

# FÓSFORO NUM CAMBISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR POR LONGO TEMPO. I - FRACIONAMENTO SEQUENCIAL<sup>(1)</sup>

Jader Galba Busato<sup>(2)</sup>, Luciano Pasqualoto Canellas<sup>(3)</sup> & Ary Carlos Xavier Velloso<sup>(3)</sup>

## RESUMO

A caracterização dos diversos compartimentos de P, além de avaliar frações não monitoradas regularmente pelos métodos de diagnose da fertilidade do solo, pode favorecer o entendimento do ciclo desse nutriente. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nos compartimentos de P de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico, cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. Em uma das áreas de estudo, não foi realizada a despalha da cana utilizando fogo por ocasião da colheita durante 55 anos. Em outra área, realizou-se a queima do canavial, mas, durante 35 anos, foram aplicados, via irrigação por aspersão, 120 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de vinhaça. Em duas áreas adjacentes a ambos os locais, foram coletadas amostras para efeito de comparação. As amostras foram coletadas em duas camadas (0-0,20 e 0,20-0,40 m) e analisadas por meio de um procedimento de extração sequencial de P. Foram determinados também os teores de P total, P disponível, P orgânico, P inorgânico e P nas substâncias húmicas. Os resultados deste trabalho indicam que o manejo da cana crua possibilitou maior conteúdo de P em todos os compartimentos analisados. A manutenção da palha e a adição de vinhaça alteraram a distribuição das frações de P no solo, com diminuição da participação das formas não-lábeis e conseqüente aumento das formas lábeis. Em todos os manejos observados, o teor de P no ácido húmico foi maior que no ácido fúlvico. O menor teor de P orgânico na cana crua evidenciou a participação desse componente na disponibilidade de P por meio de sua mineralização.

**Termos de indexação:** extração sequencial, P orgânico, disponibilidade.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado em Produção Vegetal do primeiro autor, apresentada à Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Recebido para publicação em maio de 2004 e aprovado em outubro de 2005.

<sup>(2)</sup> Doutorando do programa de Pós-Graduando em Produção Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Av. Alberto Lamego 2000, Parque Califórnia, CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes (RJ). E-mail: jbusato@uenf.br

<sup>(3)</sup> Professor do Laboratório de Solos, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, UENF. E-mails: canellas@uenf.br (bolsista do CNPq); velloso@uenf.br

**SUMMARY: PHOSPHORUS IN AN INCEPTSOIL UNDER LONG-TERM SUGARCANE. I - SEQUENTIAL FRACTIONATION**

*The characterization of several soil phosphorus (P) pools allowed the evaluation of P components not usually monitored in fertilizer soil tests and can help to understand this nutrient's cycle. The aim of this study was to evaluate the changes in P pools of a Fluventic Eutrochrepts fine clay which had been under long-time sugarcane plantation. In one situation the sugarcane had been cropped for 55 years with and without trash burning prior to harvesting. The other sugarcane plantation, cultivated for 35 years, with crop residues and leaves burning, had received annual stillage inputs through aspersion irrigation at rates of 120 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Soil samples were taken from the 0–0.20 and 0.20–0.40 m layers and a sequential P fractionation method was performed. Total P, available P, organic P, inorganic P and P in humic substances were also evaluated. The results of this study indicated that the management with trash preservation on the soil surface promoted higher P content in all evaluated pools. The preservation of crop residues and leaves and stillage addition modified the P pool distribution, promoting a decrease of non-labile pools and consequently an increase of labile pools. At all studied sites the P content was higher in the humic than in the fulvic acid fraction. The smallest relative participation of organic pools at the site without burning suggests the contribution of this pool to the available P through its mineralization.*

*Index terms: sequential fractionation, organic phosphorus and availability.*

**INTRODUÇÃO**

A crescente preocupação da sociedade com a sobrevivência do homem no planeta tem concretizado conceitos como desenvolvimento sustentável, no qual se procura adequar a atividade agrícola a uma ação que seja ambientalmente correta, socialmente justa e economicamente viável (Hansen, 1996).

O cultivo da cana-de-açúcar pode retirar até 15 Mg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> por meio do processo de fotossíntese, além de poder reduzir em 20 % a emissão de CO<sub>2</sub> no País pelo uso do álcool como combustível (Silva, 1996). Entretanto, o modelo de exploração da cultura canavieira no Brasil utiliza, ainda hoje, práticas que favorecem a degradação do solo e do ambiente. A despalha do canavial utilizando o fogo, realizada para facilitar atividades de corte e carregamento da produção (Oliveira et al., 1999), lança CO<sub>2</sub>, CO e cinzas para a atmosfera, favorece a atuação de processos erosivos e a infestação de ervas daninhas (Delgado, 1985; Sparovek et al., 1997). A manutenção da palha e a aplicação de resíduos da indústria sulcroalcooleira (i.e., vinhaça), por outro lado, podem beneficiar o solo pela ciclagem de nutrientes, reduzindo a aplicação de fertilizantes industriais (Sobrinho et al., 1987; Trivelin et al., 1997).

Diversos trabalhos relataram melhoria na fertilidade do solo com a adoção de práticas de manejo que beneficiam o acúmulo e a manutenção da matéria orgânica do solo (MOS) (Rheinheimer &

Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Canellas et al., 2003). A preservação deste componente é fundamental para manter a capacidade produtiva em ambientes tropicais, uma vez que é fonte importante de nutrientes, tais como: N, S e P às culturas (Bayer & Mielniczuk, 1999).

