sendo amplamente difundido, sobretudo em estudos que visam a observação da dinâmica e da ciclagem do nutriente no solo, aliado a pedogênese, aos diferentes usos do solo, manejos empregados na adubação e nos sistemas de cultivo. O método original pressupõe a adição sequencial de extratores de menor a maior força de extração, sendo eles: resina trocadora de ânions; NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 8,5; NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$; NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ + ultrassonificação; HCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e digestão do solo residual com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$. O método ainda contempla a extração em duplicata nos dois primeiros extratores (resina e NaHCO_3), sendo que uma segunda extração seria feita sem fumigação da amostra (exposição a CHCl_3) para quantificação, por diferença, da quantidade de P correspondente ao P da biomassa microbiana.

Diversas modificações ocorreram no método original proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), sobretudo para adequá-lo aos objetivos dos autores, mas principalmente para aumentar a eficiência de extração e a sua exequibilidade. Destacam-se entre as alterações, as efetuadas por Tiessen, Stewart e Cole (1984), onde os autores removeram a extração em duplicata para quantificação do P da biomassa microbiana e, posteriormente as de Condrón, Goh e Newman (1985), onde também excluiu-se a extração do P microbiano e, adicionalmente, substituiu-se a extração com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ com ultrassonificação por uma extração com NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (sem ultrassonificação), sendo que esta passa a ser realizada após a extração com HCl 1 mol L^{-1} . Tais alterações se deram para eliminar a

necessidade de um ultrassonificador no esquema do fracionamento, e ainda, a alteração na ordem dos extratores, segundo os autores, proporcionou aumento na eficiência de extração do NaOH 0,5 mol L⁻¹, com recuperação do fósforo orgânico de 89 a 93% do total, contra 46 a 70% no esquema original proposto no fracionamento de Hedley (GATIBONI et al., 2013).

Os estudos mais recentes de fracionamento de fósforo visando quantificar as formas inorgânicas e orgânicas de P (RHEINHEIMER, 2000; GATIBONI, 2003; PAVINATO, 2007) tem adotado a metodologia de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações sugeridas por Condon, Goh e Newman (1985). Ressalta-se ainda que tais autores adotaram um procedimento de lavagem do solo com NaCl 0,5 mol L⁻¹ entre cada extração, visando evitar que o resíduo do extrato anterior reduzisse a força e, conseqüentemente, a eficiência de extração do subsequente.

As formas de P do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condon, Goh e Newman (1985) seriam então, sequencialmente: Pi extraído com resina trocadora aniônica (Pi_{RTA}), Pi e Po extraídos com NaHCO₃ 1 mol L⁻¹ (Pi_{BIC} e Po_{BIC}), Pi e Po extraídos com NaOH 0,1 mol L⁻¹ (Pi_{HID-0,1} e Po_{HID-0,1}), Pi extraído com HCl, Pi e Po extraídos com NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Pi_{HID-0,5} e Po_{HID-0,5}), além do P residual (P_{Residual}), obtido após digestão do solo ao final de todas as extrações. Este esquema do fracionamento com as modificações supracitadas pode ser observado na Figura 3.

As formas de P do fracionamento de Hedley por si só não dizem respeito às formas de P do solo. Entretanto, a partir do trabalho de Cross e Schlesinger (1995), as formas de P do solo puderam ser explicadas pelo fracionamento de Hedley. Assume-se a partir de então que, de maneira geral, a RTA extrai formas lábeis de Pi, assim como o NaHCO₃, o qual extrai formas inorgânicas e orgânicas de P lábil. O P moderadamente lábil compreende o P extraído na etapa do NaOH (concentração de 0,1 mol L⁻¹) e ao P extraído com HCl. O NaOH extrai o P quimiosorvido à óxidos de Fe e Al, além do P orgânico de labilidade moderada, enquanto o HCl remove o P ligado a fosfatos de Ca (fortemente adsorvido, porém considerado na maioria das situações como moderadamente lábil). Por sua vez, as frações não-lábeis de P são compostas pela fração extraída com NaOH 0,5 mol L⁻¹, acrescida do P residual. Essa segunda extração com NaOH remove Pi e Po que estariam química ou fisicamente protegidos internamente aos agregados, enquanto que a digestão residual extrai o P recalcitrante (Pi e Po) remanescente no solo.

Figura 3 - Esquema do fracionamento de P segundo Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condron, Goh e Newman (1985). Adaptado de GATIBONI (2003)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição das áreas de estudo

Visando a melhor caracterização para o bioma Cerrado, foram utilizados para o presente estudo, quatro experimentos instalados em locais representativos do Cerrado: Sapezal-MT ($13^{\circ}56'33''$ S e $58^{\circ}53'43''$ W), Costa Rica-MS ($18^{\circ}15'10''$ S e $53^{\circ}12'41''$ W), Luziânia-GO ($16^{\circ}15'02''$ S e $47^{\circ}37'02''$ W) e Tasso Fragoso-MA ($8^{\circ}30'57''$ S e $46^{\circ}3'47''$ W) (Figura 4). As áreas são pertencentes às fazendas Planorte (Sapezal-MT), Planalto (Costa Rica-MS), Pamplona (Luziânia-GO) e Parnaíba (Tasso Fragoso-MA), unidades de produção de grãos e fibras, pertencentes ao grupo SLC agrícola S.A. (Figura 4).

Todos os experimentos conduzidos em cada área de coleta consistem em ensaios de manejo do solo, os quais compreendem o sistema de preparo convencional (PC) e o sistema plantio direto (PD) por longo período. O PC consiste no preparo do solo através de, normalmente, 2 operações de gradagem e o PD sem preparo do solo. Na Tabela 1 são apresentados dados gerais de estabelecimento dos experimentos nas áreas experimentais. Para comparação com os sistemas de manejo adotados no presente estudo, foi amostrada a área de cerrado mais próxima do experimento, com topografia e solo similar, sendo esta área utilizada como o sistema natural de referência.

Figura 4 - Distribuição do bioma cerrado no território brasileiro (em destaque) e localização das áreas experimentais

Tabela 1 - Dados gerais de caracterização das áreas experimentais

Local	Ano de abertura do Cerrado	Ano de instalação do experimento	Anos de histórico (experimentos)	Tipo de Solo
Costa Rica – MS	1974	1994	19	LV-1 ^a
Sapezal – MT	1997	2001	12	LV-2
Luziânia – GO	1977	1992	21	LVA-1 ^b
Tasso Fragoso – MA	1990	2001	12	LVA-2

^a LV: Latossolo Vermelho; ^b LVA: Latossolo Vermelho amarelo

Fonte: SLC Agrícola S.A.

Antes da instalação dos experimentos, as áreas correspondentes ao LV-1 (Costa Rica – MS) e LVA-1 (Luziânia-GO) foram cultivadas sob PC, com gradagem pesada, por 20 e 15 anos, respectivamente, tendo como cultura principal a soja no verão, sendo cultivado milho em três oportunidades em cada local, enquanto que no inverno, estação seca, o solo era mantido sob pousio.

No LV-2 (Sapezal – MT), no mesmo ano agrícola da abertura do cerrado (safra 1997/98) foi cultivada a cultura da soja em preparo convencional, cultivando-se algodão no ano seguinte, em semeadura direta. Nas safras de 1999/00 e 2000/01 foi cultivada soja. Em 2001 se deu início ao experimento com a diferenciação dos manejos de solo na área.

No LVA-2 (Tasso Fragoso – MA), após a abertura do cerrado (safra 1990/91), foi cultivada soja sob PC, com uso de uma gradagem pesada e uma intermediária ou niveladora, até o ano agrícola de 1994/95. A partir de então foram cultivados soja (1995/96), milho (1996/97) e soja (1997/98 e 1998/99) sob PD. Na safra 1999/00 o solo da área experimental foi gradeado com uma grade pesada, seguida de uma intermediária, a fim de homogeneizar as condições do solo para a implantação dos distintos manejos do solo (2000/01), dando início ao experimento.

As culturas cultivadas em rotação nos experimentos, no período de verão, foram das seguintes: soja (*Glycine max* L.), milho (*Zea mays* L.) e algodão (*Gossypium hirsutum* L.), enquanto que no período outono/inverno era utilizado o milheto (*Pennisetum glaucum* L.) como cultura de cobertura. As Tabelas 2 e 3 mostram, respectivamente, as operações e insumos aplicados nas áreas experimentais e a rotação de culturas adotada.

Tabela 2 - Demonstrativo operacional e de insumos utilizados nos sistemas de manejo do solo (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC) na safra de 2012/13. LV-1 (Costa Rica-MS), LV-2 (Sapezal-MT), LVA-1 (Luziânia-GO) e LVA-2 (Tasso Fragoso-MA)

Atividade	Manejos do Solo	
	PD	PC
----- LV ^a -1 – Soja (Anta 82) -----		
Gradagem Pesada	-	30/09/2012
Gradagem Intermediária	-	30/09/2012
Adubação de pré-plantio – KCl ⁽¹⁾ (K ₂ O, em kg ha ⁻¹)	30,0	
Plantio	18/10/2012	
Adubação de plantio - SFS ⁽²⁾ (P ₂ O ₅ , em kg ha ⁻¹)	36,0	
----- LV-2 – Soja (TMG 1179 RR) -----		
Gradagem Pesada	-	28/09/2012
Gradagem Intermediária	-	28/09/2012
Adubação de pré-plantio – KCl (K ₂ O, em kg ha ⁻¹)	51,0	
Plantio	13/10/2012	
Adubação de plantio – 02-28-00 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O, em kg ha ⁻¹)	4,0 – 56,0 – 0,0	
----- LVA ^b -1 – Soja (NS 5909)-----		
Gradagem Pesada	-	31/10/2012
Gradagem Intermediária	-	31/10/2012
Adubação de pré-plantio (K ₂ O, em kg ha ⁻¹)	55,0	
Plantio	13/11/2012	
Adubação de plantio (P ₂ O ₅ , em kg ha ⁻¹)	37,5	
----- LVA-2 – Milho (P30F35 HX) -----		
Gradagem Pesada	-	10/04/2012
Gradagem Intermediária	-	10/04/2012
Plantio	07/12/2012	
Adubação de plantio (MAP ⁽³⁾ , N / P ₂ O ₅ , em kg ha ⁻¹)	25,0 / 110,0	
Adubação de cobertura - KCl (K ₂ O, em kg ha ⁻¹)	102,0	
Adubação de cobertura – Uréia (N, em kg ha ⁻¹)	135,0	

^a Latossolo Vermelho; ^b Latossolo Vermelho amarelo.; ⁽¹⁾KCl, com 60% de K₂O; ⁽²⁾Superfósforo simples (SFS), com 18% de P₂O₅ solúvel em CNA + H₂O; ⁽³⁾ Mono-amônio fosfato (MAP, com 44% de P₂O₅ solúvel em CNA + H₂O e 10% de N)

Tabela 3 - Sistema de rotação de culturas adotado nos experimentos de manejo do solo. LV-1 (Costa Rica-MS), LV-2 (Sapezal-MT), LVA-1 (Luziânia-GO) e LVA-2 (Tasso Frágoso-MA)

Local	Sistema de rotação (sucessão) de culturas
LV-1 ^a	Algodão / soja precoce + milho
LV-2	Soja precoce + milho / algodão
LVA-1 ^b	Soja precoce + milho / milho + milho
LVA-2	Milho + Milho / Soja precoce + milho / algodão

^a LV = Latossolo Vermelho; ^b LVA = Latossolo Vermelho amarelo

3.2 Caracterização dos locais de estudo

Os locais de estudos foram avaliados anteriormente por Pavinato (2009). Na ocasião, o autor realizou a caracterização granulométrica dos solos, tomando uma amostra de solo da camada de 0 - 20 cm de cada local. As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA, < 2mm) foram submetidas à análise granulométrica pelo método da pipeta, após dispersão em NaOH 1 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997). Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Pavinato (2009) também analisou os solos quanto à mineralogia. Para isso, a partir de uma amostra de solo (camada de 0 – 20 cm), separou-se a fração argila após sedimentação em NaOH 1 N, com posterior floculação com HCl 0,1 mol L⁻¹ da suspensão de argila. Em seguida, esta foi lavada com solução etanol/água na proporção 1:1 e seca em estufa a 50°C. Os óxidos de ferro foram concentrados através do tratamento de 3 g de argila com NaOH 5 mol L⁻¹ a quente por duas horas (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1982). A análise qualitativa da fração argila foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) (equipamento Philips, com radiação de Fe K α e filtro de Fe, voltagem de 30 kV e corrente de 30 mA), sendo utilizadas lâminas não orientadas de fração argila desferrificada (intervalo de 4 a 50° 2 θ) e dos óxidos de ferro concentrados (intervalo de 25 a 60° 2 θ). As razões gibbsita/(gibbsita+caulinita), Gb/(Gb+Ct), bem como hematita/(hematita + goethita), Hm/(Hm+Gt), foram calculadas segundo a relação entre a área (A) de suas respectivas reflexões, GB(002), Ct (001), segundo a fórmula $AGb/(AGb+ACt)$, e reflexões Gt (110) e Hm (012), segundo a fórmula $AHm/(AHm+(AGt \times F))$, onde F é um fator de correção, em função da intensidade da reflexão Hm (012) ser de 30% (INDA JUNIOR; KÄMPF, 2005). Os resultados encontrados por Pavinato (2009) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica da TFSA e mineralogia qualitativa da fração argila do solo, nas áreas experimentais dos solos LV-1 (Costa Rica – MS), LV-2 (Sapezal – MT), LVA-1 (Luziânia – GO) e LVA-2 (Tasso Fragoso – MA)¹

Local	Argila	Silte	Areia	Hm/Hm + Gt	Gb/Gb + Ct
	----- g kg ⁻¹ -----				
LV-1 ^a	656	243	101	0,86	0,50
LV-2	452	363	185	0,61	0,62
LVA-1 ^b	653	223	124	0,39	0,74
LVA-2	255	46	699	0,31	0,00

¹ Adaptado de: Pavinato (2009); ^a Latossolo Vermelho; ^b Latossolo Vermelho amarelo; Hm= hematita; Gt= goethita; Gb= gibbsita; Ct= caulinita

As amostras para as avaliações dos atributos químicos do solo foram coletadas em quatro trincheiras em cada parcela, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. As amostras foram misturadas para formar uma amostra composta para cada repetição, em cada uma das profundidades, nos diferentes manejos do solo. As amostras foram secas ao ar e, posteriormente passadas em peneira de malha de 2 mm, formando-se amostras de TFSA. Posteriormente, estas foram analisadas no laboratório de fertilidade do solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP).

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, com parcelas subdividas para as profundidades de coleta. As parcelas consistiram nos sistemas de manejo (PD, PC e Cerrado nativo) e as subparcelas consistiram nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, com quatro repetições, totalizando 36 parcelas por área de estudo. As parcelas apresentavam dimensões de 9,6 x 110 m, 8,3 x 107 m, 11,3 x 150 m e 7,3 x 82 m (largura x comprimento) nos respectivos locais/solos LV-1, LV-2, LVA-1 e LVA-2.

No presente trabalho não foram considerados os locais de estudo como fator, tendo em vista que os locais são muito distintos em suas condições edafoclimáticas. Assim, os resultados são interpretados para cada um dos locais, separadamente.

3.4 Atributos avaliados

3.4.1 Primeiro estudo: atributos químicos do solo

As amostras de TFSA foram submetidas à análise, segundo Raij et al. (2001), nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, dos seguintes atributos químicos do solo: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), extraídos com resina trocadora aniônica e catiônica; matéria orgânica (MO) por colorimetria em dicromato de potássio; pH (em CaCl_2 , relação 1:2,5 de solo:solução); acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$, determinados por correlação ao índice SMP); sendo ainda determinados matematicamente a saturação por cátions no solo (V%).

3.4.2 Segundo estudo: frações de P no solo

Um dos principais focos do presente estudo foi de avaliar o efeito dos manejos e das fertilizações ao longo do tempo nas frações inorgânicas e orgânicas de P no solo. Para isso realizou-se o fracionamento do P em todas as amostras de todas as unidades experimentais, seguindo metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condon, Goh e Newman (1985), metodologia amplamente difundida em estudos da dinâmica de P em sistemas agrícolas.

