

# A Fertilidade dos Solos de Terra Preta de Índio da Amazônia Central

Newton Falcão  
Adônis Moreira  
Nicolas Briam Comenford

Na Amazônia brasileira, cerca de 75 % dos solos de terra firme pertencem as classes dos Latossolos e dos Argissolos; ambos caracterizados por apresentar baixa concentração de bases trocáveis, minerais de argila de atividade baixa, como a caulinita, e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, baixa disponibilidade de fósforo, elevada acidez e, conseqüentemente, maior concentração de alumínio trocável e, em certos casos, manganês, ambos tóxicos para maioria das plantas (Sanchez et al., 1982).

Em toda a Amazônia é possível encontrar manchas de solo com um horizonte superficial espesso e de coloração preta ou marrom escura; normalmente contendo pedaços de cerâmicas, e recobrimdo, principalmente, solos cauliniticos intemperizados. Esta categoria de solo constitui uma das feições mais interessantes da paisagem Amazônica, e representa um importante registro da ocupação humana e do uso do solo na Amazônia por populações pré-colombianas. Reconhecidos regionalmente por sua alta fertilidade, tais solos são comumente conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) (Sombroek, 1966; Falesi, 1972; Sombroek, 2003; Kern, 2003; Falcão *et al.*, 2003). Adjacentes a estas, pode-se também encontrar manchas de solo com horizonte superficial menos espesso e de coloração levemente mais clara que o horizonte superficial da Terra Preta, sem a presença de fragmentos de cerâmicas e com nível de fertilidade inferior ao dela; porém, com fertilidade superior a dos solos predominantes na paisagem, tais como: Latossolos e Argissolos. Sombroek (1966) foi o primeiro a estudar esse tipo de solo e utilizou, para nominá-lo, o termo Terra Mulata (TM), relatando que esse solo foi desenvolvido por meio de longos períodos de cultivos sucessivos.

A Terra Preta de Índio (TPI) pode ser encontrada desde as bases inclinadas das montanhas das Cordilheiras dos Andes até a Ilha de Marajó no Oceano Atlântico, inserida em uma variedade de solos e paisagens, em dimensões que podem variar de menos de um hectare até alguns quilômetros quadrados (Wood & McCann, 1999; Sombroek, 2003; Kern, 2003).

O descarte de resíduos orgânicos pelos povos que habitavam a Amazônia deve ter sido de grande influência no aumento de matéria orgânica nas TPIs (Wood & McCann, 1999). A alimentação com produtos de origem vegetal como, por exemplo, a mandioca, o açaí, a bacaba etc. e de origem animal como ossos, carapaças de tatu, jabuti, caranguejo, conchas etc. produzem grande quantidade de matéria orgânica que não é consumida, permanecendo no local (Wood & McCann, 1999). Esses resíduos orgânicos também devem ser os responsáveis diretos pelo aumento dos teores de alguns elementos químicos nas TPIs (Kern, 2001). Pabst (1991), estudando as TPIs da região de Belterra-PA, verificou que o húmus nas TPIs é da ordem de seis vezes mais estável à decomposição que o húmus do Latossolo. A maior estabilidade da matéria orgânica da TPI, em relação à degradação, faz com que ela seja considerada pelos caboclos como inesgotável em termos de fertilidade.

Pequenos e médios produtores dos municípios de Manacapuru, Iranduba, Presidente Figueiredo e Rio Preto da Eva trabalham em manchas de terra preta e terra mulata por várias décadas, não somente cultivando hortaliças como também espécies perenes como laranja, cupuaçu, coco, mamão, maracujá etc., em sistemas de monocultivos, cultivos consorciados e sistemas agroflorestais.

A maioria dos produtores relata que as manchas de TPI são extremamente férteis e não precisam de adubos, para obtenção de altas produtividades. Entretanto, a prática tem mostrado que as TPIs apresentam alguns nutrientes limitantes ao desenvolvimento e produtividade das culturas, levando alguns produtores a utilizarem, contraditoriamente, altas doses de corretivos e fertilizantes nas áreas de TPI. Esta exploração intensiva e a utilização de nutrientes de forma desbalanceada causam problemas de degradação química (Falcão *et al.* 2003; Falcão *et al.*, 2006), física (Teixeira & Martins, 2003).