O P é o elemento que mais limita a produtividade da maioria das culturas nos solos fortemente intemperizados (Tiessen & Moir, 1993). Nesses solos, há o predomínio das formas inorgânicas de P ligadas à fração mineral com alta energia e formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Dessa maneira, somente uma pequena fração desse nutriente no solo estaria disponível para as plantas (Conte et al., 2003) e uma boa parte do P adicionado pelos fertilizantes deixa de ser útil ao crescimento imediato da planta (Novais & Smyth, 1999). Diante da possibilidade do esgotamento das jazidas de rochas fosfáticas será preciso redesenhar as estratégias de utilização desse recurso nas áreas de produção agrícola (Abelson, 1999). Maior ênfase deve ser dada aos processos biológicos, uma vez que a atuação, direta ou indireta, dos microrganismos no ciclo de P é bastante evidente (Siqueira & Moreira, 2001).

Diferentes manejos do solo alteram a biodisponibilidade do P, tornando necessário o entendimento de sua dinâmica associada à produção e à decomposição de resíduos orgânicos (Rheinheimer et al., 1999). Na colheita da cana sem utilização do fogo, a incorporação da palha aumenta a atividade microbiana e melhora a disponibilidade de nutrientes

às plantas. Canellas et al. (2003) observaram aumento significativo no conteúdo de P disponível em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar que não efetuou a queima do canavial antes da colheita durante longo tempo.

Considerando a formação de compostos fosfatados de baixa solubilidade, a análise isolada do P disponível pode não ser suficiente para a correta interpretação do teor de P no solo. Vários trabalhos demonstram que os maiores acréscimos desse nutriente ocorrem nas frações não monitoradas regularmente para fins de diagnose da fertilidade dos solos (Araújo et al., 1993; Tokura et al., 2002), indicando a necessidade de estudos mais aprofundados da distribuição do P em ambientes cultivados.

O método de fracionamento seqüencial proposto por Hedley et al. (1982) permite a separação do P do solo em formas lábeis, pouco lábeis e não-lábeis. Este procedimento tem sido utilizado para avaliar mudanças nas formas de P e suas principais formas de acúmulo no solo de acordo com os diferentes manejos (Pavan & Chaves, 1996; Araújo & Salcedo, 1997; Rheinheimer et al., 2003). O fracionamento seqüencial também pode oferecer um índice da importância relativa dos processos biológicos e geoquímicos das diferentes frações de P no seu ciclo, em solos com vários estádios de desenvolvimento (Cross & Schlesinger, 1995). Os processos geoquímicos estariam relacionados com as frações inorgânicas e teriam maior participação nos pouco intemperizados. Com o avanço do intemperismo, os processos biológicos teriam maior participação, regulando a disponibilidade de P nos solos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio do fracionamento seqüencial, as alterações nos compartimentos de P de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico, cultivado com cana-de-açúcar e submetido a diferentes manejos da lavoura.

## MATERIAL E MÉTODOS

Em duas áreas cultivadas durante longo tempo com cana-de-açúcar, foram coletadas, em 2001, amostras de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico, localizado no Município de Campos dos Goytacazes, norte do Estado do Rio de Janeiro. Na primeira área, desde 1946, não se realizou a prática da queima da cana por ocasião da colheita, proporcionando adição de material vegetal no solo durante 55 anos. Na segunda área, distante cerca de 40 km da primeira, foi realizada a queima do canavial mas, desde 1966, foram adicionados, durante o período seco, 120 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de vinhaça, subproduto da indústria sulcroalcooleira.

Para efeito de comparação, foram coletadas em áreas adjacentes amostras de solo cultivado com cana por longo tempo cujos manejos consistiam em: efetuar a queima em período anterior à colheita e outra sem aplicação de vinhaça. Nas áreas com e sem aplicação de vinhaça, a lavoura foi submetida à queima antes da colheita. Desta forma, no presente trabalho, foram identificados dois sistemas de manejo da lavoura em cada área: cana crua e cana queimada, na primeira área, e cana com vinhaça e cana sem vinhaça, na segunda.

A coleta do solo foi efetuada em duas camadas (0–0,20 e 0,20–0,40 m), em três amostras compostas, formadas por dez amostras simples por área de lavoura de cerca de 492 m<sup>2</sup>. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Os resultados de algumas características químicas e físicas desse solo (Quadro 1) foram previamente discutidos por Canellas et al. (2003).

Foram avaliados os seguintes compartimentos de P: P total, P disponível, P orgânico e inorgânico e P

**Quadro 1. Características químicas e físicas de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico, localizado em Campos dos Goytacazes (RJ), cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo**

Sistema de cultivo	pH H <sub>2</sub> O	Grau de humificação	Carbono	CTC efetiva	CTC (pH 7)	V	Areia	Silte	Argila
		%	g kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		%	g kg <sup>-1</sup>		
0–0,20 m									
Cana crua	6,7	67	22,34	12,8	15,0	85	350	380	270
Cana queimada	6,5	80	13,13	8,1	10,4	78	230	400	370
Cana com vinhaça	5,9	45	18,33	8,4	12,2	69	150	470	380
Cana sem vinhaça	6,0	39	15,71	7,8	10,0	71	160	520	320
0,20–0,40 m									
Cana crua	6,8	68	20,95	12,8	14,5	88	320	400	280
Cana queimada	6,6	83	11,81	7,6	10,1	75	220	410	360
Cana com vinhaça	6,3	52	12,12	7,5	10,5	72	80	490	430
Cana sem vinhaça	6,1	45	10,90	7,3	9,4	77	110	460	430