A sequência do fracionamento é resumidamente descrita a seguir: amostras de 0,5 g de solo foram submetidas a diferentes extratores em ordem sequencial (relação solo:solução de 1:20), sendo eles:

A) resina de troca aniônica - RTA (lâmina de RTA de dimensões de 1,0 x 2,0 cm imersa em 10 mL de H_2O em contato direto com o solo), extraíndo P_{RTA} (inorgânico);

B) 10 mL de NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , extraíndo P_{Bic} (inorgânico e orgânico);

C) 10 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1} , extraíndo $\text{P}_{\text{Hid-0,1}}$ (inorgânico e orgânico);

D) 10 mL de HCl 1,0 mol L^{-1} , extraíndo P_{HCl} (inorgânico);

E) 10 mL de NaOH 0,5 mol L^{-1} , extraíndo $\text{P}_{\text{Hid-0,5}}$ (inorgânico e orgânico).

A partir dos extratos B, C e E retirou-se uma alíquota para análise do Pt, visando quantificar o Po de cada fração, sendo este obtido por diferença entre o Pt e o Pi de cada extrato. O solo residual foi submetido à digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ para obtenção do P residual ($\text{P}_{\text{Residual}}$). O fósforo dos extratos ácidos (A e D, além das digestões totais de B, C e E)

foi quantificado por Murphy e Riley (1962). Para os extratos alcalinos (B, C e E), a determinação do P inorgânico foi feita segundo Dick e Tabatabai (1977).

As frações de P quantificadas foram ainda agrupadas segundo a labilidade do P predita pelos extratores. O P lábil foi composto pelo P_{RTA} , somado ao P_{BIC} (inorgânico e orgânico); o P moderadamente lábil constituiu-se nos teores de $P_{HID-0,1}$ (P_i e P_o) somados ao P_{HCl} e o P não-lábil, composto pela soma do $P_{Hid-0,5}$ (P_i e P_o) e do $P_{Residual}$ (P_i e P_o). Destaca-se que a opção por agrupamento do $P_{Hid-0,5}$ na fração não-lábil se deve a mudança na ordem de extração do procedimento, sendo observado que a extração com HCl intercalando as extrações com NaOH potencializa a segunda extração com o hidróxido, restando menos P residual ao solo (P não-lábil). Ainda, sabendo que a extração com NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, responsável por substituir a ultrassonificação do solo, também remove o P protegido por intra-agregados do solo, proporção esta de P que apenas seria considerada de labilidade moderada em casos de exaurimento de formas mais lábeis de P, seria presumir que o $P_{Hid-0,5}$ seria de labilidade moderada, o que acarretaria em possíveis equívocos na interpretação da dinâmica do P no solo.

3.5 Análises estatísticas

Os resultados foram analisados estatisticamente, sendo submetidos à análise de variância, com auxílio do programa estatístico SAS 9.2 (SAS INSTITUTE, 2008). Quando observados efeitos significativos, realizou-se o teste t (LSD) de comparação de médias, tomando por base os níveis de significância maiores que 95% ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Atributos químicos de fertilidade do solo

A análise de variância (Teste F) para os atributos químicos de fertilidade do solo está apresentada na tabela 5. Os resultados indicam que houve interação ($p < 0,05$) entre os sistemas de manejo e as profundidades no perfil do solo para todas as variáveis analisadas, nos quatro solos avaliados.

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) para atributos químicos de Latossolos no Cerrado Brasileiro, sob sistemas de manejo (PD, PC e Cerrado nativo) e profundidades no perfil (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm). Costa Rica – MS (LV-1), Sapezal – MT (LV-2), Luziânia – GO (LVA-1) e Tasso Fragoso – MA (LVA-2)

Causa de Variação	Atributos químicos de fertilidade do solo							
	MO ^(c)	pH ^(d)	H + Al ^(e)	K ^(f)	Ca ^(g)	Mg ^(h)	CTC ⁽ⁱ⁾	V% ^(j)
LV-1 ^(a)								
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*
Manejo*profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*
CV (%)	8,35	3,33	10,40	18,79	22,23	21,24	8,69	11,37
LV-2								
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	ns	*	*	*	*	*	*	*
Manejo*profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*
CV (%)	8,86	2,78	8,68	14,27	21,42	18,21	5,72	15,22
LVA-1 ^(b)								
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	*	*	ns	*	*	*	*	*
Manejo*profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*
CV (%)	6,91	2,15	3,43	26,24	23,94	31,27	7,37	16,12
LVA-2								
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	ns	*	*	*	*	*	*	*
Manejo*profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*
CV (%)	7,66	4,24	7,08	15,24	22,42	6,04	5,83	10,17

* significativo a 5% pelo Teste F; ns não significativo

^(a) LV = Latossolo Vermelho; ^(b) LVA = Latossolo Vermelho amarelo; ^(c) matéria orgânica (MO); ^(d) pH em CaCl₂; ^(e) hidrogênio + alumínio potencial na CTC; ^(f) Potássio trocável; ^(g) Cálcio trocável; ^(h) Magnésio trocável; ⁽ⁱ⁾ somatório de elementos da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (K + Ca + Mg + H + Al); ^(j) porcentagem da CTC ocupada por cátions não ácidos trocáveis

4.1.1 Teores de MO no solo

No solo LV-1 observa-se que os teores de MO no Cerrado e no PD foram maiores na camada de 0 – 5 cm, comparado às demais profundidades (Figura 5 - A). Já no PC, os teores de MO nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm foram similares, com pequeno decréscimo para a camada de 10 – 20 cm, o que era esperado em função do revolvimento anual. Comparando-se os manejos do solo ao longo do perfil, constatou-se que na camada mais superficial (0 – 5 cm), o teor de MO no PC foi 23% inferior ao observado no PD e 17% a menor que no Cerrado nativo. Já nas camadas inferiores (5 – 10 e 10 – 20 cm) os teores de MO nos três sistemas de manejo foram similares, observando diferença apenas entre o PD e o Cerrado na camada de 5 – 10 cm, sendo menor no Cerrado.

Figura 5 - Teores de matéria orgânica (MO) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

No LV-2 verifica-se que o também houve diferença nos teores de MO ao longo do perfil, tanto no PD como no Cerrado, mesmo comportamento observado para o solo LV-1 (Figura 5 – B). Analisando o efeito dos sistemas de manejo em cada camada do solo, observa-se que, na camada de 0 – 5 cm, o teor de MO foi maior no Cerrado nativo, sendo o PD superior ao PC nesta camada (39,9 e 31,1 g kg⁻¹, respectivamente), porém o acúmulo de MO nos solos cultivados não foram tão pronunciados como verificado na vegetação nativa (53,0 g kg⁻¹). Na camada de 5 – 10 cm os teores de MO não diferiram entre os manejos do solo e o cerrado nativo, com valores médios variando de 30,1 a 32,4 e 32,8 g kg⁻¹ para PD, PC e Cerrado, respectivamente. Já na camada mais inferior no perfil (10 – 20 cm) observa-se maior teor de MO no PC, comparado ao PD e Cerrado, os quais não diferiram entre si.

Os teores de MO em superfície (0 – 5 cm) no solo LVA-1 foram menores no PC, sendo 23,2 e 30,4 % inferiores ao Cerrado e ao PD, respectivamente, sendo que estes últimos não diferiram entre si (Figura 5 – C). Na camada de 5 – 10 cm, maior quantidade de MO foi observada no Cerrado, comparado ao PC, o qual apresentou maior teor que o encontrado no PD em tal profundidade. Por sua vez, na camada de 10 – 20 cm os teores de MO foram menores no PD, sendo estes 17 e 18,5 % inferiores ao PC e ao Cerrado, respectivamente, não diferindo entre o Cerrado e o PC. Verificou-se, em todos os sistemas de manejo, um gradiente decrescente nos teores de MO com o aumento da profundidade do solo.

No solo LVA-2 os teores de MO observados na camada de 0 – 5 cm foram maiores no Cerrado, comparado ao PD e ao PC (Figura 5 – D), sendo que o PD, com teor de MO 20% inferior ao cerrado, ainda foi superior em 46% ao PC. Já na camada de 5 – 10 cm, não foram evidenciadas diferenças entre o PD e o PC, entretanto ambos foram inferiores ao Cerrado em aproximadamente 20%, isso mostra que este solo é muito suscetível à mudanças, com perda de MO nas camadas superficiais quando cultivado, independente do manejo adotado. Na maior profundidade avaliada (10 – 20 cm) não foram observadas diferenças nos teores de MO entre os sistemas de manejo. Com a relação à distribuição da MO no perfil em cada sistema de manejo do solo, constatou-se que no PC ocorreu uma distribuição uniforme nos teores de MO no perfil, já no PD e no Cerrado ocorreu a formação de um gradiente decrescente ao longo do perfil.

4.1.2 pH do solo

Analizando-se o pH (CaCl_2) do solo nas áreas avaliadas verifica-se que no LV-1 (Figura 6 – A), na superfície do solo (camada de 0 – 5 cm), o pH foi maior no PD (6,2) do que no PC (5,6), o qual também apresentou-se com menor H^+ em solução que o Cerrado nativo (4,8). Já nas demais camadas do solo não houve diferenças no pH do solo entre o PD e o PC, sendo ambos os manejos superiores ao Cerrado. Comparando-se o pH no perfil do solo de cada um dos sistemas de manejo, constatou-se que em ambos os sistemas o pH foi inferior na maior profundidade do solo (camada de 10 – 20 cm). No cerrado nativo houve redução de 4,8 em superfície para 4,3 nas camadas inferiores do solo.

No solo LV-2 constatou-se elevadas concentrações de H^+ em solução no Cerrado nativo, com valor de pH de 3,6 para a camada de 0 – 5 cm, sendo este inferior aos encontrados nas demais profundidades do solo (3,9 e 4,0 para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, respectivamente) (Figura 6 – B). No PC não houve diferença no pH ao longo do perfil do solo, com valores médios entre 4,8 e 4,9. Já no PD houve maior pH em superfície, comparado às demais profundidades do solo, com valores saindo de 5,2 (camada de 0 – 5 cm) para 4,8 e 4,6, respectivamente para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, sendo que estas últimas não diferiram estatisticamente nos sistemas de manejo. O pH foi bem maior nas áreas cultivadas, independente do sistema de manejo, comprando-se com o Cerrado nativo, sendo tal resultado verificado em todas as profundidades avaliadas.

No solo LVA-1 verifica-se que o maior pH nas camadas superficiais foi no PD, com valores de 5,7 e 5,5 nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm, respectivamente, os quais foram superiores a camada de 10 – 20 cm (pH de 4,6), sendo superior ao PC e ao cerrado nativo (Figura 6 – C). Já no PC, ocorreu uma distribuição uniforme do pH no perfil do solo, com valores variando entre 5,1 e 5,2. No cerrado nativo foram encontrados os menores valores de pH no solo, com índices variando de 4,0 a 4,2, sendo que o pH foi um pouco maior na camada de 10 – 20 cm, comparado as demais camadas do solo.

No solo LVA-2 observa-se também valores muito baixos de pH no cerrado nativo, sendo que para a camada de 0 – 5 cm o pH foi 3,7, valor este próximo dos encontrados nas demais profundidades do solo (3,8 e 3,9 para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, respectivamente) (Figura 6 – D). No PC o maior pH foi encontrado na camada de 5 – 10 cm, sendo superior ao PD e ao cerrado nesta camada. O PD, por sua vez, apresentou maior pH em superfície (5,3), comparado as demais profundidades do solo, as quais apresentaram valores de 4,4 e 4,6, respectivamente para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, não diferindo entre si.

Figura 6 - Valores médios de pH-CaCl₂ no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

Comparando-se os sistemas de manejo em cada profundidade constata-se que, em todas as profundidades de amostragem, no Cerrado foram encontrados os menores valores de pH, sendo muito baixos (menor que 4,0) na maioria dos solos. Já nas áreas cultivadas o pH está numa faixa adequada para cultivo em todas as camadas avaliadas (próximo ou acima de 5,0) em função de correções realizadas ao longo dos anos de cultivo, exceção para o solo LVA-2. O PD manteve o pH do solo mais elevado nas camadas de 0-5 e 5-10 cm na maioria dos solos avaliados, enquanto que o PC manteve mais uniforme o pH ao longo do perfil.

4.1.3 Teores de H + Al (acidez potencial do solo)

Os resultados encontrados para a acidez potencial (Figura 7 - A) no LV-1 demonstram que, em todas as profundidades analisadas, a acidez foi maior no Cerrado nativo. Na camada superficial do solo (0 – 5 cm), os teores de H + Al foram menores no PD que no PC, com teores de 19,4 e 28,8 mmol_c dm⁻³, respectivamente. Nas profundidades de 5 – 10 e 10 – 20 cm não houve diferenças entre o PD e o PC, sendo ambos menores que no cerrado nativo. Em relação à distribuição de H + Al no perfil do solo, tanto no cerrado como nos sistema de manejo a menor acidez foi observada na camada mais superficial do solo.

No LV-2 os teores de H + Al foram muito maiores no Cerrado nativo do que no PD e no PC, em todas as profundidades analisadas (Figura 7 – B). Em todas as profundidades do solo os teores de H + Al no PD e no PC foram similares. Comparando-se as profundidades do solo pode-se observar que no Cerrado nativo o teor de H + Al encontrado na camada de 0 – 5 cm foi muito maior que nas áreas cultivadas, sendo também maior que os encontrados nas camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, respectivamente.

Os teores de H + Al no LVA-1 foram menores no PD nas camadas mais superficiais do perfil do solo, comparado ao PC e ao Cerrado nativo (Figura 7 – C). Na camada de 0 – 5 cm do solo o cultivo sob PC reduziu os teores de H + Al em 64,9%, enquanto que o uso do PD resultou em redução de 72,5% na acidez potencial do solo. Já na camada de 5 – 10 cm, os teores encontrados no PC e no PD foram 53,4% e 60,3% inferiores ao Cerrado, respectivamente. Por sua vez, na maior profundidade analisada (10 – 20 cm) a redução na acidez foi maior no PC, com teor de H + Al 47,4% menor que o Cerrado, contra uma redução de apenas 20,9% no PD.

No LVA-2 os resultados não seguem a mesma tendência dos locais anteriores, sobretudo comparando o PC e PD (Figura 7 – D). Como já observado para os demais solos, o cerrado nativo apresentou os maiores teores de H + Al comparado com áreas cultivadas, perfazendo-se essa tendência em todas as profundidades do solo analisadas. Entretanto, comparando-se o PD e o PC, verifica-se que este último proporcionou menor acidez nas camadas superficiais do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) do que o PD. Na camada de 10 – 20 cm não houve diferença entre o PD e o PC.

Figura 7 - Acidez potencial (H+Al) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

4.1.4 Teores de K no solo

Os teores de K trocável nos solos analisados demonstram que, em todas as profundidades analisadas, o cerrado nativo apresentou menor disponibilidade do nutriente (Figura 8). Sendo que os teores de K trocável no solo, no solo nativo de cerrado, situou-se entre 0,4 e 1,4 mmol_c dm⁻³.

Comparando os manejos do solo nas áreas de cultivo, não foram observadas diferenças nos teores trocáveis de K entre o PD e o PC no LV-1, em todas as profundidades analisadas (Figura 8 - A). Em relação à distribuição no perfil, no PD foi observado maior teor do nutriente em superfície, com redução gradativa nas maiores profundidades do solo. Já no PC,

maiores teores foram observados na camada de 0 – 5 cm, entretanto, não verificou-se diferença no teor trocável de K entre da camada de 5 – 10 cm para a de 10 – 20 cm.