## Fertilidade do Solo

### Reação do solo (pH em água, pH em KCl, $\Delta$ pH e Acidez trocável)

O índice de acidez de um solo é medido pelo valor de seu pH, podendo-se utilizar uma destas três metodologias para sua determinação: (1) solução de água desionizada na proporção 1:2,5 água:solução; (2) solução de KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> na proporção de 1:2,5 solo:solução e (3) solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> na proporção de 1:2,5 solo:solução (Raij, 1991; Fassbender & Bornemisza, 1994). Este último método é o mais recomendado para medir o pH de solos agriculturáveis, onde o uso de fertilizantes e corretivos agrícolas são práticas comuns, entretanto, seu uso ainda não é generalizado.

A acidez do solo limita a produção vegetal de forma indireta. Ligada à disponibilidade de macro e micronutrientes e à disponibilização de alguns elementos em níveis tóxicos como o Al e o Mn, ela pode ser provocada pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> proveniente das chuvas ou da respiração dos microorganismos, das raízes e pela decomposição da matéria orgânica. A remoção das bases absorvidas pelas culturas e a lixiviação também colaboram com o aumento da acidez do solo. Todos esses fatores que influenciam no índice de acidez dos solos podem estar presentes nos sistemas agrícolas desenvolvidos nas TPIs, alguns com diferentes graus de intensidade.

Amostras de solos coletadas da camada superficial de dez sítios de TPI, localizados em alguns municípios próximos à cidade de Manaus-AM, revelaram valores de pH (H<sub>2</sub>O) variando entre 4,32 e 6,61 com média de 5,68. Os valores do pH (KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>) variaram na faixa de 3,77 e 6,01 com média de 4,95.

Na camada subsuperficial, os valores de pH(H<sub>2</sub>O) variaram entre 4,15 e 6,71 com média de 5,75; e o pH(KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>) variou na faixa de 3,79 e 6,26 com média de 4,97. Falcão et al. (2003), determinando o pH de amostras de solos de TPI, observaram a seguinte ordem decrescente: pH(H<sub>2</sub>O) > pH(CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>) > pH(KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>).

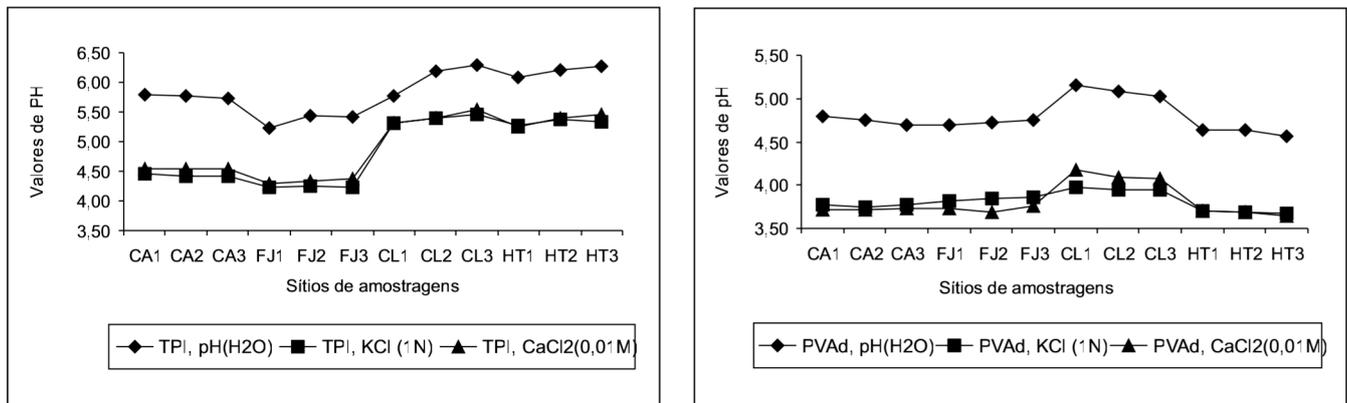
Os solos adjacentes às TPI o pH (H<sub>2</sub>O) apresentaram valores mais elevados que os valores determinados com CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> e KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (Fig. 1). Essa ordem normalmente acontece nas camadas superficiais dos solos adjacentes, porém, com menos frequência nas camadas de subsuperfície, podendo até mesmo apresentar ordem contrária.