Adaptado de Canellas et al. (2003).

nas substâncias húmicas. Os valores de P total foram obtidos pelo meio de digestão do solo com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  e a concentração de P orgânico pelo método da ignição, pela diferença entre P no extrato ácido em material aquecido e não aquecido (Saunders & Willians, 1955). Para avaliar o P disponível, foram utilizados os métodos da resina de troca aniônica e Mehlich-1. Esses procedimentos foram descritos por Anderson & Ingram (1996). Em todas as frações, a determinação de P nos extratos foi feita por colorimetria, por meio da formação da cor azul do complexo fosfato-molibdato na presença de ácido ascórbico como redutor. As frações que compõem as substâncias húmicas foram obtidas pela extração com  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , na razão solo:extrator de 1:10 (v/v), conforme recomendado pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS). Os ácidos húmicos foram separados por precipitação por meio da acidificação do extrato alcalino até pH 1,0–1,5, utilizando-se  $\text{HCl}$   $6 \text{ mol L}^{-1}$ . As leituras das absorvâncias foram realizadas em 880 nm de comprimento de onda (Anderson & Ingram, 1996).

No fracionamento do P total, amostras de 0,5 g de solo foram submetidas a diferentes extratores, num esquema seqüencial adaptado de Hedley et al. (1982) (Figura 1). Este método baseia-se na extração em seqüência de formas mais lábeis, seguido das mais estáveis (Pavan & Chaves, 1996). As formas mais lábeis de P foram obtidas pelo método da resina de troca aniônica saturada com  $\text{NaCl}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e pela extração com  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (P adsorvido na superfície dos colóides). O P microbiano foi obtido pela diferença entre o teor em amostra de solo fumigado e não fumigado com  $\text{CHCl}_3$ . Formas de P com disponibilidade moderada foram extraídas com

$\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . O P localizado na superfície interna dos agregados foi obtido a partir da sonificação, durante 5 min e 75 W, do extrato residual de  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . As formas não-disponíveis às plantas em curto espaço de tempo, principalmente associadas ao Ca, foram extraídas com  $\text{HCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  e o P residual foi obtido por meio da digestão em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Inicialmente, para obtenção do P disponível, 0,5 g de solo e 0,5 g de resina de troca aniônica acondicionados em bolsas de nylon foram colocados em tubos de centrífuga que continham 50 mL de água e agitados durante 16 h. O P retido na resina foi deslocado com 50 mL de  $\text{NaCl}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . O solo foi então recuperado por centrifugação e, na mesma amostra, procedeu-se à extração, utilizando-se 30 mL de  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (P- $\text{NaHCO}_3$ ). Após essa etapa, o P associado a Fe e Al e às substâncias húmicas (P- $\text{NaOH}$ ) foi extraído, utilizando-se 30 mL de  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Novamente, agitou-se o material com  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , efetuando-se sonificação para extração do P retido na superfície interna dos agregados (P- $\text{NaOH}$  sonificado). Procedeu-se, então, à extração com 30 mL de  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  (P- $\text{HCl}$ ) para obtenção das formas de P ligadas ao Ca. Por fim, a digestão do material resultante com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  possibilitou a obtenção do P residual. A determinação do P nos extratos foi realizada da mesma forma anteriormente mencionada. Para avaliar o efeito dos manejos sobre o estoque total de P no solo, utilizou-se a equação:

$$\text{Estoque de P (Mg ha}^{-1}\text{)} = [\text{Ptotal (g kg}^{-1}\text{)} \times \text{profundidade (m)} \times \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{)}] \times 10$$

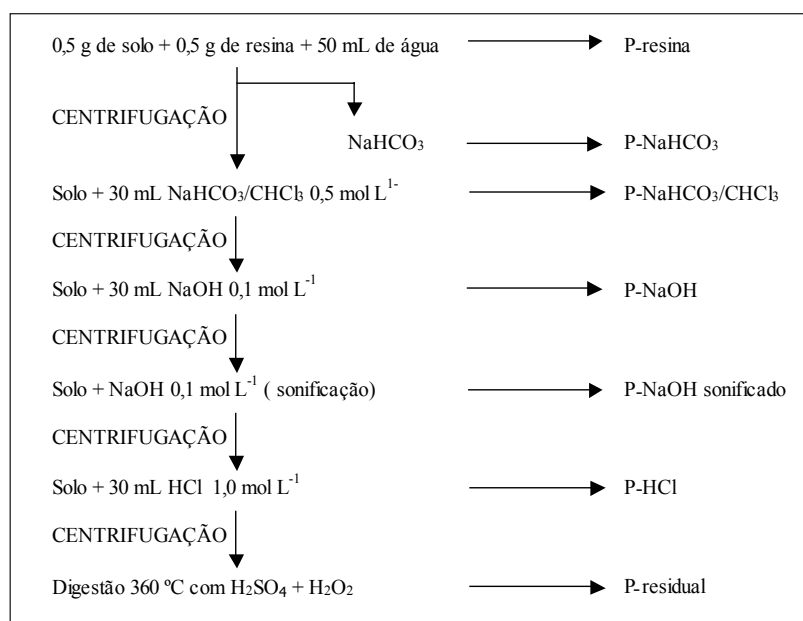


Figura 1. Esquema adaptado do procedimento de extração seqüencial (Hedley et al., 1982).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