No LV-2 os teores de K em superfície (0 – 5 cm) não diferiram entre os manejos (PD e PC), sendo ambos superiores ao cerrado nativo (Figura 8 - B). Nas camadas inferiores, o solo sob PC apresentou teores de K superiores aos encontrados no PD. A distribuição do K no perfil foi mais uniforme com o PC, onde verificou-se redução no teor disponível apenas na camada de 10 – 20 cm, enquanto que sob PD os teores de K no solo reduziram drasticamente já na camada de 5 – 10 cm.

Figura 8 - Teores trocáveis de potássio (K) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

No LVA-1 não foram encontradas diferenças nos teores de K entre os manejos do solo (PD e PC), em todas as profundidades avaliadas (Figura 8 - C). Com relação à distribuição do nutriente no perfil do solo, verificou-se que quando o solo foi manejo sob PD os teores de K não diferiram entre as profundidades. Já sob PC, constatou-se que maior teor do nutriente em superfície, com redução de 25% na camada de 5 – 10 cm, a qual não diferiu da profundidade de 10 – 20 cm.

No LVA-2 os teores de K disponível na superfície (0 – 5 cm) do solo foram maiores no PC, com redução de 37,5% quando do manejo do solo sob PD, sendo ambos maiores que o cerrado nativo (Figura 8 - D). Nas demais camadas não foram observadas diferenças entre os manejos do solo nas áreas cultivadas, sendo pouco superior ao cerrado nativo. A distribuição do nutriente no perfil em consequência dos manejos do solo foi similar, constatando-se que tanto sob PD quanto no PC os teores de K foram maiores na camada mais superficial do solo (0 – 5 cm). No entanto, cabe destacar que, em valores absolutos, este solo apresentou teores baixos de K disponível comparado com os demais solos utilizados no estudo, muito em função da constituição do mesmo, sendo mais arenoso e apresentando menor capacidade de retenção deste nutriente nas cargas da CTC.

4.1.5 Ca trocável no solo

Os teores trocáveis de Ca podem ser observados na Figura 9. Verifica-se que, em todos os locais e em todas as profundidades do solo avaliadas, no cerrado nativo foram encontrados os menores teores deste nutriente na forma disponível no solo.

Os teores Ca trocável encontrados no LV-1 em superfície (0 – 5 cm) foram maiores quando o solo foi manejado sob PD, comparado ao PC, não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo nas demais profundidades (Figura 9 – A). Avaliando-se os teores de Ca trocáveis ao longo do perfil do solo, as reduções não foram significativas nos 10 primeiros cm do solo, com redução significativa na camada de 10 – 20 cm, sendo que tal distribuição do nutriente ocorreu tanto sob PD quanto no PC.

No LV-2 a distribuição de Ca no perfil do solo manejado sob PC foi uniforme, não sendo observadas diferenças nos teores disponíveis nas profundidades analisadas (Figura 9 – B). Já no PD houve maior deposição de Ca em superfície (0 – 5 cm), com redução de 45% na concentração do nutriente na camada de 5 – 10 cm, a qual não diferiu da maior profundidade avaliada (10 – 20 cm). O manejo do solo influenciou nos teores de Ca em superfície (0 – 5 cm), sendo maior no PD, comparado ao PC. Entretanto, na profundidade de 5 – 10 cm do solo

não observou-se diferença entre os manejos, enquanto que na camada de 10 – 20 cm, o PC apresentou mais Ca disponível. Ambos os manejos apresentaram teor de Ca bem superior ao cerrado nativo, em todas as camadas.

No LVA-1 verifica-se que o manejo do solo influenciou nos teores de Ca em superfície (0 – 5 cm), sendo 2,5 e 41,5 vezes maior no PD, comparado ao PC do solo e ao cerrado nativo, respectivamente (Figura 9 – C). Entretanto, na camada de 5 – 10 cm não observou-se diferença entre os manejos, mantendo-se bem superiores ao cerrado nativo. Na camada de 10 – 20 cm, o PC apresentou mais Ca disponível que o PD. A distribuição de Ca no perfil do solo sob PC foi uniforme, enquanto que no PD houve maior teor em superfície (0 – 5 cm), com redução gradual para as demais camadas. O teor de Ca no cerrado nativo foi praticamente nulo em todas as camadas avaliadas.

Figura 9 - Teores trocáveis de cálcio (Ca) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Frágoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

No LVA-2 a distribuição de Ca no solo seguiu a mesma tendência dos demais locais, sendo que quando manejado sob PC os teores foram uniformes no perfil do solo (Figura 9 – D). Já no PD houve maior teor de Ca em superfície com redução gradual para as demais camadas. O manejo do solo influenciou diretamente no Ca em superfície (0 – 5 cm), sendo verificados maiores valores quando do manejo em PD, o qual apresentou teor de Ca trocável 149% maior do que no PC. Entretanto, nas demais profundidades não observou-se diferença entre os manejos no Ca disponível do solo. Da mesma forma que o observado para o solo LVA-1, este solo apresentou valores praticamente nulos de Ca trocável no cerrado nativo.

4.1.6 Mg trocável no solo

Os teores trocáveis de Mg no solo (Figura 10) indicam que, em todos os locais e profundidades do solo avaliadas, no cerrado nativo foram encontrados os menores teores deste nutriente em forma disponível no solo. Os teores Mg encontrados no LV-1 (Figura 10 – A) nas camadas superficiais (0 – 5 e 5 – 10 cm) foram maiores quando o solo foi manejado sob PD, comparado ao PC, não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo na maior profundidade analisada (10 – 20 cm). Avaliando-se os teores trocáveis ao longo do perfil do solo, não foram observadas diferenças no Mg nos 10 primeiros cm do solo manejado sob PC, enquanto no PD os maiores teores foram observados apenas na camada de 0 – 5 cm.

No LV-2 a distribuição do Mg no perfil do solo sob PC foi uniforme nas profundidades analisadas (Figura 10 – B). Já no solo sob PD houve maior quantidade de Mg em superfície (0 – 5 cm), com redução de 130% na quantidade disponível do nutriente já na camada de 5 – 10 cm, a qual não diferiu da maior profundidade avaliada (10 – 20 cm). O manejo do solo influenciou os teores de Mg em superfície (0 – 5 cm), sendo 127% maior no PD, comparado ao PC do solo. Na camada de 5 – 10 cm não houve diferença entre os manejos no Mg do solo, enquanto que na camada de 10 – 20 cm, o PC apresentou mais Mg disponível, com redução de 28% em relação ao PD.

Figura 10 - Teores trocáveis de magnésio (Mg) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

No LVA-1 verifica-se que o Mg trocável aumentou nas camadas superficiais do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) com a adoção do PD, comparado ao PC e ao cerrado nativo, respectivamente (Figura 10 – C). Entretanto, na profundidade de 10 – 20 cm o PC resultou em 77% mais Mg disponível do que o solo manejado sob PD. Analisando-se a distribuição dos teores de Mg no perfil em cada manejo do solo, constata-se que tanto no solo manejado sob PD quanto com o PC do solo, maiores quantidades de Mg foram depositadas em superfície (0 – 5 cm), com distribuição uniforme nas demais camadas em ambos os manejos.

Os teores trocáveis de Mg nas camadas superficiais (0 – 5 e 5 – 10 cm) do LVA-2 foram superiores no PD quando comparado ao PC (Figura 10 – D), não sendo observadas diferenças entre os manejos na maior profundidade avaliada (10 – 20 cm). Avaliando-se os teores trocáveis ao longo do perfil, sob PD maiores quantidades de Mg foram encontradas em

superfície (0 – 5 cm), sendo 31% e 165% superiores aos resultados verificados no PC e no cerrado nativo, respectivamente. No PC não foram observadas diferenças nos teores Mg nos 10 primeiros cm do solo, entretanto verifica-se maior deposição do Mg em subsuperfície (10 – 20 cm), com teor aproximadamente 30% maior que nas camadas superiores.

4.1.7 Saturação por cátions não ácidos no solo (V%)

A saturação por cátions não ácidos no solo (usualmente conhecida como saturação por bases) é determinada matematicamente, representando a porcentagem da CTC ocupada por cátions nutrientes trocáveis (K, Ca e Mg). No presente estudo tal atributo foi determinado e os resultados podem ser observados na Figura 11.

O V% foi maior nas áreas cultivadas (PD e PC) em todos os locais e profundidades do solo avaliadas. O V% encontrado no LV-1 em superfície (0 – 5 cm) foi maior quando o solo foi manejado sob PD, comparado ao PC (Figura 11- A), não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo nas demais profundidades analisadas (5 – 10 e 10 – 20 cm). Avaliando-se a saturação ao longo do perfil do solo, não foram observadas diferenças no V% com os manejos do solo.

No LV-2 a saturação por cátions no perfil do solo sob PC foi uniforme nas profundidades analisadas (Figura 11- B). Já no PD houve maior percentual de cátions nutriente em superfície (0 – 5 cm), com redução de 61% para 37% na camada de 5 – 10 cm e ainda para apenas 28% na maior profundidade avaliada (10 – 20 cm). O manejo do solo influenciou no V% em superfície (0 – 5 cm), com aumento de 42% do PC para 61% no PD. Na camada de 5 – 10 cm não se observou diferença entre os manejos, enquanto que na camada de 10 – 20 cm, o solo sob PC apresentou maior V%, sendo esta na ordem de 37%, contra 28% quando sob PD.

No LVA-1 o V% foi maior nas camadas superficiais do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) com a adoção do PD, com saturação por cátions nutrientes do solo na ordem de 73,7 e 53,1%, respectivamente para as profundidades de 0 – 5 e 5 – 10 cm, contra 47,8 e 42,9% para o PC, nas mesmas profundidades (Figura 11- C). O solo nativo apresentou proporções muito baixas de cátions não ácidos na CTC do solo, com valores não maiores que 3% em todas as profundidades do solo. Na profundidade de 10 – 20 cm o PC resultou em maior V%, com valores de praticamente o dobro do verificado no PD. A distribuição do V% no perfil mostra que sob PC a proporção de cátions nutrientes foi uniforme, já no PD houve um gradiente de concentração dos cátions no perfil, com maior saturação em superfície (0 – 5 cm).

Figura 11 - Saturação por bases (V%) no perfil do solo de áreas de Cerrado sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **A)** Costa Rica-MS (LV-1). **B)** Sapezal-MT (LV-2). **C)** Luziânia-GO (LVA-1). **D)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Barras horizontais representam a diferença mínima significativa, segundo o Teste T (LSD, $p < 0,05$)

O V% encontrado no LVA-2 em superfície (0 – 5 cm) foi maior quando o solo foi manejado sob PD, comparado ao PC, não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo nas demais profundidades analisadas (5 – 10 e 10 – 20 cm) (Figura 11- D). A saturação ao longo do perfil do solo foi relativamente uniforme e semelhante entre os manejos PC e PD.

4.2 Frações de P no solo

A análise de variância (Teste F) para as frações de P do fracionamento de Hedley consta na Tabela 6. Os resultados indicam que houve interação ($p < 0,05$) entre os sistemas de manejo e as profundidades no perfil do solo em todas as frações de P do fracionamento de Hedley. Excede-se de tal comportamento o P_{Residual} , no qual não foi observada interação significativa entre os manejos e as profundidades em todos os locais de estudo, sendo observadas ainda diferenças significativas quanto aos sistemas de manejo apenas nos solos com maior histórico de manejo (LV-1 e LVA-1). No P_{total} do solo, tanto no LVA-1 quanto no LVA-2 não foi verificada interação significativa entre os manejos do solo e as profundidades avaliadas, sendo que no local com maior tempo de manejo (LVA-1) houve efeito tanto do manejo quanto da profundidade do solo, enquanto no solo menos argiloso e com menor tempo de estabelecimento dos sistemas de manejo não houve efeito significativo para a profundidade do solo, sendo detectado apenas diferenças entre os sistemas.

Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para frações de P do fracionamento de Hedley em Latossolos de Cerrado sob sistemas de manejo (PD, PC e Cerrado nativo) e profundidades no perfil (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm). Costa Rica – MS (LV-1), Sapezal – MT (LV-2), Luziânia – GO (LVA-1) e Tasso Fragoso – MA (LVA-2)

Causa de Variação	Frações de P do fracionamento de Hedley									
	P _{RTA}	P _{iBIC}	P _{oBIC}	P _{iHID-0,1}	P _{oHID-0,1}	P _{HCl}	P _{iHID-0,5}	P _{oHID-0,5}	P _{residual}	P _{total}
LV-1^a										
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Manejo * profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
CV (%)	8,59	7,67	21,20	4,64	12,73	27,23	4,87	10,57	20,24	11,37
LV-2^b										
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Manejo * profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
CV (%)	20,19	7,17	18,62	2,64	19,17	13,56	7,92	36,38	30,81	11,37
LVA-1^c										
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	*
Manejo * profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns
CV (%)	18,10	17,70	24,42	4,22	20,17	18,82	3,21	28,01	25,67	11,37
LVA-2^d										
Manejo do solo	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Profundidade	*	*	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo*profundidade	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns
CV (%)	6,80	5,55	22,00	8,17	22,58	60,52	19,30	34,33	24,85	11,37

* significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns} não significativo

^a LV = Latossolo Vermelho; ^b LVA = Latossolo Vermelho amarelo

4.2.1 Frações inorgânicas

4.2.1.1 P extraído por resina (P_{RTA})

Os teores de P_{RTA} foram maiores na superfície do solo no LV-1 (0 – 5 cm) quando este foi manejado sob PD, com incremento de 18% comparado ao PC (32,0 e 27,2 mg kg⁻¹, respectivamente), (Figura 12-I). Nas demais profundidades as médias encontradas no PD e no PC são similares, com um pequeno decréscimo na camada de 10 – 20 cm observado no PC, sendo que ambos os sistemas proporcionaram teores de P_{RTA} superiores em 6,8 e 6 vezes ao Cerrado nativo, respectivamente.

No LV-2 os teores de P_{RTA} foram menores quando cultivado sob PC, sobretudo em superfície (0 – 5 cm), não sendo inclusive verificada diferença entre este e o cerrado nativo, sendo que a distribuição dos teores de P_{RTA} em profundidade tendeu a aumentar no PC, especialmente na camada 10-20 cm em função do revolvimento (Figura 12-II). No PD verificou-se expressivo acúmulo de P-disponível em superfície (0 - 5 cm), com teores de P_{RTA} na ordem de 56,2 mg kg⁻¹ superiores em 330% e 350%, comparados ao PC e a vegetação nativa, respectivamente. Nas demais profundidades as médias encontradas no PD e no PC são similares, com um pequeno decréscimo na camada de 10 – 20 cm observado no PC, sendo que ambos os sistemas proporcionaram teores de P_{RTA} em média mais de 2 vezes superiores ao Cerrado nativo.

No LVA-1 os teores de P_{RTA} foram menores em superfície (0 – 5 cm) quando manejado sob PD, entretanto evidenciou-se incremento de 7,0 vezes o teor de P disponível, comparado ao Cerrado nativo (Figura 12 – III). O PC, por sua vez, resultou nos maiores teores de P observados em superfície, sendo estes superiores em 30,4% e 912% comparados ao PD e à vegetação nativa, respectivamente. Tal tendência de maiores teores de P_{RTA} no solo quando do cultivo em PC permaneceu nas demais profundidades avaliadas. Com relação a distribuição no perfil do solo, no PD verifica-se a formação de um gradiente de concentração, com redução nos teores de P disponível com o aumento da profundidade do solo, sendo observada redução de 56% no P_{RTA} na camada de 10 – 20 cm, comparado ao teor em superfície. A adoção do PC, por sua vez, proporcionou distribuição uniforme de P nos 10 primeiros cm do solo, com redução de 21 para 11,8 mg kg⁻¹ em subsuperfície (10 – 20 cm).

No LVA-2 incrementos nos teores de P_{RTA} tanto com a adoção do PD como no PC do solo foram verificados, sendo que em superfície (0 – 5 cm) os resultados foram 3,68 e 1,9 vezes maiores que o teor encontrado no Cerrado nativo, sendo ainda observado que o PD

apresentou teor de P disponível bem maior que o PC, na camada do solo em questão (Figura 12 – IV). Na camada de 5 – 10 cm o incremento nos teores de P_{RTA} foi equivalente em ambos os manejos, enquanto que na maior profundidade do solo avaliada (10 – 20 cm) o PD proporcionou teor de P disponível menor em comparação ao PC, o que era esperado.