Esses valores mostram que as TPIs apresentam maiores valores de pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub>, quando comparadas com os valores encontrados nos solos adjacentes (Latosolos e Argissolos).

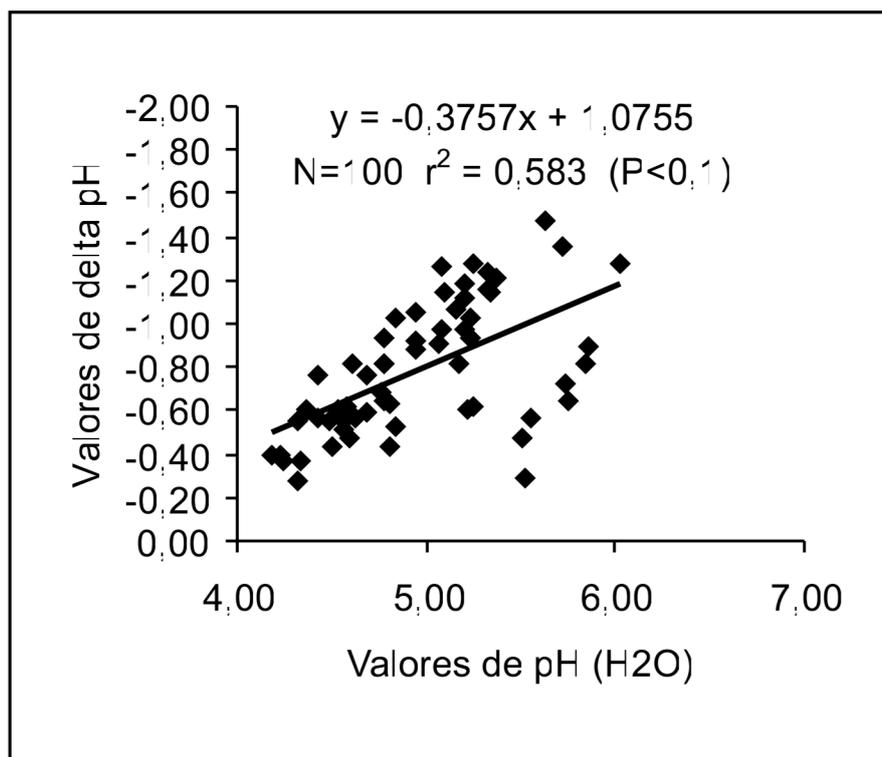
Os Latossolos são extremamente ácidos e em geral apresentam pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> entre 4,0 e 5,0 (Sombroek, 1966). Amostras de Latossolo Amarelo Distrófico, coletadas no município de Itacoatiara, revelaram valores médios de pH de 4,2 na camada superficial (Falcão & Silva, 2004). Amostras de Argissolos Vermelhos Amarelos coletadas da camada de 0-20 cm, em plantios agroflorestais do município de Manacapuru, mostraram valores de pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> em torno de 4,5 (Falcão, 2001).