## Compartimentos de P

O sistema de manejo da lavoura da cana-de-açúcar com a preservação do palhico durante 55 anos proporcionou maior concentração de P em todos os compartimentos de P analisados (Quadro 2). Isso pode indicar que a preservação da palha contribuiu para a melhoria da fertilidade do solo, fato previamente demonstrado em outros trabalhos (Orlando Filho et al., 1998; Canellas et al., 2003). Foram observadas, pelo método Mehlich-1, diferenças no compartimento P disponível na ordem de 541 e 694 mg kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente, nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, entre os manejos da cana crua e da cana queimada, e de 230 mg kg<sup>-1</sup> solo e 181 mg kg<sup>-1</sup> solo, quando se utilizou a resina como extrator. O não-revolvimento do solo, em virtude do aproveitamento da cana soca, pode ter contribuído para o aumento do P disponível, uma vez que há uma relação inversa entre o volume de solo em contato com o P e a sua disponibilidade às plantas (Novais & Smith, 1999). O maior aporte de material orgânico, bem como sua conseqüente mineralização, pode ter diminuído a capacidade de adsorção de P e a energia de ligação do fosfato aos grupos funcionais dos colóides inorgânicos do solo (Rheinheimer et al., 2003).

Na área com aplicação de vinhaça, na camada de 0–0,20 m, foram observadas diferenças na ordem de 210 e 267 % no compartimento P-disponível, avaliados pela resina e Mehlich-1, respectivamente (Quadro 2). Análises do teor de P na vinhaça da região de Campos dos Goytacazes (RJ) apresentaram valores de 19 mg kg<sup>-1</sup> (Sobrinho et al., 1987). Na

camada subsuperficial, entretanto, o P-disponível não foi alterado, fato que seria esperado dada a percolação do resíduo no perfil do solo.

Os valores mais altos no compartimento P total foram observados nos manejos com maior aporte de matéria orgânica, nas duas camadas estudadas. A concentração total de P na camada de 0–0,20 m do solo onde se preservou a palha foi 277 % maior do que na área com queima em pré colheita. A diferença na concentração de P obtida entre esses dois manejos foi da ordem de 1.687 mg kg<sup>-1</sup> solo. Em subsuperfície, o teor de P na área de cana crua foi 252 % superior ao da área de cana queimada, o que ocasionou uma diferença de 1.563 mg kg<sup>-1</sup> de P no solo. Conte et al. (2003), avaliando a camada de 0–0,10 m de um Latossolo manejado sob plantio direto e que sofreu adição de fertilizantes fosfatados, quantificaram 336 mg kg<sup>-1</sup> de acréscimo no teor de P total na maior dose de fosfato aplicada, demonstrando que o acúmulo do material vegetal na área de produção, durante longo tempo, pode favorecer o retorno de P ao solo. No manejo com aplicação de vinhaça, observou-se um aumento de 48 % (320 mg kg<sup>-1</sup>) no teor total de P, na camada de 0–0,20 m.

O teor de P na forma inorgânica foi superior ao do P na forma orgânica no Cambissolo, independentemente do manejo adotado na lavoura de cana (Quadro 2). Na cana colhida sem a queima, a participação do P inorgânico (Figura 2) representou 84 % do teor total de P, na camada de 0–0,20 m, e de 81 %, na camada de 0,20–0,40 m. O teor de P inorgânico nesse manejo foi 335 % superior (1.476 mg kg<sup>-1</sup>) ao observado na área onde a cana foi colhida com queima, na camada superficial. Em subsuperfície, essa diferença foi de 1.348 mg kg<sup>-1</sup>

Quadro 2. Fósforo nos diferentes compartimentos de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico da região Norte Fluminense submetido ao cultivo de cana-de-açúcar por longo tempo

Sistema de cultivo	Relação C/Po	P-estoque	P-total	P-orgânico	P-inorgânico	P-resina	P-Mehlich-1	P-NaOH		
								Ácido húmico	Ácido fúlvico	
		Mg ha <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>						mg kg <sup>-1</sup>	
			0–0,20 m							
Cana crua	59	6,11	2.297 ± 101	380 ± 03	1.917 ± 97	237 ± 11	547 ± 21	657 ± 35	90 ± 03	
Cana queimada	78	1,68	610 ± 46	169 ± 10	441 ± 56	7 ± 01	6 ± 02	223 ± 15	73 ± 02	
Cana com vinhaça	88	2,79	983 ± 55	209 ± 04	774 ± 52	31 ± 05	22 ± 08	233 ± 22	64 ± 11	
Cana sem vinhaça	74	1,95	663 ± 65	212 ± 06	451 ± 58	10 ± 03	6 ± 01	188 ± 14	56 ± 01	
			0,20–0,40 m							
Cana crua	52	5,89	2183 ± 92	404 ± 01	1779 ± 93	186 ± 12	697 ± 32	615 ± 16	91 ± 01	
Cana queimada	62	1,96	620 ± 05	189 ± 15	431 ± 20	5 ± 01	3 ± 01	233 ± 05	30 ± 01	
Cana com vinhaça	57	1,81	647 ± 23	212 ± 09	435 ± 10	6 ± 01	6 ± 0,1	227 ± 09	23 ± 03	
Cana sem vinhaça	61	1,72	577 ± 18	179 ± 21	398 ± 24	7 ± 02	3 ± 0,1	107 ± 06	36 ± 02	

Os valores representam a média de três repetições ± desvio-padrão.

(313 %). O maior teor de P inorgânico se deve, provavelmente, à mineralização dos resíduos de cultivo ou da matéria orgânica humificada do solo, favorecendo principalmente o compartimento disponível.