Figura 12 - Valores médios de P_{RTA} no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade não diferem entre si pelo Teste T (LSD p < 0,05)

De modo geral, verifica-se em todos os locais de estudo houve maior teor de P_{RTA} nas áreas de cultivo agrícola. Exime-se desse comportamento o LV-2 cultivado sob PC, onde verifica-se que sob tal sistema de manejo a quantidade de P_{RTA} em superfície (0 – 5 cm) não diferiu da encontrada no Cerrado nativo. Ainda no mesmo local, a distribuição dos teores de P_{RTA} em profundidade tendeu a aumentar no PC, especialmente na camada 10-20 cm em função do revolvimento, enquanto que no PD e no Cerrado nativo verifica-se maior acúmulo de P-disponível em superfície (0 - 5 cm).

4.2.1.2 P inorgânico extraído por $NaHCO_3$

Os teores de Pi_{BIC} de modo geral foram superiores nas áreas sob cultivo, tanto PC como PD, em todos os locais de estudo quando comparado com o cerrado nativo (Figura 13). No LV-1, verifica-se que tanto no PD quanto no PC o solo apresentou-se com maiores teores de P inorgânico lábil em todas as camadas avaliadas (Figura 13-I). Nas camadas superficiais (0 – 5 e 5 – 10 cm) os teores de Pi_{BIC} não diferiram do PD para o PC do solo, enquanto que na maior profundidade (10 – 20 cm) os teores no PC foram 23% menores que no PD. A distribuição dos teores no perfil, por sua vez, indicou maior deposição de P em tal fração na camada superficial do solo (0 – 5 cm), com teores superiores às demais profundidades avaliadas (figura 13 – I).

No LV-2 constatou-se que o PD incrementou o Pi_{BIC} do solo, comparado ao cerrado nativo, em todas as profundidades avaliadas (Figura 13-II). Já no PC apenas na profundidade de 10 – 20 cm os teores de Pi_{BIC} foram maiores que no cerrado. Os teores de Pi_{BIC} nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm foram 220% e 79% superiores, respectivamente, com o manejo do solo sob PD, comparado ao PC, o qual não proporcionou diferenças nos teores de Pi_{BIC} em relação ao Cerrado nativo. Na maior profundidade do solo (10 – 20 cm), não houve diferença entre o PD e o PC nos teores de Pi_{BIC} .

No solo LVA-1 a adoção do PD resultou numa elevação dos teores de Pi_{BIC} de 95%, enquanto que nas camadas inferiores do solo (5 – 10 e 10 – 20 cm) os incrementos foram de 225% e 260%, respectivamente, em relação ao cerrado nativo (Figura 13-III). O PC, por sua vez, incrementou em 180% os teores de Pi_{BIC} em superfície, enquanto que nas camadas inferiores os resultados encontrados com tal manejo do solo foram semelhantes ao PD, sendo 226% e 235% superiores a vegetação nativa. A distribuição dos teores de Pi_{BIC} no perfil, por sua vez, foi relativamente uniforme na camadas avaliadas, tanto no PD como no PC, com valores médios de 33,0 e 38,3 mg kg⁻¹, respectivamente.

Figura 13 - Valores médios de Pi_{BIC} no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No solo LVA-2 foram verificados incrementos nos teores de Pi_{BIC} distintos entre os manejos, enquanto que no PD os valores foram semelhantes nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, com pequena redução na camada de 10-20 cm, no PC este comportamento foi o oposto, ou seja, valores menores foram observados na camada de 0-5 cm, e incrementaram gradualmente de acordo com as maiores profundidades (Figura 13-IV). Já no cerrado nativo os valores foram menores que nas áreas cultivadas em todas as camadas avaliadas, com redução gradual das menores para as maiores profundidades, assim como observado para os demais locais.

4.2.1.3 P inorgânico extraído por NaOH-0,1 mol L⁻¹

Os resultados encontrados na fração de P inorgânico extraída com NaOH 0,1 mol L⁻¹ são apresentados na Figura 14. Verifica-se que em todos os locais os teores de $P_{HID-0,1}$ aumentaram com o cultivo no solo, tanto sob PD como no PC quando comparado com o cerrado, e este aumento foi mais expressivo nos Latossolos Vermelhos - LV (Figura 14-I e II).

Na camada mais superficial do LV-1 (0 – 5 cm) os teores de $P_{HID-0,1}$ foram maiores no PC do solo, enquanto que na camada de 5 – 10 cm não houve diferença entre os manejos, já na maior profundidade (10 – 20 cm) os teores observados no PC foram 51% menores que no PD (Figura 14-I). A distribuição dos teores no perfil, por sua vez, indicou maior deposição de P em tal fração na camada superficial do solo no PC (0 – 5 cm), enquanto que no PD verificou-se o inverso, com teores de $P_{HID-0,1}$ menores em superfície (0 – 5 e 5 – 10 cm), com maior deposição na profundidade de 10 – 20 cm.

No LV-2 a tendência foi a mesma observada no solo LV-1, mas com maiores teores de $P_{HID-0,1}$ verificados no PC nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm, já na camada de 10 – 20 cm o PD apresentou os maiores valores (Figura 14-II). Em todas as profundidades do solo o Cerrado nativo apresentou os menores teores de P moderadamente lábil, para ambos os solos LV avaliados. A distribuição dos teores no perfil do solo LV-2 foi relativamente uniforme no Cerrado nativo, com teores em média 10% maiores na camada de 5 – 10 cm, não sendo observadas diferenças significativas nas demais profundidades. Nestes dois solos LV avaliados houve uma distribuição nos teores de $P_{HID-0,1}$ em camadas distintas para os manejos, sendo que no PD os maiores teores foram verificados na maior profundidade (10-20 cm), enquanto no PC os maiores teores concentraram-se nos 10 primeiros centímetros do solo.

No solo LVA-1 a adoção do PD resultou em maiores teores de $P_{HID-0,1}$ que no PC, em todas as camadas avaliadas, sendo os incrementos na ordem de 14%, 24% e 11%, respectivamente para as camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (Figura 14-III). A distribuição desta fração no perfil do PC tendeu a uniformidade, enquanto que sob PD foram 12% maiores na camada de 5-10 cm, diferindo das demais profundidades do solo. Ressalta-se aqui que os valores observados desta fração de P no cerrado nativo foram os mais próximos das áreas cultivadas, em termos absolutos, quando comparado com os demais solos e áreas avaliados no estudo, embora também tenham sido inferiores estatisticamente.

Figura 14 - Valores médios de $Pi_{HID-0,1}$ no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

Na camada superficial do solo (0 – 5 cm) o teor de $Pi_{HID-0,1}$ no PD foi 107% superior ao Cerrado nativo no LVA-2 e o teor se manteve semelhante em todas as camadas avaliadas (Figura 14-IV). A adoção do PC incrementou em 41% na quantidade desta fração de P moderadamente lábil na camada superficial, com aumentos mais expressivos ainda nas demais camadas, sendo observados valores superiores em mais de 200% aos observados no Cerrado nativo na camada de 10-20 cm.

4.2.1.4 P extraído por HCl

Os resultados de P inorgânico extraídos com HCl 1,0 mol L⁻¹ podem ser observados na Figura 15. De modo geral, verifica-se que em todos os locais os teores de P_{HCl} encontrados foram baixos, com valores não ultrapassando a 20,6 mg kg⁻¹ no solo LV-2, o qual apresentou os valores mais elevados para esta fração. Para os demais solos os valores foram inferiores a 10 mg kg⁻¹ em todos os manejos e profundidades. Entretanto, observa-se que os cultivos, tanto sob PD quanto sob PC proporcionaram aumento no P_{HCl} do solo.

Figura 15 - Valores médios de P_{HCl} no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No solo LV-1, o manejo sob PD apresentou maiores teores de P_{HCl} , comparado ao PC e à vegetação nativa, com redução gradativa da superfície para as maiores profundidades (Figura 15-I). Mesmo comportamento foi observado para o PC, mas com valores absolutos menores que o PD, sendo que os valores observados no cerrado foram muito baixos em todas as camadas, em torno de 1 mg kg^{-1} .

No LV-2 os maiores teores de P_{HCl} também foram sob PD, tanto nas camadas de 0 – 5 como de 5 – 10 cm (Figura 15-II). Na profundidade de 10 – 20 cm o PC apresentou valor um pouco superior ao PD, mas em todas as camadas o Cerrado nativo apresentou teores muito baixos de P_{HCl} , semelhante ao solo LV-1. No solo LVA-1 os incrementos na fração P_{HCl} foram muito pequenos quando comparado com o cerrado nativo, embora seja significativo estatisticamente (Figura 15-III). Isso mostra que este solo não tem P ligado à cálcio, que é a fração extraída com este ácido.

No solo LVA-2, por sua vez, não foram observadas diferenças no P_{HCl} entre o PD e o PC em todas as camadas avaliadas. Os teores encontrados no solo cultivado foram superiores aos observados no solo nativo, excedendo-se desse resultado o teor de P_{HCl} verificado no PC na camada de 5 – 10 cm, o qual não diferiu estatisticamente do teor constatado no solo sob Cerrado nativo (Figura 15-IV).

4.2.1.5 P inorgânico extraído por $\text{NaOH-0,5 mol L}^{-1}$

Os resultados encontrados na fração de P inorgânico extraída com $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ são apresentados na Figura 16. Nos dois solos mais argilosos (LV-1 e LV-2) e no LVA-1 os teores de P_i nesta fração, que é considerada como não-lábil, foram superiores nas áreas cultivadas em relação ao cerrado. Já no solo mais arenoso, LV-2, os valores desta fração foram baixos, e em algumas camadas e manejos não diferiram do cerrado nativo.

No solo LV-1 os teores de $P_{iHID-0,5}$ em superfície (0 – 5 cm) foram 72% maiores no PD quando comparado ao PC, enquanto que nas camadas de 5 – 10 cm e 10 – 20 as diferenças entre os manejos foram menos pronunciadas, na ordem de 59% e 34% maiores no PD, respectivamente para as profundidades em questão (Figura 16-I). A distribuição dos teores no perfil, por sua vez, indicou maior deposição de P em tal fração na camada superficial do solo no PD diminuindo gradualmente nas demais profundidades avaliadas, enquanto que no PC verificou-se o uma distribuição uniforme no teores de $P_{iHID-0,5}$.

No LV-2 os maiores teores de $P_{iHID-0,5}$ foram verificados na camada de 0-5 cm no PD, sendo superior em 15% e 46% às quantidades de P inorgânico não-lábil encontradas no PC e

no cerrado nativo, respectivamente (Figura 16-II). Nas demais camadas do solo não observou-se diferenças nos teores de $Pi_{HID-0,5}$ entre o PD e o PC, sendo sempre superior ao cerrado. A distribuição dos teores no perfil do solo foi uniforme no PC, enquanto que o PD foi maior em superfície.

No solo LVA-1 a adoção do PD resultou em maiores teores de $Pi_{HID-0,5}$ do que o PC, nas camadas de 0 – 5 e 10 – 20 cm, enquanto o PC apresentou maior teor que o PD na camada de 5 – 10 cm (Figura 16-III). A distribuição dos teores de $Pi_{HID-0,5}$ no perfil tendeu a formação de uma gradiente de acúmulo em superfície (0 – 5 cm), tanto no PC quanto no PD, diferindo das demais profundidades do solo.

Figura 16 - Valores médios de $Pi_{HID-0,5}$ no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No solo LVA-2 os valores absolutos foram bem inferiores aos demais solos, mas observou-se uma distribuição dos teores de $P_{iHID-0,5}$ uniforme no PC e no PD, embora neste último, na camada mais profunda (10 – 20 cm), o teor de $P_{iHID-0,5}$ foi 24% menor, comparado as camadas superiores do solo (Figura 16-IV). Maiores teores são observados quando da adoção do PD, na ordem de 53% em relação ao PC nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm e ainda 72 e 93% em relação ao Cerrado nativo, nas mesmas profundidades em questão. Na maior profundidade avaliada (10 – 20 cm), não houve diferença no $P_{iHID-0,5}$, tanto no solo manejado sob PD quanto em PC, sendo que este último não diferiu do Cerrado nativo em tal camada do solo.

4.2.2 Frações orgânicas

4.2.2.1 P orgânico extraído por $NaHCO_3$

O fósforo orgânico lábil, o qual também é determinado pela extração com $NaHCO_3$ 0,5 mol L⁻¹ (P_{OBIC}) também foi influenciado pelos manejos do solo, com respostas distintas no perfil do solo (Figura 17). De modo geral, os solos LV tenderam a apresentar valores absolutos maiores de P_{OBIC} em relação aos solos LVA, e com maiores mudanças promovidas pelo manejo.

No LV-1 os teores de P_{OBIC} foram maiores em superfície (0 – 5 cm) nas áreas cultivadas em relação ao Cerrado nativo, com destaque para o PC (Figura 17-I). Na camada de 5 – 10 cm não detectou-se diferença entre o PD e PC no P_{OBIC} do solo, sendo ambos aproximadamente 72% superiores ao Cerrado nativo. Na camada mais inferior (10 – 20 cm) os teores observados foram substancialmente maiores no PD, sendo este 201% superior ao PC e quase 6 vezes maior que o cerrado, enquanto o PC proporcionou incremento de 90% no P_{OBIC} , comparado ao Cerrado nativo.

No LV-2, a adoção do PD proporcionou maiores teores de P orgânico lábil (P_{OBIC}), com incrementos de 89% em superfície (0 – 5 cm) até 176% e 322% nas camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, respectivamente, quando comparado com o cerrado (Figura 17-II). O PC resultou em menores teores de P_{OBIC} em superfície, sendo inclusive inferiores aos encontrados no Cerrado nativo, já nas demais camadas há elevação dos teores de Po nesta fração. Comparando-se o PD e o PC verifica-se que, de modo geral, os teores de P_{OBIC} são maiores no PD em superfície (0 – 5 e 5 – 10 cm), sendo que na camada mais profunda avaliada estes teores se equivalem.

Figura 17 - Valores médios de Po_{BIC} no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

Os resultados encontrados no LVA-1 indicam que houve incremento na fração orgânica lábil de P em ambos os manejos do solo, comparado ao Cerrado nativo (Figura 17-III). Comparando-se o PD e o PC constata-se que os teores de Po_{BIC} não diferiram na camada mais superficial do solo (0 – 5 cm), sendo que nas demais profundidades o PC proporcionou maiores teores de Po na fração. No LVA-2 de modo geral verifica-se muito pequeno incremento no P orgânico lábil com o cultivo do solo, tanto em PD como no PC, e este

incremento está restrito à camada mais superficial do solo (0-5 cm), e em menor grau na camada de 5-10 cm (Figura 17-IV).

4.2.2.2 P orgânico extraído por NaOH-0,1 mol L⁻¹

O fósforo orgânico moderadamente lábil ($P_{\text{HID-0,1}}$) também foi influenciado pelos manejos do solo (Figura 18). No LV-1 os teores de $P_{\text{HID-0,1}}$ foram maiores em superfície (0 – 5 cm) em todos os manejos avaliados, sendo que em tal camada a adoção do PC resultou nos maiores teores de $P_{\text{HID-0,1}}$, superior em 22% ao PD e 253% ao Cerrado nativo, o qual apresentou um teor de $P_{\text{HID-0,1}}$ 188% menor que o PD (Figura 18-I). Nas profundidades de 5 – 10 e 10 - 20 cm verificam-se diferenças ainda mais superiores no PC, sendo estas na ordem de 28,5 e 81,5 vezes maiores que os encontrados no Cerrado nativo, respectivamente. Os resultados observados no PD foram superiores ao cerrado, entretanto, numa amplitude muito inferior ao PC (9,1 e 39,3 vezes superiores, respectivamente para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm).