O  $\Delta$ pH (diferença entre os valores do pH em água e pH em KCl) fornece informações sobre o grau de intemperização e serve para indicar o balanço das cargas elétricas no solo. Quando o valor de  $\Delta$ pH é negativo indica que ocorre, nas amostras de solo, predominância de argilas silicatadas, enquanto um valor de  $\Delta$ pH positivo está relacionado com o predomínio de óxidos de ferro e alumínio (Kiehl, 1979). Quando a amplitude de variação entre os valores de pH em KCl mol L<sup>-1</sup> e pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> é grande, o valor de  $\Delta$ pH é mais negativo, e esta magnitude geralmente está associada a uma quantidade de Al trocável mais elevada (Kiehl, 1979; Fassbender, 1982). Essa relação foi observada em amostras de TPI coletadas na Fazenda Jiquitaia (Rio Preto da Eva AM), onde o delta pH foi mais negativo (-1,48), e a quantidade média de Al<sup>3+</sup> foi mais alta (0,96 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) que em outras TPIs estudadas. No Sítio da Costa do Laranjal (Manacapuru AM) as margens do rio Solimões, o  $\Delta$ pH apresentou um valor de -0,29 e o teor médio de Al<sup>3+</sup> foi mais baixo (0,60 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) confirmando a relação direta entre os valores negativos

do  $\Delta\text{pH}$  e os teores de Alumínio trocável. A amplitude de variação do  $\Delta\text{pH}$  nas TPI estudadas variou de -1,48 e -0,29 na camada superficial e de -1,36 e -0,05 na camada de subsuperfície. Análises de regressão, realizadas entre  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  e  $\Delta\text{pH}$ , Al trocável e  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  em mais de 100 amostras de TPI, mostraram uma relação direta entre  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  e  $\Delta\text{pH}$  (Fig. 2) e uma relação inversa entre o  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  e o teor de Al trocável (Fig. 2).



**Fig. 1.** Valores de pH determinados em amostras de Terras Pretas de Índio (TPI) e solos adjacentes (PVAd) de Amostras coletadas nas localidades da Costa do Açutuba (CA), Fazenda Jiquitaia (FJ), Costa do Laranjal (CL) e Hatahara (HT), com diferentes soluções ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ).



**Fig. 2.** Relação entre  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  e  $\Delta\text{pH}$ , determinados em amostras de TPI.

Nas TPIs, a relação inversa do teor de  $\text{Al}^{3+}$  trocável com o  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  foi muito evidente (Fig. 3). O valor máximo de  $\text{Al}^{3+}$  encontrado para um conjunto de 100 amostras simples analisadas, da camada de 0-20 cm, foi de  $1,60 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , com média de  $0,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e valor mínimo de  $0,01 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Na camada de 20-40 cm de profundidade, o valor máximo de  $\text{Al}^{3+}$  foi de  $1,90 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , com média de  $1,15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e valor mínimo de  $0,01 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Esses resultados mostram que, em geral, as TPIs não apresentam problemas com toxidez de alumínio.