Acréscimos significativos na participação do P inorgânico em manejos que preservam a MOS também foram observados por diferentes autores (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002). A aplicação de fertilizantes solúveis e a fixação de P promovem aumento do P inorgânico em área de cultivo de cana-de-açúcar comparada à área sob vegetação nativa (Araújo et al., 1993). No manejo com aplicação de vinhaça, observou-se um aumento de  $323 \text{ mg kg}^{-1}$  no teor de P inorgânico na camada de 0–0,20 m.

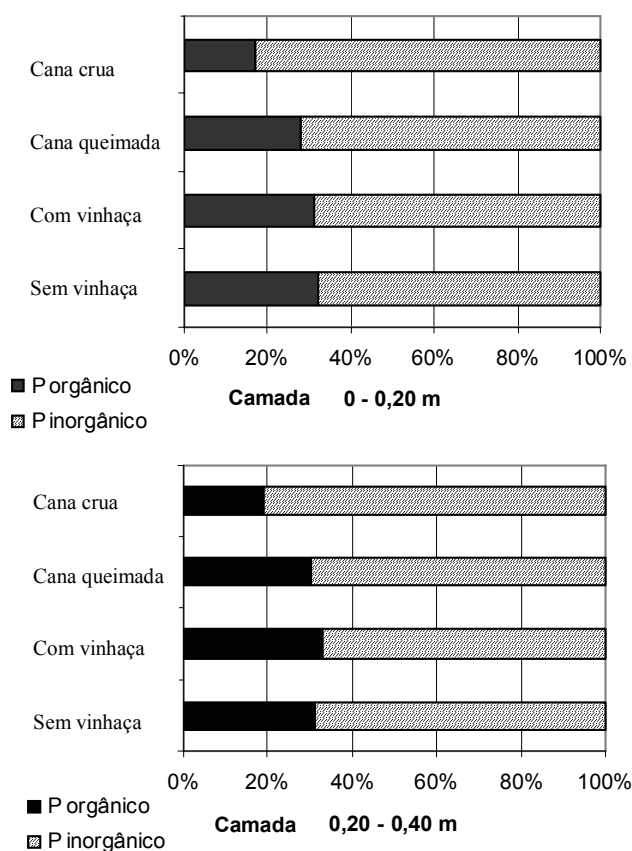
A quantificação do P orgânico auxilia o entendimento dos processos de mineralização-imobilização de P em solos sob diferentes sistemas de cultivo (Kuo, 1996). A contribuição deste componente para o teor total de P é muito variável, dependendo de fatores, tais como: cobertura vegetal,

condições climáticas e grau de evolução pedogenética (Walker & Adams, 1959; Turrión et al., 2001). A participação média do P orgânico em relação ao P total foi de 25 %, em superfície, e de 28 %, em subsuperfície, semelhante ao observado por Guerra et al. (1996), que encontraram contribuição média de 27 % em amostras de 17 solos. O P orgânico variou na faixa de  $169$  a  $404 \text{ mg kg}^{-1}$  nos diferentes manejos e camadas. Manhães (1996) obteve o teor de  $132 \text{ mg kg}^{-1}$  no compartimento P orgânico total em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

No mesmo trabalho, o autor verificou que outra classe de solo (Podzólico Amarelo) apresentou um teor de P na ordem de  $8,5 \text{ mg kg}^{-1}$  no mesmo compartimento. Na camada de 0–0,20 m, o teor de P orgânico foi de  $380 \text{ mg kg}^{-1}$ , na área onde se preservou a palha, e de  $169 \text{ mg kg}^{-1}$ , na área com cana queimada. A diferença entre os dois manejos no teor de P orgânico na camada de 0,20–0,40 m foi de  $215 \text{ mg kg}^{-1}$ . O manejo da cana crua foi responsável pela menor participação desse compartimento no P total. A menor diferença no P orgânico em relação ao inorgânico nesse manejo mostra maior participação do P orgânico em formas lábeis, que rapidamente são mineralizadas e aproveitadas pelas plantas ou convertidas em formas mais estáveis. A mineralização do P orgânico nos solos depende da relação C:P orgânico (Tisdale & Nelson, 1975). A imobilização líquida de P no solo só ocorre com relação C:P muito elevada, acima de 300, ou em resíduos que contenham menos de  $2 \text{ g kg}^{-1}$  de P na matéria seca (Siqueira & Moreira, 2001). O maior valor observado da relação C:P orgânico foi de 88, indicando que a direção do processo de transformação do P atua no sentido da mineralização, não resultando em imobilização líquida de P no solo. Isso pode explicar o aumento considerável no P disponível dos manejos que preservam a palha.

O teor de P nos ácidos húmicos foi maior que nos ácidos fúlvicos em todos os manejos observados (Quadro 2). No manejo da cana crua, o ácido húmico representou 88 e 87 % do P extraído com NaOH, nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m. No manejo da cana queimada, em 0–0,20 m, a participação do ácido húmico foi de 75 % no P do extrato alcalino. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Makarov et al. (1997), que obtiveram participações de 73 a 90 % do ácido húmico em extrato alcalino de solos alpinos. Os resultados evidenciam que os ácidos húmicos estão enriquecidos em P em comparação com os ácidos fúlvicos (Makarov et al., 1997).

Esses autores verificaram que o fosfato monoéster foi a espécie de P dominante nos ácidos húmicos e que, graças à sua maior resistência à mineralização, está sendo acumulado nesse compartimento. Nos manejos cana queimada e cana sem aplicação de



**Figura 2.** Distribuição relativa de P orgânico e inorgânico de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico da região Norte Fluminense submetido ao cultivo de cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de manejos.

vinhaça, de 0–0,20 m, a menor participação dos ácidos húmicos, 75 e 77 %, indica que, em manejos sem preservação da MOS, os ácidos húmicos são fonte de P para a solução, ocorrendo nos manejos mais conservacionistas acúmulo de P nesse componente.