No LV-2, a adoção do PD proporcionou maiores teores de P orgânico moderadamente lábil ($P_{\text{HID-0,1}}$) em superfície (0 – 5 cm), com incrementos de 66% em relação ao PC, o qual não diferiu do Cerrado nativo (Figura 18-II). Nas demais camadas, maiores teores de $P_{\text{HID-0,1}}$ foram observados no PC, com resultados 105% e 262% maiores que o PD, em 5 – 10 e 10 – 20 cm, respectivamente. A adoção do PD resultou em incremento no teor de $P_{\text{HID-0,1}}$ na camada de 5 – 10 cm, em comparação com o solo nativo, enquanto que na camada de 10 – 20 cm os teores no PD e no Cerrado nativo não diferiram entre si.

Figura 18 - Valores médios de $Po_{HID-0,1}$ no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No LVA-1, tanto a adoção do PC quanto do PD resultaram em maiores teores de $Po_{HID-0,1}$, comparado ao cerrado nativo, em todas as camadas avaliadas (Figura 18-III). A adoção do PD resultou em incrementos de 32% e 241% nos teores de $Po_{HID-0,1}$ em superfície (0 – 5 cm), comparado ao PC e ao cerrado nativo, respectivamente. Nas demais profundidades não houve diferença entre os manejos do solo (PD e PC), sendo ambos em média 140% e 237% superiores ao Cerrado nativo, respectivamente para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm. Verificou-se ainda maior acúmulo desta fração no PD em superfície (0 – 5 cm) reduzindo gradualmente com a profundidade, enquanto que no PC os teores foram semelhantes entre si nas camadas mais superficiais (0-5 e 5 – 10 cm).

No LVA-2, incrementos nos teores de $P_{\text{HID-0,1}}$ foram verificados tanto no PD quanto no PC, com diferenças significativas entre estes nas camadas superficiais do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), não diferindo na maior profundidade avaliada (10 – 20 cm) (Figura 18-IV). Na camada de 0 – 5 cm o teor de $P_{\text{HID-0,1}}$ no PD foi mais de 7 vezes superior ao Cerrado nativo, enquanto a adoção do PC incrementou em 3,5 vezes esta fração moderadamente lábil. Na profundidade de 5 – 10 cm, o teor de $P_{\text{HID-0,1}}$ no PD for 110% superior e ao encontrado no solo manejado sob PC, e ainda mais de 10 vezes superior aos valores observados no cerrado nativo. Na maior profundidade do solo (10 – 20 cm) não foi observado diferença entre o teor de $P_{\text{HID-0,1}}$ encontrado no PD e no PC, sendo o teor médio em ambos mais de 15 vezes superior ao observado no cerrado nativo.

4.2.2.3 P orgânico extraído por $\text{NaOH-0,5 mol L}^{-1}$

O fósforo orgânico não-lábil ($P_{\text{HID-0,5}}$) também foi influenciado pelos manejos do solo (Figura 19). No LV-1 os teores de $P_{\text{HID-0,5}}$ foram maiores em superfície (0 – 5 cm) em todos os manejos avaliados, e a adoção do PD resultou nas maiores concentrações, sendo 54% maior que os teores encontrados no PC e mais de 8 vezes superior ao Cerrado nativo, enquanto que o PC apresentou um teor de $P_{\text{HID-0,5}}$ pouco mais de 5 vezes superior ao solo nativo (Figura 19-I). Na profundidade de 5 – 10 cm não houve diferenças nos teores de $P_{\text{HID-0,5}}$ encontrados no PD e o PC, sendo estes em média 9,5 vezes superiores ao resultado encontrado no cerrado nativo. Na maior profundidade do solo (10 – 20 cm) os resultados observados no PC foram superiores ao cerrado, entretanto, numa amplitude muito inferior ao PD, o qual apresentou teores de P não-lábil 14,4 vezes superior ao cerrado nativo, enquanto o PC proporcionou teor 9,5 vezes maior que o solo nativo.

No LV-2, a adoção do PD e do PC também proporcionou maiores teores de P orgânico não-lábil ($P_{\text{HID-0,5}}$) em todas as camadas do solo, não sendo observadas diferenças significativas entre o PD e o PC no teor de Po não-lábil no solo (Figura 19-II). A distribuição dos teores no perfil demonstrou que no PD houve acúmulo de Po em superfície (0 – 5 cm), enquanto no PC, embora os teores observados em superfície tenham sido menores que os verificados no PD, a distribuição do Po não-lábil foi uniforme das camadas avaliadas.

Figura 19 - Valores médios de $Po_{HID-0,5}$ no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para a profundidade) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No LVA-1, a adoção do PD resultou em incrementos de 65% e 25% nos teores de $Po_{HID-0,5}$ em superfície (0 – 5 cm), comparado ao PC e ao cerrado nativo, respectivamente (Figura 19-III). Os teores encontrados no PC para a camada em questão foram menores que os encontrados no cerrado nativo, enquanto que nas demais profundidades, as quantidades de Po não-lábil no PC foram superiores ao PD e ao cerrado nativo, indicando que houve mobilização do P não-lábil para as profundidades inferiores do solo. No PD verifica-se redução no Po desta fração com o aumento da profundidade, evidenciando que o acúmulo de P orgânico se dá nas camadas mais superficiais do solo. Ainda, os teores inferiores ao solo

nativo observados na maior profundidade indicam que provavelmente o Po tenha sido remobilizado para a superfície pelas culturas nativas existentes no local.

No LVA-2 os resultados são contrastantes com os demais locais (Figura 19-IV). O PD não incrementou o $P_{O_{HID-0,5}}$ nas camadas superficiais do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), com resultados similares aos verificados no cerrado nativo, enquanto que a adoção do PC resultou em maior Po não-lábil em tais profundidades, comparado ao PD e ao solo nativo. Na profundidade de 10 – 20 cm, entretanto, maiores teores de Po não-lábil foram observados no PD, sendo superior ao PC, o qual não diferiu do cerrado nativo.

4.2.3 P residual e P total do solo

De modo geral, o $P_{Residual}$ apresentou certa estabilidade no solo, não sendo encontradas diferenças na distribuição da fração residual no perfil nos manejos do solo (Figura 20). Somente no LV-1 e no LVA-1 foram observadas diferenças na fração residual de P em função do manejo do solo, com menores valores médios no perfil do PD no LV-1, enquanto que no LVA-1 os maiores valores médios de $P_{Residual}$ foram obtidos no solo manejado sob PD, seguido do PC, os quais foram superiores aos valores encontrados no Cerrado nativo.

O P_{total} do solo, determinado pelo somatório das frações de P obtidas com o fracionamento de Hedley, foi influenciado pelos manejos do solo em todos os locais de estudo, com respostas distintas entre os solos para a interação entre os manejos e a distribuição dos teores totais de P no perfil (Tabela 7). No LV-1 verifica-se interação significativa entre os manejos e a profundidade do solo. Tanto no Cerrado nativo quanto no PD os maiores teores totais de P ocorrem em superfície (0 – 5 cm), enquanto que nas demais profundidades não foram observadas diferenças significativas. Já com o PC verifica-se uniformidade no P_{total} no perfil do solo, o que era esperado em função do revolvimento. Comparando-se os manejos com o Cerrado nativo, verifica-se que o cultivo do solo incrementou os teores de P_{total} do solo, tanto sob PD como em PC, sendo que não são observadas diferenças significativas entre o PD e o PC nas camadas mais profundas do solo, ocorrendo aumento de 11,5% no P_{total} em superfície (0 – 5 cm), quando este foi cultivado sob PD, comparado ao PC.

Figura 20 - Valores médios de $P_{Residual}$ no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Frágoso-MA (LVA-2). Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos) não diferem entre si (Teste T, LSD $p < 0,05$)

No LV-2 também foi verificada interação significativa entre os manejos e a profundidade do solo. Em superfície (0 – 5 cm) o PD apresentou maior teor de P_{total} , com valores 28% e 72% superiores aos encontrados no PC e no solo nativo, respectivamente. O PC proporcionou incremento de 34% no P_{total} em relação ao cerrado nativo. Nas demais profundidades do solo não foram detectadas diferenças entre o PD e o PC nos teores totais de P, sendo evidenciado que os manejos proporcionaram incrementos no P_{total} de 62,5% e 86%, respectivamente para as camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm, em comparação ao cerrado nativo.

Tabela 7 – Somatório das frações determinadas pelo fracionamento de Hedley (P_{Total}) no perfil de solos no Cerrado Brasileiro sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado). 2013

Camadas (cm)	Sistemas de Manejo			MÉDIA
	PD	PC	Cerrado	
	----- P_{Total} (mg kg ⁻¹) -----			
	----- LV-1 ^(a) -----			
0 – 5	954 Aa	856 Ba	533 Ca	781
5 – 10	785 Ab	849 Aa	450 Bab	694
10 – 20	826 Ab	773 Aa	401 Bb	667
MÉDIA	855	826	461	
	----- LV-2 ^(b) -----			
0 – 5	1210 Aa	943 Ba	702 Ca	952
5 – 10	883 Ab	947 Aa	563 Bb	797
10 – 20	834 Ab	879 Aa	472 Bb	728
MÉDIA	975	923	579	
	----- LVA-1 ^(c) -----			
0 – 5	869	736	399	668 a
5 – 10	796	703	359	619 ab
10 – 20	691	679	375	582 b
MÉDIA	786 A	706 B	378 C	
	----- LVA-2 ^(d) -----			
0 – 5	553	399	326	426 ^{ns}
5 – 10	480	415	286	394
10 – 20	476	464	282	407
MÉDIA	503 A	426 B	298 C	

^(a) LV-1 (Costa Rica-MS); ^(b) LV-2 (Sapezal-MT); ^(c) LVA-1 (Luziânia-GO); ^(d) LVA-2 (Tasso Fragoso-MA).

^{ns} = não significativo pelo teste F (p<0,05)

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula para os manejos e minúscula para as profundidades) não diferem entre si (Teste T, LSD p<0,05)

No LVA-1 não foi verificada interação significativa entre os manejos do solo e as profundidades do solo no P_{total} , sendo, entretanto, observados efeitos isolados, com diferenças tanto para os sistemas de manejo, quanto para as profundidades avaliadas (tabela 7). A adoção

do PD proporcionou maior P_{total} ao solo, com incrementos de 108% em relação ao Cerrado nativo, sendo ainda 11,3% superior a média observada no perfil do solo cultivado sob PC. O cultivo do solo em PC também aumentou o P_{total} do solo, porém numa magnitude inferior a observada no PD, sendo o incremento na ordem de 87%, em comparação com o cerrado nativo.

No LVA-2, por sua vez, não foram verificados efeitos significativos, tanto na interação entre os manejos do solo e as profundidades do solo, como para o efeito isolado da profundidade do solo, evidenciando que os teores totais de P no solo foram uniformes no perfil, independentemente do sistema de manejo. Quanto aos manejos, a adoção do PD ou do PC resultaram em incrementos no P_{total} do solo, sendo esses na ordem de 69% no PD, contra apenas 43% no PC, comparado ao cerrado nativo.

4.3 Distribuição das frações de P com a labilidade

As frações de P foram agrupadas segundo a labilidade do P predita pelos extratores (Figura 21). Para tanto, assume-se que, de modo geral, o P lábil seja composto pelo P_{RTA} , somado ao P_{BIC} (inorgânico e orgânico), enquanto o P moderadamente lábil compreende o $P_{\text{HID-0,1}}$ (P_i e P_o) somados ao P_{HCl} , e que o P não-lábil seja constituído pela soma do $P_{\text{Hid-0,5}}$ (P_i e P_o) ao P_{Residual} (P_i e P_o). Reforça-se novamente que a opção pelo agrupamento do $P_{\text{Hid-0,5}}$ na fração não-lábil se deve à mudança na ordem de extração do procedimento (CONDRON et al., 1985), pela fração corresponder ao P protegido por intra-agregados do solo, a qual apenas seria considerada de labilidade moderada em casos de exaurimento de formas mais lábeis de P.

A labilidade do P, na fertilidade do solo, independentemente de sua natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo. As formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis podem ser entendidas como as formas extraídas pelo fracionamento, numa sequência de forças de extração proporcional ao potencial de retenção de P no solo, partindo de frações mais solúveis e, portanto, teoricamente mais biodisponíveis, a formas mais recalcitrantes, consideradas indisponíveis.

De modo geral, verifica-se acúmulo de formas lábeis de P em superfície (0-5 cm), sobretudo com o PD, enquanto que no PC evidencia-se maior deposição de P em formas moderadamente lábeis do nutriente (Figura 21). Em todos os solos, a proporção de formas não-lábeis foi superior a 50% do teor total de P encontrado, tanto com a adoção do PD, quanto para o PC do solo. Ainda, verifica-se expressiva proporção de formas não-lábeis de P no

cerrado nativo, evidenciando a característica de alta fixação do nutriente em solos tropicais. O comportamento das formas lábeis de P é invertido para o PD e o PC, quando observado em maiores profundidades do solo (10-20 cm), onde se constatou equivalência entre os manejos no acúmulo tanto de formas lábeis, quanto moderadamente lábeis de P.

Figura 21 – Distribuição das frações de P quanto a sua labilidade em solos sob diferentes manejos (Plantio Direto, PD; Preparo Convencional, PC e vegetação nativa, Cerrado) no Cerrado Brasileiro. **I)** Costa Rica-MS (LV-1). **II)** Sapezal-MT (LV-2). **III)** Luziânia-GO (LVA-1). **IV)** Tasso Fragoso-MA (LVA-2)

5 DISCUSSÕES

5.1 Atributos químicos de fertilidade do solo

A matéria orgânica do solo é influenciada diretamente pelo sistema de manejo, e essas mudanças mais expressivas na camada superficial (0-5 cm), sendo o PD bastante superior ao PC (Figura 5). Os teores de MO foram semelhantes ao Cerrado nativo em superfície no LV-1 e LVA-1, sendo tais resultados atribuídos ao maior tempo de manejo em tais solos, demonstrando que, em longo prazo, a adoção do PD gera grande acúmulo de MO em superfície, ocasionando a restituição do teor original do solo. Para o LV-2 e LVA-2 os teores de MO foram inferiores no PD aos observados no Cerrado, entretanto, estes foram superiores ao PC. Hernani, Kurihara e Silva (1999) e Almeida et al. (2005) também observaram que no PD houve aumento do estoque de MO nas camadas superficiais do solo em comparação ao convencional.

No PD, comparado ao PC, a velocidade de degradação da MO do solo é reduzida, em função do menor revolvimento e maior preservação dos resíduos vegetais em superfície (FONTANA et al., 2006). Almeida et al. (2005) observaram que no PD houve aumento do carbono orgânico nas camadas superficiais do solo, e consequentemente, aumento nos teores de nutrientes nas frações orgânicas, o que sugere uma maior estabilidade do PD, em comparação ao PC do solo.

O revolvimento do solo proporcionado pelo PC resulta na deposição do material orgânico originalmente de superfície às profundidades maiores do perfil do solo. No PC a mineralização da MO proporcionada pelo revolvimento do solo proporciona menor acúmulo, com distribuição mais uniforme no perfil. De modo geral, os teores de MO foram menores nos locais onde o tempo de manejo é mais recente (LV-2 e LVA-2, com 12 anos nos manejos do solo), comparado aos locais manejados por mais anos (LV-1 e LVA-1, com 19 e 21 anos respectivamente). Os teores de MO no PD inferiores aos encontrados no Cerrado nativo em alguns solos se devem ao tempo de manejo do solo, visto que nestes solos o PD encontra-se saindo da fase considerada de transição e indo para a fase de consolidação (SÁ et al., 2001).

Os resultados encontrados demonstram que sistemas que não envolvem a mecanização do solo, como o PD ou a vegetação nativa, resultam num gradiente de concentração de MO no perfil do solo, com maiores teores em superfície do solo. Ainda, o revolvimento do solo e a consequente incorporação da MO, caso do PC, além de expor os resíduos a um maior volume

de solo e, conseqüentemente, maior contato com os microrganismos, desestruturaram os agregados entre argila e MO, culminando numa acentuação da mineralização desta no solo. O PD, comparado ao PC, diminui a velocidade de degradação da matéria orgânica pelo menor contato entre o resíduo vegetal e o solo, por ser depositado sobre a superfície, retardando o ataque pelos microrganismos (FONTANA et al., 2006).