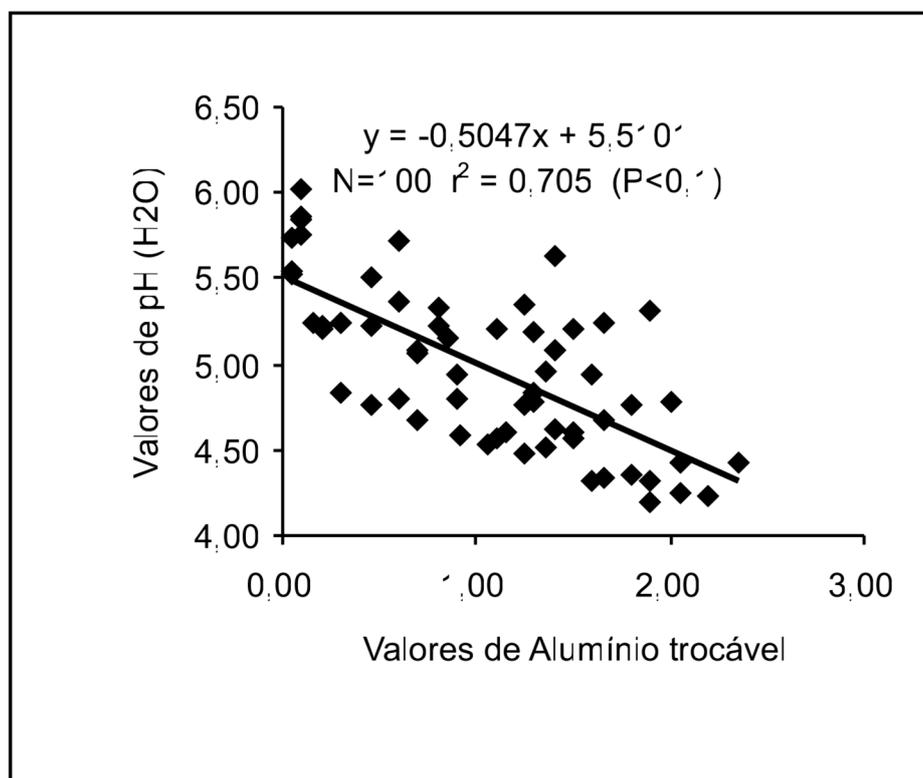


Fig. 3. Relação entre Al trocável e  $pH_{(H_2O)}$  determinados em amostras de TPI.

### A soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions efetiva (t), a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%)

Variáveis como a capacidade de troca de cátions efetiva (CTC), a soma de bases (SB) e a saturação por Bases (V) apresentam valores muito mais altos nas TPIs quando comparados com os solos adjacentes (Tabela 1). Esses elevados valores da CTC não são somente resultados do alto teor de material orgânico presente, mas também de uma maior densidade de cargas por unidade de carbono (Sombroek et al., 1993; Liang et al., 2006). Esta propriedade do carbono orgânico é específica para solos com alto conteúdo de carvão pirogênico como a TPI (Glaser et al., 2001; Cunha et al., 2007, neste volume). As razões para uma elevada eficiência do carvão pirogênico em reter nutrientes são: (a) o carvão pirogênico apresenta maior superfície específica do que o carvão resultante da queima da madeira em temperaturas mais elevadas e (b) apresenta maior densidade de carga negativa por unidade de área superficial, conseqüentemente uma maior densidade de carga (Liang et al., 2006). Esta elevada densidade de carga pode, em princípio, causar uma maior oxidação do próprio carbono pirogênico ou por meio de adsorção do carbono não pirogênico (Lehmann et al., 2005). Ambos os processos têm sido observado nas Terras Pretas de Índio (Liang et al., 2006).

Vieira (1988) estudando Latossolos Amarelos distróficos da Amazônia encontrou valores na faixa de 0,40 a 0,35  $cmol_c kg^{-1}$  de cálcio trocável e 0,33 a 0,20  $cmol_c kg^{-1}$  de magnésio trocável, até a profundidade de 63 cm, extraídos com solução de KCl 1,0  $mol L^{-1}$ . No horizonte antrópico das TPIs pode-se encontrar teores de Ca trocável acima de 10,0  $cmol_c kg^{-1}$  e magnésio trocável acima de 3,0  $cmol_c kg^{-1}$  (Sombroek, 1966; Falesi, 1972; Sombroek, 2003; Kern, 2003; Falcão *et al.*, 2003). O Ca e o Mg são os cátions básicos que mais contribuem para os altos valores da capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) e para a soma de bases (SB) nas TPI.

**Tabela 1.** Atributos químicos de amostras de Terra Preta de Índio, da camada de 0-20 cm, coletadas em dez sítios localizados no Estado do Amazonas.

Valores	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Al <sup>+++</sup>	CTC	SB	V	m
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>				%			
Média	0,17	7,07	1,31	0,20	8,75	8,55	95,20	4,80
Máximo	0,40	15,46	3,25	1,60	17,52	17,50	100,00	48,71
Mínimo	0,05	0,85	0,00	0,00	2,64	1,68	51,29	0,00
D.Padrão	0,07	3,89	0,68	0,37	3,95	4,14	11,60	11,60
<b>C.V.</b>	<b>42,32</b>	<b>55,07</b>	<b>52,02</b>	<b>189,52</b>	<b>45,11</b>	<b>48,38</b>	<b>12,19</b>	<b>241,67</b>

Valores obtidos de 100 amostras. CTC Capacidade de troca de cátions; SB Soma de Bases; V Saturação de bases; m saturação de Alumínio.