### Fracionamento seqüencial de P

Os resultados obtidos por meio da extração seqüencial demonstraram que o P residual predominou amplamente sobre as outras frações (Quadro 3). Esse compartimento representa o P ocluso retido por minerais estruturalmente livres (Smeck, 1985), formas mais estáveis de P orgânico e formas insolúveis de P inorgânico. Outros trabalhos também revelaram maior participação do P residual em diferentes manejos de solos (Pavan & Chaves, 1996; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002). No manejo sem a queima, a participação do P residual foi de 601 mg kg<sup>-1</sup> (34 %) e de 570 mg kg<sup>-1</sup> (36 %) no teor total de P, extraído seqüencialmente, respectivamente, em 0–0,20 e 0,20–0,40 m. Na área que sofreu a queima, essa participação correspondeu a 311 mg kg<sup>-1</sup> (59 %) do total de P em superfície e 411 mg kg<sup>-1</sup> (68 %) em subsuperfície. Observou-se que as maiores participações desta fração ocorreram nos manejos sem vinhaça e cana queimada, indicando que processos biológicos estão regulando o ciclo interno de P no solo, uma vez que o Cambissolo estudado, apesar de ser desenvolvido a partir de sedimentos fluviais recentes, apresenta um bom desenvolvimento genético (Manhães, 1996).

Os resultados do presente trabalho indicam que o manejo do solo pode alterar o ciclo biogeoquímico do P, fazendo com que formas mais disponíveis sejam favorecidas nos manejos que preservam a matéria orgânica do solo.

A atividade microbiana é responsável pela mineralização das formas orgânicas de P. O estoque de P orgânico compreende o P na MOS morta e na biomassa microbiana, sendo de grande interesse para a dinâmica e ciclagem desse elemento no solo (Siqueira & Moreira, 2001). Na camada de 0–0,20 m, somente a área de cultivo da cana queimada não apresentou participação do P microbiano. O manejo com aplicação de vinhaça apresentou acréscimo de 11 mg kg<sup>-1</sup> de P, enquanto no manejo da cana crua a participação do P microbiano foi de 81 mg kg<sup>-1</sup>. Na camada de 0,20–0,40 m, o teor de P microbiano na área de cana crua atingiu 23 mg kg<sup>-1</sup>.

O P da biomassa microbiana, como proporção do P orgânico total do solo, é da ordem de 3 %, nos solos agricultáveis; 14 %, nos solos de pastagem, e 20 %, nos solos de floresta (Siqueira & Moreira, 2001). No solo submetido ao manejo da cana crua, na camada de 0–0,20 m, o componente microbiano representou 21 % do teor total de P orgânico, enquanto os manejos com e sem aplicação de vinhaça representaram 11 e 6 %, respectivamente. Na camada de 0,20–0,40 m, esta participação representou 6 % do teor total de P orgânico no manejo da cana crua. A preservação da palha favorece a biomassa microbiana e, conseqüentemente, a disponibilidade de P para as plantas. Os principais mecanismos de transformação de P no solo envolvem, além da retenção ou fixação, sua liberação ou solubilização da fração de transição (P lábil), mineralização e imobilização biológica pelos microrganismos (Siqueira & Moreira, 2001). A maior atividade microbiana no manejo da cana crua modifica o P do solo. A deposição dos resíduos e a mineralização do P orgânico forneceram P inorgânico para a reassimilação microbiana e absorção vegetal, além da transformação desse P em formas mais estáveis no solo.

**Quadro 3. Teor de P obtido pelo fracionamento seqüencial de Hedley et al. (1982), com adaptações, em amostras de solo de áreas cultivadas por longo tempo com cana-de-açúcar sob diferentes manejos**

Sistema de cultivo	P-resina	P-NaHCO <sub>3</sub>	P-microbiano	P-NaOH	P-NaOH sonificado	P-HCl	P-residual	Σ do P extraído
mg kg <sup>-1</sup>								
0–0,20 m								
Cana crua	129 ± 11	115 ± 13	81 ± 06	203 ± 12	179 ± 12	464	601 ± 19	1.772
Cana queimada	12 ± 02	16 ± 01	-	116 ± 02	44 ± 02	31 ± 02	311 ± 24	529
Cana com vinhaça	33 ± 03	22 ± 01	23 ± 02	246 ± 01	83 ± 04	35 ± 01	551 ± 39	993
Cana sem vinhaça	6 ± 01	14	12 ± 01	158 ± 06	52 ± 04	47 ± 08	390 ± 06	677
0,20–0,40 m								
Cana crua	104 ± 10	75 ± 03	23 ± 02	204 ± 02	151 ± 12	445 ± 10	601 ± 19	1.572
Cana queimada	12 ± 03	14	-	98 ± 04	39 ± 04	30	311 ± 24	604
Cana com vinhaça	24 ± 01	19 ± 01	-	140 ± 01	42 ± 03	32	551 ± 39	717
Cana sem vinhaça	3	18	-	109 ± 10	67 ± 14	31 ± 01	390 ± 06	601

- Não detectado. Os valores representam a média de três repetições ± desvio-padrão.