A distribuição do pH em cada sistema de manejo, nos primeiros 20 cm do solo, evidencia que o pH encontrado em áreas de cultivo agrícola frequentemente é maior que o observado no Cerrado nativo. Tal resultado se deve à correção contínua pela prática da calagem (SOUSA; LOBATO, 2004). Comparando os sistemas de manejo do solo, o pH nas camadas de 0 – 5 e 5 – 10 cm foi maior no PD que no PC, demonstrando que de fato o PD consolidado resulta em maior pH do solo em superfície. Na maior profundidade (10 – 20 cm) o pH no PD foi menor que no PC (4,8 e 4,6, respectivamente), fato que pode ser atribuído a incorporação constante de corretivos de solo no PC, promovendo uma distribuição uniforme do pH no perfil.

Os resultados encontrados no PD indicam que tal sistema de manejo proporciona elevação no pH do solo em camadas superficiais, demonstrando que o manejo adotado tem grande contribuição para a variabilidade vertical de alguns atributos do solo. Tal tendência também foi observada por outros pesquisadores em áreas de produção e de pesquisa (MARTINAZZO, 2006; SIQUEIRA NETO, 2006). Maiores valores de pH observados no sistema convencional, a partir de 5– 10 cm de profundidade, são ocasionados pelo revolvimento do solo, que promove uma homogeneização dos materiais no perfil pelo menos até 20 cm. Para o PD, a deposição e decomposição de resíduos na superfície favorece a manutenção do pH (em CaCl_2) entre 5,4 e 6,5, sendo considerado adequado para as plantas na camada mais superficial, uma vez que o pH dos resíduos normalmente se situa próximo de 6,0 até 6,5 (PAVINATO, 2007). Em camadas mais profundas, esse efeito é inexpressivo e os processos naturais de acidificação promovem diminuição do pH.

A acidez potencial do complexo de troca catiônica pode ser analisada com o uso de soluções extratoras com efeitos tamponantes. No presente estudo, a acidez potencial do complexo de troca catiônica foi analisada por correlação com o índice SMP do solo, determinado pelo pH SMP. De modo geral, o PD proporcionou redução no $\text{H} + \text{Al}$ em superfície, sendo que nos solos manejados por menor tempo (LV-2 e LVA-2, com 12 anos de histórico) a redução na acidez potencial proporcionada pelo PD restringiu-se aos 5 primeiros cm do solo, enquanto que nos locais de maior tempo de manejo (LV-1 e LVA-1, com 20 anos) observou-se redução no $\text{H} + \text{Al}$ do solo até a camada de 5 – 10 cm. As diferenças

encontradas se pronunciavam em função do tempo de manejo do solo, uma vez que nos solos com menor tempo de manejo (12 anos) o PD encontra-se na fase de transição para a de consolidação, ou seja, os aportes de MO, bem como a ciclagem de nutrientes e a formação de agregados orgânicos, com efeito tamponante da MO no solo, não se fazem ainda pronunciados nesta fase do sistema, além destes efeitos sofrerem influência da variabilidade vertical (SÁ et al., 2001).

Embora, de modo geral, se tenha observado no PD maior acidez em subsuperfície (10 – 20 cm), uma vez que os teores de H + Al em superfície foram menores, comparados aos demais sistemas de manejo, o que fica evidenciado é que o manejo conservacionista do solo por longo período é uma prática que proporciona maior resiliência dos solos tropicais em tornarem-se ácidos. A presença de material orgânico no PD pode ter contribuído para complexação de H⁺ e Al³⁺ livres, assim como constatado por Zambrosi, Alleoni e Caires (2008), onde os autores verificaram num Latossolo sob PD e em vegetação nativa que o Al³⁺ estava, predominantemente, complexado pelo carbono orgânico dissolvido e pelo fluoreto e, em baixíssimas proporções, na forma livre Al³⁺, culminando na redução de cátions ácidos no solo.

Analisando-se a distribuição da acidez no Cerrado nativo verifica-se que o teor de H + Al foi maior em superfície (0 – 5 cm), formando um gradiente decrescente no perfil do solo. Isso se deve ao contínuo ciclo de depósito de material orgânico superficial, influenciando os teores de K, Ca e Mg adicionados à superfície, os quais alteram a dinâmica e a proporção de H + Al na CTC do solo.

Em todas as profundidades analisadas houve menor disponibilidade do K trocável no solo no Cerrado, sendo tal resultado diretamente relacionado às adições de K anuais feitas nos cultivos, tanto em PD como em PC (Figura 8). Comparando-se os manejos do solo nas áreas de cultivo verifica-se que, de modo geral, a variabilidade vertical do K no solo ocorre tanto sob PD quanto em PC. Os maiores teores de K em superfície no PD são esperados, em função do K reciclado da MO, pois em geral, a concentração de K nos resíduos é de 65 - 75% do total de K absorvido pela planta (MALAVOLTA, 2006), evidenciando que os resíduos da colheita constituem-se de importante fonte de K para culturas subsequentes.

Comparando os solos, constata-se que a disponibilidade de K está intimamente relacionada à CTC do solo, pois nos Latossolos Vermelhos (LV-1 e LV-2) verificam-se maiores teores de K disponível, enquanto que nos Latossolos Vermelho Amarelos (LVA-1 e LVA-2) os teores de K são expressivamente menores, havendo também distribuição mais

uniforme do K no perfil. Destaca-se ainda que o tempo de manejo não acarretou em diferenças nos teores trocáveis de K, podendo tais resultados serem explicados pelas características do K em plantas, onde tal nutriente não apresenta formação de nenhum composto, estando livre em solução (MALAVOLTA, 2006), e consequentemente, sua retenção ao solo estaria diretamente ligada a CTC do solo e não a formação de compostos orgânicos de alguma recalcitrância.

Esse comportamento do K disponível na camada superficial em função do manejo é resultante da deposição de resíduos superficialmente no PD, sendo disponibilizada maior quantidade deste nutriente nesta camada pela decomposição, em detrimento de camadas mais profundas. Já no PC, como esses resíduos foram incorporados, ocorreu maior liberação de K em subsuperfície, comparado ao PD. Entretanto, as grandes quantidades de K em superfície no PC também são constatadas, sendo similares as encontradas no PD. Tal comportamento pode ser facilmente explicado pela forma de aplicação do nutriente adotada nos locais de estudo (Tabela 2), sendo que o K aplicado todo em pré-plantio a lanço (superficialmente), tanto em PD quanto em PC, destacando que a aplicação no PC é feita após o preparo do solo com as gradagens. Por tal razão os resultados encontrados no presente estudo diferem dos encontrados por Almeida et al. (2005) e Calegari et al. (2013), os quais mencionam que o K acumular-se-ia em camadas mais superficiais no PD em relação ao PC.

Em todos os locais avaliados os teores de Ca e Mg disponíveis no Cerrado nativo foi menor, comparado aos solos sob lavoura, tanto em PD como no PC. O Ca e o Mg trocáveis em superfície (0 – 5 cm) foram maiores quando o solo foi manejado sob PD, comparado ao PC, não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo nas demais profundidades. Almeida et al. (2005), avaliando a distribuição de Ca e Mg em um Cambissolo, observaram uma leve tendência de incremento nos teores de Ca e Mg no PD em relação ao PC, até 30 cm, o que não se observou no presente estudo. Entretanto, corroboram com os resultados de Pavinato, Merlin e Rosolem (2009a), onde os autores, também trabalhando com Latossolos de Cerrado, observaram maior deposição de Ca e Mg nos 5 primeiros cm do solo quando este foi manejado sob PD, com distribuição uniforme no perfil quando do uso do PC. Em função das características de baixa solubilidade dos corretivos aplicados em superfície em sistemas de PD, a eficiência na correção da acidez em profundidade é diminuída e, consequentemente, a redução nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} é frequentemente observada em tal sistema (FLORES et al., 2008).

A distribuição de Ca e Mg no perfil do solo manejado sob PC foi uniforme, não sendo observadas diferenças nos teores disponíveis do nutriente nas profundidades analisadas, fato

este que pode ser atribuído a uniformização da camada arável com corretivos agrícolas, resultando em uniformidade de correção da acidez do solo e, conseqüentemente teores similares de Ca e Mg trocáveis no perfil (MATIAS et al., 2009).

No presente estudo, a saturação por bases (V%) foi maior nas áreas cultivadas (PD e PC) que no Cerrado nativo, em todos os locais e profundidades avaliadas. O V% encontrado em superfície (0 – 5 cm) foi maior sob PD, comparado ao PC, não sendo observadas diferenças entre os manejos do solo nas demais profundidades analisadas (5 – 10 e 10 – 20 cm). O V% no perfil do solo manejado sob PC foi uniforme nas profundidades analisadas. Estes resultados estão de acordo com os observados por Calegari et al. (2013), onde os autores encontraram maior saturação por bases no PD nas camadas superficiais do solo, atribuindo tais resultados ao manejo de correção superficial no PD, culminando no maior acúmulo de Ca e Mg em superfície, com formação de um gradiente de disponibilidade.

5.2 Frações de P no solo

5.2.1 Frações inorgânicas

Com relação aos sistemas de manejo do solo, devido às adubações regulares promovidas durante os cultivos, houve aumento dos teores de P em todas as áreas avaliadas, em todas as frações de P, comparado ao solo de cerrado nativo.

O P_{RTA} é o primeiro a ser extraído no esquema do fracionamento, sendo tal quantidade de P classificada como lábil, e assim sendo, prontamente disponível às plantas. De modo geral, no presente estudo evidenciou-se a tendência de formação de uma zona de maior disponibilidade de P no PD na camada mais superficial, tanto nos solos manejados por 20 anos (LV-1 e LVA-1), quanto nas áreas de menor tempo de manejo (LV-2 e LVA-2, com 12 anos de histórico). Resultados similares aos encontrados no presente estudo foram obtidos por Tiecher et al. (2012), avaliando a disponibilidade de formas de P em Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de manejo, onde o autor encontrou maior disponibilidade de P na fração determinada por RTA na camada superficial no PD quando comparado com o PC. Tal resultado também foi observado por Zamuner, Picone e Echeverria (2008), onde os autores verificaram que quando o solo é cultivado por longo período de tempo sob PD ocorre o acúmulo de P em frações mais disponíveis na camada superficial, pois o revolvimento do solo

ocorre apenas no sulco de semeadura, e assim a fertilização é feita em volume de solo menor do que no PC.

O fósforo inorgânico extraído por NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, corresponde a uma fração também disponível e, portanto, sensível à mudanças na solução do solo pela absorção pelas plantas, sendo esta, juntamente com a fração P_{RTA} , também componente da fração lábil de P no solo (GATIBONI, 2003). O menor revolvimento do solo no PD, expondo menos o P dos fertilizantes às reações de adsorção, aliado ao maior teor de carbono orgânico total no solo da camada superficial, pode resultar em diminuição dos sítios de adsorção de P através da competição exercida pelos ácidos orgânicos de baixo peso molecular (HUE, 1991). Isso explica os maiores teores de P_{RTA} e P_{BIC} (formas lábeis de P) no solo, sobretudo na camada de 0 - 5 cm sob PD, comparativamente ao PC. Ainda, a atividade microbiana nas camadas superficiais do PD também contribui para maior disponibilidade potencial do P às plantas, já que o P da biomassa dos micro-organismos não é adsorvido aos colóides e, portanto, permanece biodisponível (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2002).

Resultados semelhantes, indicando a maior uniformização das formas inorgânicas de P no perfil do solo quando submetido ao PC, foram obtidos por Rheinheimer e Anghinoni (2001), onde os autores ainda observaram que no PC existe maior tendência do P ficar retido a formas de menor labilidade que sob PD. O fato é que, no presente estudo, os sistemas de manejo se assemelham se for levada em consideração apenas as camadas mais profundas do solo (5 – 10 e 10 – 20 cm), mas na camada mais superficial, a zona de alta fertilidade e grandes quantidades de resíduos orgânicos resultantes da adoção do PD favoreceram a elevação de todas as formas de P, sobretudo as de menor recalcitrância (P_{RTA} e P_{BIC}), podendo tais resultados serem atribuídos ao menor contato do P com os sítios de adsorção, diminuindo ou retardando as reações de sorção do P, aumentando assim sua disponibilidade (RHEINHEIMER et al., 2003).

As diferenças encontradas no fracionamento de P no presente estudo sugerem que, em superfície, todas as frações inorgânicas de P são incrementadas, enquanto que com o aumento da profundidade do solo, existe uma preferência na acumulação de P em formas menos lábeis, determinadas com os extratores alcalinos, como o NaOH. A fração inorgânica extraída com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, considerada moderadamente lábil, inclui P inorgânico não liberado pelos extratores antecedentes do esquema do fracionamento, sendo composta prioritariamente de fosfatos ligados aos oxi-hidróxidos de Fe e Al do solo, provavelmente formando ligações mono e bidentadas com a fração coloidal (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982; CROSS; SCHLESSINGER, 1995).

O manejo influenciou a fração moderadamente lábil de P_i no solo, entretanto somente observou-se maior disponibilidade nesta fração na camada superficial do PD no solo mais arenoso (LVA-2), sendo que nos demais solos a fração inorgânica de P moderadamente lábil foi similar ou inferior no PD, comparado ao PC. Tal resultado indica que, muito provavelmente o sistema de PD estaria favorecendo a permanência do P em formas mais lábeis, em consequência da menor sorção propiciada pelo sistema, mas também pode-se constatar que o P moderadamente lábil tem se acumulado nas camadas inferiores do PD, o que de fato ocorre quando se considera que os efeitos tamponantes da MO são menos pronunciados em maior profundidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Tiecher et al. (2012), avaliando a fração moderadamente lábil de um Latossolo vermelho sob PD e PC durante 23 anos. Os autores observaram que com o aumento da profundidade, o P_i moderadamente lábil foi maior no PC, comparado ao PD, indicando a aplicação de fertilizante fosfatado no PC resulta não somente em maior distribuição do P no perfil, mas também propicia ao nutriente maior adsorção aos óxidos de Fe e Al, tendo em vista que, em profundidade, os sítios de adsorção estão mais propensos as reações de retenção, muito em consequência da ausência ou da expressiva redução de grupos orgânicos que competiriam com a adsorção do P.

A fração de P extraída com $HCl\ 1,0\ mol\ L^{-1}$ é considerada a parte do P ligado ao Ca no solo, formando fosfatos de Ca (CROSS; SCHLESINGER, 1995), a qual pode ser proveniente dos minerais primários do solo, de fosfatos de cálcio formados “in situ”, e também da adição de fertilizantes fosfatados sem solubilização prévia. Com relação à esta fração (P_{HCl}), muito pouco do P total presente nos solos avaliados correspondeu à mesma, com valores de menos de 2% do P_{total} . De fato, os solos estudados não apresentavam qualquer resquício de compostos de minerais fosfatados ligados a cálcio em sua mineralogia. Estes resultados corroboram com Pavinato, Merlin e Rosolem (2009b) os quais, trabalhando com Latossolos de cerrado submetidos a diferentes sistemas de manejo, também não detectaram presença de quantidades significativas de P ligado a Ca. Entretanto, pequenas porém significativas diferenças foram observadas entre os manejos do solo na quantidade de P ligado a Ca. Observam-se maiores quantidades de P_{HCl} no PD, sobretudo nas camadas superficiais, podendo tal resultado ser atribuído a uma ação resultante da maior quantidade de P disponível, associado às frequentes aplicações de calcário em superfície, comuns no PD, proporcionando à formação de fosfatos de Ca “in situ”, ou seja, uma possível neoformação de

fosfatos de cálcio secundários de baixa solubilidade, resultantes da combinação de altas quantidades de P e Ca disponíveis (GATIBONI et al., 2007; TIECHER et al., 2012).