O teor médio de potássio trocável encontrado nas amostras analisadas (Tabela 1) está dentro da faixa considerada adequada, que é de 0,16 a 0,30 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Alcarde et al., 1991). O baixo teor de K trocável, comparativamente aos altos teores de Ca e Mg trocáveis nas TPIs, tem, provavelmente, induzido a um desbalanço nutricional nas plantas cultivadas nas TPIs, afetando a absorção, principalmente de K, pela inibição competitiva com Ca e Mg. Esse desbalanço entre estas bases acaba provocando um desequilíbrio na absorção dos nutrientes (Malavolta, 1989). Considerando os valores de alumínio trocável e a porcentagem de saturação por alumínio do complexo de troca (Tabela 1), observa-se que as TPI não apresentam problemas de toxidez de alumínio. O valor mais alto de Al<sup>3+</sup> encontrado nas 100 amostras de Terra Preta analisadas foi de 1,60 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> e o menor valor chegou a zero.

## Nitrogênio

As concentrações de N total nas TPIs são, em geral, muito mais altas que nos solos adjacentes (Lehmann et al., 2003). Entretanto, esse fato não pode ser generalizado para as TPIs estudadas até o momento, os maiores teores de N total nas TPIs, nem sempre resultam em N prontamente disponível para as plantas. Alguns trabalhos têm revelado baixa concentração de N-NO<sub>3</sub> nas TPIs, comparando com os valores encontrados nos solos adjacentes (Lehmann et al., 2003). A baixa disponibilidade de N-NO<sub>3</sub> refletiu numa baixa concentração de N foliar na cultura do caupi cultivado em amostras de TPI, se comparado com o N foliar do caupi cultivado em solos adjacentes sob condições controladas (Lehmann et al., 2003). Estudos adicionais tornam-se necessários para comprovar se a baixa produção do feijão caupi cultivado em amostras de TPI no experimento de Lehmann et al. (2003) foi devido aos baixos teores de N-NO<sub>3</sub>.

Apesar dos altos teores de N total na TPI, Grosh (2005), em estudo sobre a dinâmica e variabilidade espacial da fertilidade do solo do Sítio Hatarara Iranduba (AM), não encontrou correlação significativa entre N total e o P disponível do solo obtido com o extrator Mehlich 3 (Tabela 3).

## Fósforo

O fósforo é um componente vital para todos os seres vivos, sendo o segundo nutriente mineral mais abundante no corpo humano, onde 80% dele é seqüestrado nos ossos e dentes, o que o faz responsável por 20% dos minerais do corpo. Nas plantas o fósforo é necessário para a fotossíntese, respiração, função celular, transferência de gens e reprodução (Stauffer & Sulewski, 2004). Outrossim é um dos nutrientes mais importantes para a produção das culturas, visto que grande parte dos solos naturais não

contém fósforo disponível suficiente para proporcionar altas produtividades; haja vista o total de fósforo contido na crosta terrestre ser de aproximadamente 0,12%, podendo variar de 0,02 a 0,5% no solo, com uma média de 0,05%.

Sombroek (1966), estudando perfis de TPI da região de Belterra, encontrou elevados teores de  $P_2O_5$  total, tanto na camada superficial como na de subsuperfície. Ele observou também que os valores mais altos foram encontrados nas TPIs que apresentaram textura muito argilosa. Contudo, o menor valor para as TPIs mensurado por Sombroek (1966) foi de P de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , sendo este valor encontrado na amostra com textura franco-arenosa (Tabela 2). Observou-se também, nesse estudo, uma relação entre os teores de P total nas TPIs e capacidade de troca de cátions potencial (CTCp). Uma possível explicação para esta relação direta entre a CTCp e os valores de  $P_2O_5$  é aumento da atividade da matéria orgânica causado pelo fósforo, formando complexos com esta. Esse fenômeno ocorre em menor intensidade nas camadas mais profundas onde os teores de matéria orgânica são menores.