O teor de P nas frações consideradas lábeis, representadas pelo P resina e P extraído com  $\text{NaHCO}_3$ , no manejo da cana crua, foi superior ao observado no solo com cana queimada. A soma dessas frações na área de cana crua, em 0–0,20 m, representou 14 % do teor de P extraído em seqüência (Figura 3), correspondendo a  $244 \text{ mg kg}^{-1}$  (Quadro 3). Esses valores são maiores que aqueles apresentados nos estudos em região semi-árida e solos cultivados com cana-de-açúcar (Araújo & Salcedo, 1997). Já, na área onde ocorreu a queima do canavial, a participação dessas formas correspondeu a 5 % do teor total de P ( $18 \text{ mg kg}^{-1}$ ), evidenciando a importância da preservação da matéria orgânica para o aumento das formas de P mais disponíveis no solo. O ciclo de P nos diferentes manejos está sendo diretamente afetado pela adição e preservação de matéria orgânica.

Na fração de P extraída com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , predominam formas orgânicas que podem ser consideradas moderadamente lábeis (Bowman & Cole, 1978) e P coordenado ao Fe e Al dos óxidos (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Esta fração representou uma porção importante no teor total de

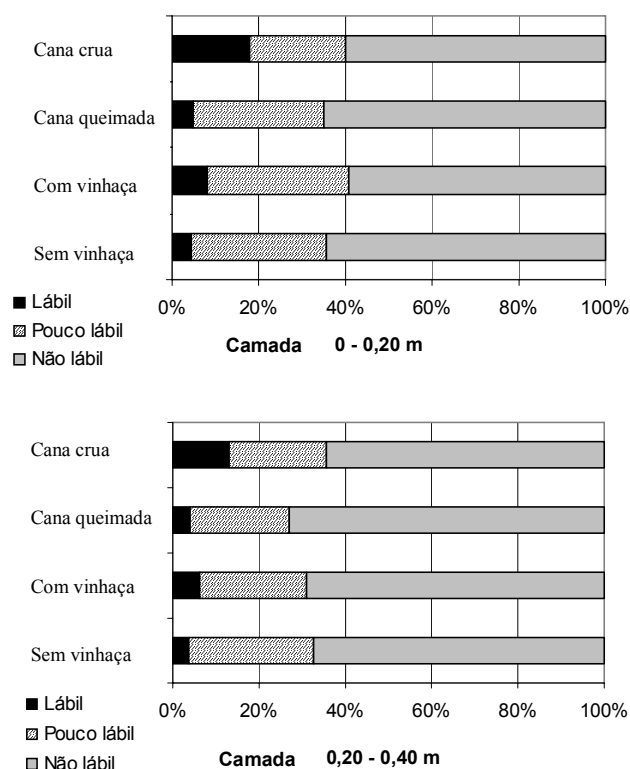
P em todos os tratamentos, especialmente no manejo com aplicação de vinhaça, em ambas as camadas (Quadro 3). No manejo com a cana colhida crua, foram observadas as menores participações desse compartimento, representando 11 % no teor total de P, tanto em 0–0,20 m quanto em 0,20–0,40 m. Segundo Hedley et al. (1982), o P extraído com  $\text{NaOH}$  e  $\text{NaOH}$  sonificado é considerado pouco lábil e pode suprir os componentes mais lábeis. Dessa forma, as menores participações encontradas na cana crua podem ser atribuídas à conversão do P pouco lábil para formas mais disponíveis. Entretanto, P extraído com  $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$  também aumentou nesse manejo (Quadro 3). As formas extraídas com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  podem também estar fornecendo P para os compartimentos mais estáveis.

A extração com  $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , que solubiliza formas de P ligadas ao Ca (Hedley et al. 1982), apresentou, de forma geral, valores inferiores a 7 % do P total. No manejo sem efetuar a queima, entretanto, foram observados que, em superfície, esta extração representou 26 % do teor total de P e em subsuperfície cerca de 28 %. Esta foi a principal forma de acúmulo de P observada pelo fracionamento seqüencial (Quadro 3). O maior teor de Ca no solo sem a queima da palha (Canellas et al., 2003) pode ter favorecido o acúmulo de P nesta fração. Nos demais manejos, não foram observadas diferenças neste compartimento.

O manejo da cana crua, em ambas as camadas, proporcionou redução da participação das formas não-lábeis e conseqüente aumento das frações pouco lábil e lábil (Figura 3). A diferença entre cana queimada e cana crua, no somatório das formas de P lábeis, em 0–0,20 m, foi de  $298 \text{ mg kg}^{-1}$ . O mesmo efeito foi observado na área com aplicação de vinhaça.

O estoque de P do solo na área onde houve preservação do palhicho foi superior ao da área que utiliza a queima em pré-colheita. Na área de cana queimada, em superfície, o estoque de P do solo foi de  $1,68 \text{ Mg ha}^{-1}$ , enquanto na área de cana crua foi de  $6,11 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Quadro 2). Na camada de 0,20–0,40 m, a diferença entre a cana crua e queimada foi de  $3,93 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Na área com aplicação de vinhaça, a diferença entre o estoque de P em relação à área sem aplicação, na camada de 0–0,20 m, foi de  $0,84 \text{ Mg ha}^{-1}$ , enquanto, na camada de 0,20–0,40 m, não houve diferença no estoque de P. A aplicação da vinhaça, portanto, condiciona mudanças na participação das formas mais lábeis no solo; entretanto, com pouco ou nenhum efeito no estoque de P total do solo.

A adoção do manejo da lavoura da cana-de-açúcar sem a queima por longo tempo, além de evitar a emissão de poluentes atmosféricos, possibilita maior teor de P no solo tanto em superfície (0–0,20 m) como em subsuperfície (0,20–0,40 m).