A fração inorgânica de P no solo extraída com NaOH 0,5 mol L⁻¹ é composta de formas de P similares as extraídas por NaOH 0,1 mol L⁻¹, porém as mesmas não foram estimadas pelo extrator usado anteriormente por estarem protegidas no interior de micro agregados do solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Deste modo, a utilização desta fração complementa a fração anterior, com remoção do P adicional proporcionada pela maior concentração do extrator, e é claro pelo processo de acidificação intermediário e pelo tempo adicional que a amostra fica submetida a agitação e, conseqüentemente, às reações de remoção de P do solo (CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985). Contudo, o P extraído em tal fração é usualmente tido como de forma não-lábil, devido ao mesmo encontrar-se química ou fisicamente protegido e, portanto sendo de difícil reversibilidade no solo.

No presente estudo, de modo geral verificou-se que os Latossolos do Cerrado têm tendência ao acúmulo de P em formas não-lábeis, quando submetidos a adubações frequentes. Tal característica é amplamente difundida no estudo da dinâmica do P em solos intemperizados, onde as maiores proporções do P em solos são identificadas em formas não-lábeis (NOVAIS; SMITH, 1999). As alterações proporcionadas pelo manejo o solo, entretanto, indicam que o PD mostrou valor superior de P não-lábil em superfície, comparado ao PC. Ao contrário do que se possa parecer, a maior concentração de P em superfície não indica que o PD proporcione maior adsorção que o PC, mas sim que a saturação dos sítios ativos de adsorção de P em superfície possivelmente esteja ocorrendo, contribuindo para maiores teores na fração inorgânica não-lábil de P.

5.2.2 Frações orgânicas

O fósforo orgânico extraído por NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (Po_{BIC}), corresponde a frações de P orgânico também disponíveis, sendo considerado como uma fração lábil de P no solo (GATIBONI, 2003). O Po_{BIC} foi influenciado pelos manejos do solo, com respostas distintas no perfil do solo. No LV-1 os teores embora tenham sido superiores aos encontrados no cerrado nativo, não diferiram entre o PD e PC, ou foram maiores no PC em algumas camadas,. Tais resultados discordam dos encontrados por Tiecher, Rheinheimer e Calegari (2012), onde os autores verificaram maior acúmulo de Po_{BIC} nas camadas superficiais do PD. Entretanto, os resultados observados pelos autores corroboram com os dados aqui encontrados nas demais áreas avaliadas no presente estudo, com maiores quantidades de Po_{BIC} sendo

observadas no PD em superfície e similaridade entre os manejos ou superioridade do PC nas camadas subsuperficiais (5 – 10 e 10 – 20 cm).

Possivelmente contribuem para tal resultado o maior teor P total e a maior deposição de resíduos orgânicos no solo da camada superficial do PD, comparativamente ao PC, resultando em maior transformação do P inorgânico em formas orgânicas lábeis (NaHCO_3), evidenciando a importância das reações biológicas na camada superficial do PD, comparativamente ao PC (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003). Por sua vez, os resultados de maior Po_{BIC} em subsuperfície no PC são atribuídos à maior atividade biológica das plantas e da biomassa microbiana do solo (TIECHER; RHEINHEIMER; CALEGARI, 2012), sendo que tal atividade seria a responsável pela produção de compostos orgânicos fosfatados a partir do P inorgânico (BÜNEMANN et al., 2008).

No presente estudo, a maior quantidade de Po_{BIC} em superfície no LV-1 sob PC pode ser explicada pelas características granulométricas e mineralógicas do solo, uma vez que o solo do local em questão apresenta 65% de argila e grande quantidade de óxidos de Fe e Al e, os quais são fatores condicionantes à maior agregação do solo, além de exercerem proteção física e química da matéria orgânica (BAYER et al., 2006). Portanto, é de se esperar que sob PD as frações da MO não sejam tão solúveis e não se evidenciem maiores quantidades de Po lábil. No PC os agregados não se formam, ou são menos pronunciados, em função da destruição destes pelas operações mecânicas contínuas.

A fração $\text{Po}_{\text{HID-0,1}}$ é considerada moderadamente lábil e inclui frações orgânicas não liberadas pelo NaHCO_3 quantificadas pela hidrólise parcial de compostos orgânicos que sofrem hidrólise com a ação dos ânions OH^- (DALAL, 1977). Os fosfatos monoésteres formam a maior parte do P na forma orgânica extraído pelo NaOH, pois caracterizam-se pela alta interação com os colóides do solo e baixa acessibilidade ao ataque microbiano (RHEINHEIMER; ANGHINONI; FLORES, 2002; GATIBONI, 2003).

Os incrementos observados no $\text{Po}_{\text{HID-0,1}}$ ocorreram tanto no PD quanto no PC, indicando que o aumento ocorrido nas formas orgânicas moderadamente lábeis, assim como observado por Redel et al. (2007), podem ser explicados pela grande formação de complexos de P com substâncias húmicas, considerado o principal dreno orgânico do fosfato aplicado via fertilização. Assim sendo, parte das adições via fertilizantes nos sistemas de produção estariam na verdade incrementando o P orgânico do solo, e não somente ocupando sítios de adsorção dos minerais e óxidos. Embora os teores de MO nos sistemas de preparo de solo tenham sido similares abaixo dos 5 primeiros cm do solo, encontrou-se maior teor de P

orgânico moderadamente lábil no solo subsuperficial do PC (5-10 e 10-20 cm), indicando que assim como ocorre com o P_{OBIC} , a incorporação de resíduos no PC pode acarretar em formação de compostos de P de média labilidade.

Na fração orgânica extraída com $NaOH\ 0,5\ mol\ L^{-1}$ ($P_{O_{HID-0,5}}$) houve pequena variação somente na camada superficial (0 - 5 cm), onde os valores de $P_{O_{HID-0,5}}$ foram maiores no PD em relação ao PC, em todos os solos argilosos. No solo menos argiloso (LVA-2) os teores de $P_{O_{HID-0,5}}$ foram muito baixos quando comparado aos demais locais. Tais resultados reforçam a ideia de que há acúmulo de Po no PD. O solo sob Cerrado nativo apresentou os menores valores de Po em todas as frações, sendo muito inferior aos resultados encontrados com os cultivos do solo. Isso indica que nos ecossistemas naturais sob solos altamente intemperizados, a mineralização do P orgânico é o principal processo de disponibilização de fosfato (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2002; VINCENT; TURNER; TANNER, 2010), exaurindo essa fração de P no solo através da vegetação nativa.

5.2.3 P residual e P total do solo

O fósforo residual é composto de frações orgânicas e inorgânicas consideradas altamente recalcitrantes, e que não participam ativamente da disponibilidade de P para as plantas (STEWART; SHARPLEY, 1987). Esta fração é obtida através de digestão ácida sob alta temperatura. De modo geral, o $P_{Residual}$ apresentou-se uniforme no perfil em todos os solos estudados. As diferenças encontradas para os sistemas de manejo indicam maior proporção da fração residual do P ocorrendo no LV-1 com o sistema de manejo PC, enquanto que no solo LVA-1 ocorreu o inverso, com maiores teores recalcitrantes de P no PD, em comparação ao PC e ao cerrado nativo.

Os resultados podem ser explicados pela maior recuperação do P pelas extrações do sequenciais do fracionamento de Hedley proporcionadas pelas alterações na ordem de adição dos extratores, pois é conhecida que a extração com $NaOH\ 0,5\ mol\ L^{-1}$ após a extração com HCl resulta em maior recuperação do P total pelo aumento na eficiência de extração do $NaOH\ 0,5\ mol\ L^{-1}$, com recuperação do fósforo orgânico citada na ordem de 89 a 93% do total, contra 46 a 70% no esquema original proposto no fracionamento de Hedley (GATIBONI et al., 2013). Se observadas as quantidades de Po extraídas com o $NaOH\ 0,5\ mol\ L^{-1}$, fica evidenciada tal afirmação, uma vez que a quantidade de $P_{O_{hid-0,5}}$ extraídas no LV-1 e LVA-1 seguem tendência inversa ao $P_{Residual}$ observado nestes locais. Tal constatação reforça ainda a

opção no presente estudo de nomear as frações de P_i e P_o obtidas com tal extrator como P não-lábil.

O P_{total} do solo, determinado pela soma das frações de P do fracionamento de Hedley, foi influenciado pelos manejos do solo, com respostas distintas entre os solos para a interação entre os manejos e a distribuição do P_{total} no perfil. Tanto no LV-1 e LVA-1 (solos com 20 anos ou mais de histórico de manejo), quanto no LV-2 (solo com 12 anos de manejo) no PD os maiores teores totais de P ocorrem em superfície (0 – 5 cm), enquanto que nas demais profundidades não foram observadas diferenças significativas. Já com o PC verifica-se uniformidade no P_{total} no perfil do solo. O cultivo do solo incrementa os teores de P_{total} , tanto sob PD como em PC. No LVA-2, os teores totais de P no solo foram uniformes no perfil, independentemente do sistema de manejo, o que parece é que este solo, em função do menor teor de argila e óxidos, tem menor afinidade pela adsorção de P , permitindo a acumulação em frações mais lábeis e de melhor aproveitamento pelas culturas. Quanto aos manejos, à adoção dos cultivos tanto sob PD como no PC do solo resultaram em incrementos no P_{total} do solo.

De modo geral, ocorre incremento no P total do solo em superfície com a adoção do PD. Resultados semelhantes foram observados por Tokura et al. (2002), sendo tal resultado atribuído às constantes deposições superficiais de P no sistema. Tal tendência de acúmulo manifesta-se com menor magnitude no solo arenoso, provavelmente em função da menor acumulação dos resíduos, tendo em vista que a mineralização do P em solos arenosos é muito mais acentuada que em solos argilosos.

Sob o ponto de vista da fertilidade do solo, independentemente da natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo. A separação do P em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis ajuda no entendimento da dinâmica da disponibilidade do fósforo. Estudos utilizando o fracionamento de Hedley têm mostrado que as frações orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo podem atuar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais, da adubação e do manejo do solo (GATIBONI, 2003; RHEINHEIMER; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; TIECHER; RHEINHEIMER; CALEGARI, 2012; TIECHER et al., 2012). Em sistemas naturais, como observado no presente estudo para o cerrado nativo, devido a não adição de P , a disponibilidade do nutriente está relacionada à ciclagem das formas orgânicas. Já nos solos submetidos aos sistemas de manejo, têm se observado que grande parte do P disponível é tamponado pelas frações inorgânicas lábeis, sobretudo em PD, pelo acúmulo de

tais frações, enquanto que no PC, as formas inorgânicas e orgânicas de labilidade intermediária teriam grande influência sob a disponibilidade do P.

Independente do sistema de manejo, a adição de fertilizantes fosfatados resulta em acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, embora o acúmulo das formas inorgânicas seja mais pronunciado. Salienta-se que as diferenças na redistribuição das formas do P do PD para o PC são mais pronunciadas quanto à formação de uma camada na superfície do solo com altas quantidades de todas as frações inorgânicas e orgânicas de P, sobretudo lábeis e moderadamente lábeis (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001, 2003), sendo tal comportamento consequente da adição consecutiva de fertilizantes na camada superficial, ausência de revolvimento e diminuição das taxas de erosão.

6 CONCLUSÕES

A MO do solo é influenciada diretamente pelo sistema de manejo, com aumento expressivo na camada superficial (0-5 cm) do solo, quando este é manejado sob PD. O teor de MO é maior em solos de cerrado cultivados por longo tempo, sobretudo com o PD.

O pH, a acidez potencial, representada pelo $H + Al$, e ainda os teores trocáveis de K, Ca e Mg, bem como a saturação por bases nas camadas mais superficiais do solo, são maiores com a adoção do PD, comparado ao PC, sobretudo em função da aplicação superficial de corretivos, fertilizantes e deposição de resíduos vegetais no solo. Já no PC se observa uma distribuição uniforme de cátions no perfil, com menor acidez em subsuperfície, proporcionada pelo constante revolvimento.

A fertilidade no cerrado é de fato caracterizada pela alta dependência de corretivos agrícolas e fertilizantes, devido à elevada acidez e baixíssimos teores de nutrientes disponíveis constatados em tal vegetação, na sua condição nativa.

A adoção do PD resulta em acúmulo de frações orgânicas de P na camada superficial do solo e incrementa todas as frações inorgânicas de P, com maiores diferenças quando comparado com o PC nos 10 primeiros cm do solo. O PC promove acúmulo de frações orgânicas de menor labilidade em subsuperfície nos solos argilosos. Em solo arenoso, a proporção das frações orgânicas de P é muito inferior à observada nos solos argilosos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.A.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLTAN JUNIOR, W.A. Propriedades químicas de um Cambissolo húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 437-445, 2005.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 115-123, 2004.
- BALOTA, E.L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; DICK, R.P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agroecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 35, p. 300-306, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 105-112, 1997.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIEKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian cerrado soil under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006.
- BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1269-1276, 2007.
- BÜNEMANN, E.K.; SMERNIK, R.J.; MARSCHNER, P.; MCNEILL, A.M. Microbial synthesis of organic and condensed forms of phosphorus in acid and calcareous soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, p. 932-946, 2008.
- CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W.L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S. de; GUIMARÃES, M.F.; RHEINHEIMER, D.S. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 32-39, 2013.
- CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.D.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CHAPUIS-LARDY, L.; BROSSARD, M.; HERVÉ, Q. Assessing organic phosphorus status of cerrado Oxisols (Brazil) using ^{31}P -NMR spectroscopy and phosphomonoesterase activity measurement. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 81, p. 591-601, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**: Brasil – por unidades de Federação. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 30 set. 2013.

CONDRON, L.M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, Heidelberg, v. 11, p. 830-840, 2011.

CONDRON, L.M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Oxford: CABI, 2005. p. 295–307.

CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ^{31}P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 36, p. 199-207, 1985.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicações de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 925–930, 2002.

COSTA, M.J.; ROSA JUNIOR, E.J.; ROSA, Y.B.C.J.; SOUZA, L.C.F.; ROSA, C.B.J. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

CORREIA, J.R.; REATTO, A.; SPERA, S.T. Solos e suas relações com o uso e o manejo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 29-62.

CRASWELL, E.T.; LEFROY, R.D.B. The role and function of organic matter in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, n. 1/2, p. 7-18, 2001.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, p. 83-117, 1977.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **Internacional Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v. 3, p. 1-25, 2010.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-85, 1977.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

_____. **Plataforma plantio direto**: histórico do plantio direto. Disponível em: <[http://www.embrapa.br/plantio direto](http://www.embrapa.br/plantio_direto)>. Acesso em: 29. out. 2013.

ERNANI, P.R.; RIBEIRO, M.F.S.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 889-901, 2004.

ESSINGTON, M.E. **Soil and water chemistry**: an integrative approach. Boca Raton, CRC Press, 2004. 534 p.

FAGERIA, N.K. Optimum soil acidity indices for dry bean plant production on an Oxisol in no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, p. 845-857, 2008.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Evolução do plantio direto no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html>>. Acesso em: 29 out. 2013.

FLORES, J.P.C.; CASSOL, L.C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F. Atributos químicos do solo em função da aplicação superficial de calcário em sistema integração lavoura-pecuária submetidos a pressões de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2385-2396, 2008.

FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2267-2276, 1999.

FRAZÃO, L.A.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 641-648, 2008.

FREIRIA, A.C.; MONTOVANI, J.R.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, C.P.; YAGI, R. Alterações em atributos químico do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 285-291, 2008.

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; LOSS, A.; CUNHA, T.J.F.; SALTON, J.C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 847-853, 2006.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, 2013.v. 8, p. 141-187.

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

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, 2002.

GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; RUBAEK, G.; ZECH, W. Land-use and fertilization effects on P forms in two European soils: Resin extraction and ³¹P NMR. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 47, p. 231-239, 1996.

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

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

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 145-154, 1999.

HOUX III, J.H.; WIEBOLD, W.J.; FRITSCHI, F.B. Long-term tillage and crop rotation determine the mineral nutrient distributions of some elements in a Vertic Epiaqualf. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 112, n. 1, p. 27-35, 2011.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, p. 463-471, 1991.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade da goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 set. 2013.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Evergreen, v. 30, n. 6, p. 401-408, 1982.