**Tabela 2.** Correlação de Pearson entre alguns atributos solo de TPI Sítio Hatarara, Iranduba (AM),  $p < 0,01$ .

	C	N	C/N	P	K	Ca
N total	0,993**					
C/N	0,676**	0,390**				
P	0,206**	0,013NS	0,571**			
K	0,687**	0,649**	0,427**	0,260**		
Ca	0,657**	0,514**	0,696**	0,831**	0,687**	
Mg	0,778**	0,766**	0,458**	0,366**	0,868**	0,690**

N total e C orgânico Método do analisador CHNS (Varian)

P, K, Ca e Mg Extrator Mehlich 3

Fonte: Grosh (2005)

## Fracionamento do fósforo

Os primeiros estudos sobre fracionamento do P em solos foram desenvolvidos por Fraps (1906) e Fisher & Thomas (1935). Os métodos desenvolvidos por esses autores não conseguiam separar o fosfato de ferro do fosfato de alumínio. Posteriormente, Turner & Rice (1954) descobriram que o fluoreto de amônio neutro era capaz de dissolver o fosfato de alumínio, mas não dissolvia o fosfato de ferro. Chang & Jackson (1957) desenvolveram uma metodologia de fracionamento do fósforo capaz de caracterizar e quantificar o fósforo ligado ao cálcio, ferro, alumínio e o fósforo ligado a elementos químicos com caráter redutor. O trabalho desses estudiosos foi a base para todos os outros métodos de fracionamento desenvolvidos posteriormente, baseados na solubilidade variável de P. Um método de fracionamento, baseado no trabalho de Chang & Jackson (1957) foi desenvolvido por Hedley et al. (1982), que tem sido mais utilizado atualmente após modificações (Conti & Richter 1994; Levy & Schlesinger 1999; Guppy et al., 2000). Nesse tipo de fracionamento do P inorgânico e orgânico no solo, após extrações iniciais do P solúvel e P solúvel com resina, o P é extraído e classificado em quatro grupos: fosfato de cálcio, fosfato de alumínio, fosfato de ferro e o fosfato solúvel redutor extraído após a remoção das três formas acima mencionadas. Os métodos de fracionamento mencionados acima têm sido usados para avaliar a biodisponibilidade das formas de fósforo menos solúveis (Potter et al., 1991; Guppy et al., 2000) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Teor total de fósforo em amostras de solos em sítios de Terra Preta de Índio de diferentes localidades na Amazônia Brasileira.

Local da amostragem	Valores mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100g <sup>-1</sup>			Classe textural	Horizonte ou camada (cm)	Metodologia utilizada	Referência
	Min	Max.	Média				
Belterra - PA	120	1350	950	Muito argiloso	Superficial	Ataque sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), d =1,47	Sombroek (1966)
Belterra - PA	80	300	150	Muito argiloso	Subsuperfície	Ataque sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), d =1,47	Sombroek (1966)
Belterra - PA	60	370	150	Franco arenoso	Superficial	Ataque sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), d =1,47	Sombroek (1966)
Belterra - PA	70	140	100	Franco arenoso	Subsuperficial	Ataque sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), d =1,47	Sombroek (1966)