**Figura 3.** Distribuição relativa das formas de P lábil, pouco lábil e não-lábil em relação ao P recuperado por meio de extração seqüencial em um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico da região Norte Fluminense submetido ao cultivo de cana-de-açúcar por longo tempo.



## CONCLUSÕES

1. A manutenção do palhicho na área de cultivo possibilitou maior teor de P total, P disponível, P orgânico, P inorgânico e P nas substâncias húmicas.

2. A manutenção da palha e a adição de vinhaça alteraram a distribuição das formas de P no solo, com diminuição da participação das formas não-lábeis e conseqüente aumento das formas pouco lábeis e lábeis.

3. Em todos os manejos observados, o teor de P nas substâncias húmicas foi maior nos ácidos húmicos, quando comparado aos fúlvicos.

4. O menor teor de P orgânico em cana crua evidenciou a participação desse componente na disponibilidade de P pela sua mineralização.

## LITERATURA CITADA

- ABELSON, P.H. A potential phosphate crisis. *Science*, 283:2015-2016, 1999.
- ANDERSON, J.M. & INGRAM, J.S.I. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2.ed. Wallingford, CAB International, 1996. 221p.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeitos de fertilizantes fosfatados anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:397-403, 1993.
- ARAÚJO, M.S.B. & SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:643-650, 1997.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica no solo*. Porto Alegre, Gênese, 1999. p.9-23.
- BOWMAN, R.A. & COLE, C.V. Transformation of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by  $\text{NaHCO}_3$  extraction. *Soil Sci.*, 125:49-54, 1978.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E. & SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:935-944, 2003.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I. & RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:893-900, 2003.
- 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*, 64:197-214, 1995.
- DELGADO, A.A. Os efeitos da queima do canavial. *STAB, Álcool, Açúcar Subpr.*, 3:42-45, 1985.
- GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A. & FERNANDES, M.S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31:291-299, 1996.
- HANSEN, J.W. Is agricultural sustainability a useful concept?. *Agric. Syst.*, 50:117-143, 1996.
- 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 Sci.*, 46:970-976, 1982.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L., ed. *Methods of soil analysis. Part 3 – Chemical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.869-919.
- MAKAROV, M.I.; MALYSHEVA, T.I.; HAUMAIER, L.; ALT, H.G. & ZECH, W. The forms of phosphorus in humic and fulvic acids of alpine soils in the Northern Caucasus. *Geoderma*, 80:61-73, 1997.
- MANHÃES, M.S. Fósforo em dois solos cultivados com cana-de-açúcar colhida em sistema de cana crua e cana queimada. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1996. 219p. (Tese de Doutorado)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C. & PENATTI, C.P. Degradação da palhada cana de açúcar. *Sci. Agríc.*, 56:803-809, 1999.
- ORLANDO FILHO, J.; MURAOKA, T. & ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. *STAB Álcool, Açúcar Subpr.*, 16:30-33, 1998.
- PAVAN, M.A. & CHAVES, J.C.D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:251-256, 1996.
- RHEINHEIMER, D.S.; CASSOL, P.C.; KAMINSKI, J. & ANGHINONI, I. Fósforo orgânico no solo. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica no solo*. Porto Alegre, Gênese, 1999. p.139-152.
- RHEINHEIMER, D.S. & ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:151-160, 2001.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:41-49, 2003.
- SAUNDERS, W.M.H. & WILLIAMS, E.G. Observation on the determination of total organic phosphorus in soils. *J. Soil Sci.*, 6:254-267, 1955.
- SILVA, L.L. Álcool e a nova ordem econômica mundial. Frente Parlamentar Sucro-alcooleira, São Paulo, Segmento, 1996. p.60-63.
- SIQUEIRA, J.O. & MOREIRA, F.M.S. *Biologia e bioquímica do solo*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 291p.

- SPAROVEK, G.; ALEONNI, L.R.F.; PEREIRA, J.C. & ROSSETO, R. Aptidão das terras de Piracicaba para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. STAB Açúcar, Álcool Subpr., 15:14-17, 1997.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. Geoderma, 36:185-199, 1985.
- SOBRINHO, N.M.B.A.; LUISI, M.V.V.; ROSSIELO, R.O.P.; VELLOSO, A.C.X. & LEAL, J.R. Transformações do nitrogênio mineral em solo Podzólico Vermelho-Amarelo tratado com vinhaça. Pesq. Agropec. Bras., 22:249-256, 1987.
- TIESEN, H. & MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R., ed.. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton, Lewis, 1993. p.75-86.
- TISDALE, S.L. & NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers. 3.ed. New York, Macmillan Publishing, 1975. 694p.
- TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N. & ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. Pesq. Agropec. Bras., 37:1467-1476, 2002.
- TRIVELIN, P.C.O.; BERDASSOLLI, J.A. & OLIVEIRA, M.W. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo: Estabilidade química da mistura. STAB Açúcar, Álcool Subpr., 16:26-29, 1997.
- TURRIÓN, M.B.; GALARDO, J.F.; HAUMAIER, L.; GONZÁLES, M.I. & ZECH, W. <sup>31</sup>P NMR characterization of phosphorus fractions in natural and fertilized forest soils. Ann. For. Sci., 58:89-98, 2001.
- WALKER, T.W. & ADAMS, A.F.R. Studies on soil organic matter: 3. Influence of increased leaching at various stages of weathering on levels of carbon, nitrogen, sulfur, organic and inorganic phosphorus. Soil Sci., 87:1-10, 1959.