LAL, R. Soil carbon dynamic in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 116, p. 353-362, 2002.

LINDSAY, W.L.; VLEK, P.L.G.; CHIEN, S.H. Phosphate minerals. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: SSSA, 1989. p. 1089-1130. (SSSA Book Series, nº 8).

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 115p.

MAGID, J. Vegetation effects on phosphorus fractions in set-aside soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 149, p. 111-119, 1993.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 638 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTHA JUNIOR, G.B.; VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. (Ed.). **Cerrado**: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 224 p.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MATIAS, M.C.B.; SALVIANO, A.A.C.; LEITE, L.F.C.; GALVÃO, S.R.S. Propriedades químicas em Latossolo Amarelo de Cerrado do Piauí sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, p. 356-362, 2009.

MATOS, E.S.; MENDONÇA, E.S.; VILLANI, E.M.A.; LEITE, L.F.C.; GALVÃO, J.C.C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 625-632, 2006.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 95-102, 1983.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 172, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN E.K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Oxford: CABI, 2005. p. 243-268.

OLIBONE, D. **Variabilidade vertical de formas de fósforo em função de fontes e doses de fosfatos em semeadura direta**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-46, 1978.

PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; HUNT, H.W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 48, p. 147-163, 2000.

PAVINATO, A. **Carbono e nutrientes no solo e a sustentabilidade do sistema soja-algodão no cerrado brasileiro**. 2009. 117 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAVINATO, P.S. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduo em superfície**. 2007. 145 p. Tese (Doutorado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1031-1040, 2009a.

_____. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009b.

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

REDEL Y.D.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 39, p. 388-396, 2007.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.

RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica de fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 151-160, 2001.

_____. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2339-2354, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; FLORES, A.F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 11/12, p. 1853-1871, 2002.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção de fósforo inorgânico de diferentes frações provocadas pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 345-354, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G.C.; SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 713-721, 1998.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 1053-1059, 2003.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 355-362, 2003.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W. A.; PICCOLO, M.C; FEIGL, B.E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 56-64, 2009.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software version 9.2**. Cary, 2008.

SATURNINO, H.M.; LANDERS, J.N. **O meio ambiente e o plantio direto**. Brasília: EMBRAPA, SPI, 1997. 116 p.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 249-254, 1985.

SIQUEIRA NETO, M. **Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes usos no cerrado em Rio Verde**. 2006. 159 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distroférico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 133-139, 2003.

SPERA, S.T.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; CORREIA, J.R.; CUNHA, T.J.F. **Solos arenos-quartzosos no Cerrado: problemas, características e limitação ao uso**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 1999. 48 p.

STEWART, J.W.B.; SHARPLEY, A.N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: FOLLETT, R.F.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V.; POWER, J.F. (Ed.). **Soil Fertility and organic matter as critical components of production systems**. Madison: SSSA, 1987. p. 101-121.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 271–281, 2012.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 271–281, 2012.

TIESSSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1467-1476, 2002.

VINCENT, A.G.; TURNER, B.L.; TANNER, E.V.J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 61, p. 48-57, 2010.

XAVIER, F.A.; ALMEIDA, E.F.; IRENE, M.C.; MENDONÇA, E.S. Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 31-34, 2010.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 190-203, 2008.

ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 131-138, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Fracionamento de fósforo do solo

(Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condron, Goh e Newman (1985))

SOLUÇÕES EXTRATORAS:

- a) **Resina:** 1 lâmina de RTA (1,0 x 2,0 cm) carregada conforme apêndice B;
- b) **NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹:** Pesar 42,00 g de NaHCO₃ em Becker de 1 L e dissolver com 900 ml de H₂O destilada. Ajustar o pH a 8,5 (NaOH ou HCl) e completar o volume em balão (1 L). Preparar imediatamente antes do uso.
- c) **NaOH 0,1 mol L⁻¹:** Pesar 4,00 g de NaOH em Becker de 1 L e dissolver com 900 ml de H₂O destilada. Completar o volume em balão (1 L).
- d) **HCl 1 mol L⁻¹:** Adicionar 84 ml de HCl concentrado em Becker de 1 L contendo 700 ml de H₂O destilada. Completar o volume em balão (1 L).
- e) **NaOH 0,5 mol L⁻¹:** Pesar 20,00 g de NaOH em Becker de 1 L e dissolver com 900 ml de H₂O destilada. Completar o volume em balão (1 L).

SOLUÇÃO PARA LIMPEZA ENTRE EXTRAÇÕES:

- f) **NaCl 0,5 mol L⁻¹:** Pesar 29,25 g de NaCl em Becker de 1 L e dissolver com 900 ml de H₂O destilada. Completar o volume em balão (1 L).

PROCEDIMENTO:

- 1) pesar 0,5 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- 2) adicionar 10 ml de H₂O destilada;
- 3) adicionar 1 lâmina de RTA carregada segundo Apêndice B;**
- 4) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);
- 5) Preparar recipiente com tampa, adicionando a ele 15 ml de HCl 0,5 mol L⁻¹;
- 6) retirar a RTA do tubo (após as 16 horas de agitação) com auxílio de pinça;
- 7) lavar o excesso de solo da RTA com H₂O (pisceta);
- 8) colocar a RTA no recipiente preparado (passo 5);
- 9) deixar RTA em repouso no HCl por 90 min (com a tampa aberta);
- 10) Tampar e agitar por 30 min em agitador horizontal (180 rpm, garantindo movimentação constante da RTA);
- 11) retirar RTA com auxílio de pinça e separá-la para recuperação (**Apêndice B**);
- 12) determinar Pi no extrato de HCl 0,5 mol L⁻¹ (**Apêndice C**);
- 13) centrifugar o tubo (solo + água) à 4000-6000 rpm por 20-15 min e descartar o sobrenadante;

14) adicionar 10 ml de NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹;

15) agitar manualmente até soltar o solo do fundo do tubo;

16) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);

17) centrifugar a 4000-6000 rpm por 20-15 min;

18) reservar o sobrenadante para análise de Pi (**Apêndice D**) e Pt (**Apêndice E**);

19) adicionar 10 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ para lavagem (evitar mexer o solo);

20) centrifugar à 4000-6000 rpm por 10-5 min e adicionar o sobrenadante ao extrato;

21) adicionar 10 ml de NaOH 0,1 mol L⁻¹;

22) agitar manualmente até soltar o solo do fundo do tubo;

23) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);

24) centrifugar a 4000-6000 rpm por 20-15 min;

25) reservar o sobrenadante para análise de Pi (**Apêndice D**) e Pt (**Apêndice E**);

26) adicionar 10 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ para lavagem (evitar mexer o solo);

27) centrifugar à 4000-6000 rpm por 10-5 min e adicionar o sobrenadante ao extrato;

28) adicionar 10 ml de HCl 1,0 mol L⁻¹;

29) agitar manualmente até soltar o solo do fundo do tubo;

30) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);

31) centrifugar a 4000-6000 rpm por 20-15 min;

32) reservar o sobrenadante para análise de Pi (**Apêndice D**) e Pt (**Apêndice E**);

33) adicionar 10 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ para lavagem (evitar mexer o solo);

34) centrifugar à 4000-6000 rpm por 10-5 min e adicionar o sobrenadante ao extrato;

35) adicionar 10 ml de NaOH 0,5 mol L⁻¹;

36) agitar manualmente até soltar o solo do fundo do tubo;

37) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);

38) centrifugar a 4000-6000 rpm por 20-15 min;

39) reservar o sobrenadante para análise de Pi (**Apêndice D**) e Pt (**Apêndice E**);

40) adicionar 10 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ para lavagem (evitar mexer o solo);

41) centrifugar à 4000-6000 rpm por 10-5 min e adicionar o sobrenadante ao extrato;

42) secar o solo em estufa a 50° C (aprox. 48 h) e digerir conforme Apêndice F.

APENDICE B - Saturação e recuperação de resinas trocadoras de ânions

(adaptado de GATIBONI, 2003)

1) PREPARO DA RTA (acondicionadas em recipiente próprio, possibilitando isolamento das lâminas em células individuais, conforme Figura 1)

- a) Lavagem com HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (volume suficiente para cobrir recipiente):
- contato com HCl mol L^{-1} por 10 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
 - contato com HCl mol L^{-1} por 30 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
 - contato com HCl mol L^{-1} por 30 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
- b) Lavagem com H_2O destilada (volume suficiente para cobrir recipiente):
- lavar com H_2O destilada em abundância e descartar o líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 150 rpm), descartar líquido;
- c) Saturação com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (volume suficiente para cobrir recipiente):
- contato com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ por 10 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;
 - contato com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ por 30 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;
 - contato com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ por 120 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;
- d) Lavagem do excesso de NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ com H_2O destilada (volume suficiente para cobrir recipiente):
- lavar com H_2O dest. em abundância, descartar o líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;
 - contato com H_2O dest. por 30 min (agitação constante a 100 rpm), descartar líquido;

2) EXTRAÇÃO DO FÓSFORO DO SOLO

- Passos "a" a "k" do fracionamento de P do solo (**Apêndice A**).

3) RECUPERAÇÃO DA RTA

- submeter a RTA aos passos 1a e 1b do preparo da RTA;
- estocar a RTA em água destilada;

Obs: a) a RTA pode ser recuperada em dia anterior

b) o NaHCO_3 deve ser preparado na hora do uso e o pH regulado a 8,5 (NaOH ou HCl).

Figura 1 – Caixa “box” para acondicionamento de RTA durante o processo de saturação. A) Box imersa em recipiente com solução para carga de RTA (em destaque). B) Vista lateral mostrando furos para livre caminhamento de solução. C) Vista inferior mostrando fundo vazado, permitindo passagem e escoamento de solução

APÊNDICE C - Determinação de fósforo em extratos ácidos do solo
(MURPHY; RILEY, 1962)

SOLUÇÕES:

Solução A:

Dissolver 15,35 g de $(\text{NH}_4)\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ com 200 ml de H_2O dest. em Becker de 500 ml.
Dissolver 0,3511 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{O}_6 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ com 100 ml de H_2O destilada em Becker de 200 ml.
Colocar 300 ml de H_2O destilada em Becker de 1 L (condicioná-lo em recipiente com gelo) e adicionar lentamente 178 ml de H_2SO_4 concentrado. Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1 L, adicionar as soluções de molibdato de amônio e antimoniato de potássio e ajustar o volume com H_2O destilada.

Solução B:

Dissolver 1,356 g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (ácido ascórbico) com 100 ml de solução A em balão volumétrico.
Esta solução deve ser preparada no momento do uso.

NaOH 10 mol L⁻¹:

Dissolver 400 g de NaOH em 600 ml de H_2O destilada em Becker plástico de 1 L (acondicionar em gelo). Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1 L e ajustar o volume com H_2O destilada. Armazenar em frasco plástico.

p-nitrofenol 0,25%:

Pesar 0,25 g de p-nitrofenol e dissolver em 100 ml de H_2O destilada em balão volumétrico.
Armazenar em geladeira em frasco escuro.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Preparar extrato em copo de café (alíquota extrato + diluição com H_2O = 3 mL);
- b) adicionar uma gota de p-nitrofenol 0,25%;
- c) neutralizar a solução com NaOH 10 mol L⁻¹;
- d) adicionar 0,5 ml de solução B;
- e) ler a absorbância em 882 nm após 30 minutos.

APÊNDICE D - Determinação de fósforo inorgânico em extratos alcalinos do solo
(DICK; TABATABAI, 1977)

SOLUÇÕES:

Solução A:

Dissolver 8,80 g de $C_6H_8O_6$ (ácido ascórbico) e 41,00 g de ácido tricloroacético (armazenado em geladeira) com 400 ml de H_2O destilada em Becker de 500 ml. Transferir para balão volumétrico de 500 ml e ajustar o volume com H_2O destilada. Preparar no momento do uso.

Solução B:

Dissolver 6,20 g de $(NH_4)Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ com 400 ml de H_2O destilada em Becker de 500 ml. Transferir para balão volumétrico de 500 ml e ajustar o volume com H_2O destilada.

Solução C:

Dissolver 29,40 g de citrato de sódio e 26,00 g de arsenito de sódio com 800 ml de H_2O destilada em Becker de 1000 ml. Adicionar 50 ml de ácido acético glacial (99%). Transferir para balão volumétrico de 1000 ml e ajustar o volume com H_2O destilada.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Preparar extrato em copo de café (alíquota extrato + diluição com H_2O = 4 mL);
- b) adicionar 5 ml de Solução A;
- c) adicionar $\pm$ 5 segundos após 1 ml de Solução B;
- d) adicionar imediatamente após 2,5 ml de Solução C;
- e) completar o volume até 12,5 ml;
- f) ler a absorvância no fotocolorímetro em 700 nm após 15 minutos.

Obs: preparar padrões obedecendo mesmo procedimento adotado para as amostras (fundamental obedecer o tempo e a sequência de adição das soluções).

APENDICE E - Digestão dos extratos alcalinos do solo (extraídos com NaOH e NaHCO₃) para análise do fósforo total
(USEPA, 1971)

SOLUÇÕES:

H₂SO₄ 50%:

Adicionar, vagarosamente, 500 ml de H₂SO₄ conc. em 500 ml de H₂O destilada. Esperar esfriar, transferir para balão volumétrico de 1 L e completar o volume com H₂O destilada.

Persulfato de amônio 7,5% (m/v):

Dissolver 75 g de persulfato de amônio (Merck) em 800 ml de H₂O destilada. Transferir para balão volumétrico de 1 L e completar o volume com H₂O destilada.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pipetar uma alíquota do extrato alcalino para solo em tubo de digestão;
- b) adicionar 10 ml de persulfato de amônio 7,5%;
- c) adicionar 1 ml de H₂SO₄ 50%;
- d) cobrir o tubo com papel alumínio;
- e) colocar os tubos em recipiente maior e cobri-lo com papel alumínio;
- f) autoclavar à 121°C e 103 kPa por 2 horas;
- g) deixar esfriar e completar o volume à 15 ml.
- h) Determinar fósforo conforme **Apêndice C**.

APÊNDICE F - Digestão do resíduo do solo para análise do fósforo residual do fracionamento

(adaptado de BROOKES; POWLSON, 1982)

SOLUÇÕES:

Solução MgCl_2 saturado (Merck): adicionar MgCl_2 em H_2O destilada até a saturação da solução.

H_2SO_4 concentrado.

H_2O_2 concentrado.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) pesar 0,10 g de solo em tubo de digestão;
- b) adicionar 1 ml de MgCl_2 saturado;
- c) adicionar 1 ml de H_2SO_4 conc.;
- d) colocar funil de refluxo no tubo de digestão;
- e) aquecer por 1 hora no bloco digestor a 200°C ;
- f) deixar esfriar e adicionar 2 ml de H_2O_2 conc.;
- g) aquecer por 1 hora no bloco digestor a 100°C (Repetir passos “f” e “g”, caso a amostra não tenha clarificado);
- g) deixar esfriar e completar o volume a 25 ml.
- h) Determinar fósforo conforme **Apêndice C**.

APÊNDICE G – Digestão do solo para quantificação do fósforo total

(modificado de OLSEN; SOMMERS, 1982)

SOLUÇÕES:

Solução MgCl_2 saturado (Merck): adicionar MgCl_2 em H_2O destilada até a saturação da solução.

H_2SO_4 concentrado.

H_2O_2 concentrado.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) pesar 0,05 g de solo para tubo de digestão;
- b) adicionar 1 ml de MgCl_2 saturado;
- c) adicionar 4 ml de H_2SO_4 conc.;
- d) aquecer por 1,5 horas no bloco digestor à 200°C ;
- e) deixar esfriar e adicionar 3 ml de H_2O_2 conc.;
- f) aquecer por 1 hora no bloco digestor a 100°C (Repetir passos “e” e “f”, caso a amostra não tenha clarificado);
- g) deixar esfriar e transferir para balão de 100 ml e completar o volume;
- h) Determinar fósforo conforme **Apêndice C**.