Lima (2001) estudando as diferentes formas de P em amostras de Latossolo Amarelo com A antrópico, coletadas no sítio Hatahara, Município de Iranduba, utilizando o método descrito por Kelly *et al.* (1983), encontrou teores totais médios de 6057 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo 4548 mg kg<sup>-1</sup> solúvel em ácido cítrico, 328 mg kg<sup>-1</sup> na forma de P-AL, 344 mg kg<sup>-1</sup> na forma de P-Fe, 905 mg kg<sup>-1</sup> ligado ao Ca. Lehmann *et al.* (2004) determinaram as diferentes formas de P em amostras de TPI coletadas no Município de Rio Preto da Eva, encontrando 307,3 mg kg<sup>-1</sup> de P prontamente disponível, 343,4 mg kg<sup>-1</sup> de P ligado ao cálcio e 3096 mg kg<sup>-1</sup> de P total. As amostras de da comunidade do Marajá, baixo Rio Negro (AM), revelaram valores de 76,4 mg kg<sup>-1</sup> de P disponível, 5,5 mg kg<sup>-1</sup> de P ligado ao cálcio e 192,5 mg kg de P total. Silva (2006) avaliando as diferentes formas de P em amostras de TPI da camada superficial, encontrou teores médios de 10,5 mg kg<sup>-1</sup> de P-inorgânico, 175 mg kg<sup>-1</sup> de P-Al, 120 mg kg<sup>-1</sup> de P-Fe e 417 mg kg<sup>-1</sup> de P-Ca em amostras coletadas na Costa do Açutuba, Município de Iranduba. Amostras coletadas na Fazenda Jiquitaia revelaram teores médios de 1,8 mg kg<sup>-1</sup> de P-inorgânico, 304 mg kg<sup>-1</sup> de P-Al, 108 mg kg<sup>-1</sup> de P-Fe e 167 mg kg<sup>-1</sup> de P-Ca. Na Costa do Laranjal, Município de Manacapuru, as amostras avaliadas mostraram valores médios de de 1,7 mg kg<sup>-1</sup> de P-inorgânico, 396 mg kg<sup>-1</sup> de P-Al, 138 mg kg<sup>-1</sup> de P-Fe e 275 mg kg<sup>-1</sup> de P-Ca. O fosfato de cálcio é a forma de P mais útil nas investigações de TPI, sendo um indicador de atividade humana, particularmente nas áreas tropicais com solos ácidos e intemperizados (Lehmann et al., 2004).

## Fósforo biodisponível

O P no solo pode estar presente nestas quatro formas distintas: (1) fósforo na forma iônica na solução do solo; (2) fósforo adsorvido na superfície dos constituintes inorgânicos do solo; (3) fósforo mineral tanto na forma cristalina como amorfa; e (4) fósforo como componente da matéria orgânica do solo (Barber, 1995). O ácido fosfórico, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, dá por dissociação de três espécies iônicas diferentes: H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>-2</sup> e PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> sendo a primeira predominantemente na faixa de pH 4,0 - 8,0, comumente encontrada no solo (Sanchez & Cochrane, 1980; Fasbender, 1982).

Na maioria dos solos ácidos, a concentração de íons Fe e Al excede em muito a dos íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, conseqüentemente os íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> reagem quimicamente com os íons Al<sup>3+</sup> e o Fe<sup>2+</sup> solúveis, formando compostos fosfatados insolúveis, restando quantidades diminutas de íon H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> imediatamente assimiladas pelos vegetais (Fasbender, 1982; Brady, 1983). Tendo em vista a condição ácida da maioria dos solos brasileiros, quase todo o P na solução (P extraído em água) está na forma de íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, forma pela qual o P é absorvido pelas plantas. O P(lábil), e a forma de P que está trocável. Sato & Comerford (no prelo) classificam formas de P inorgânica biodisponível como trocável de equilíbrio e trocável de ligantes.

A primeira é uma fonte de P que qualquer organismo pode usar porque está prontamente disponível quando o nível de P na solução está diminuído (exemplo: absorção pelas plantas). O segundo requer que a planta tenha um mecanismo, usando ligantes como oxalato, trocando os ligantes pelo fósforo ou dissolvendo o fósforo que está ligado ao Ca-P, Fe-P, ou Al-P. Nos solos predominantes da Região Amazônica, o teor de P disponível na camada arável é muito baixo; entretanto, nas terras pretas de índio, o P disponível pode alcançar valor acima de 600 mg kg<sup>-1</sup>. Tanto o fósforo, como também o manganês pode ser utilizado com certa segurança para delimitar os sítios de assentamento humanos (Sombroek, 1966; Falesi, 1972).

**Tabela 4.** Teor de fósforo disponível em amostras de solos de Terra Preta de Índio de diferentes localidades da Amazônia Brasileira.

Local de amostragem	Valores			Classe textural	Horizonte ou camada	Metodologia utilizada	Referência
	Mín.	Max.	Média				
Belterra - PA	6,5	66,0	40	Muito argiloso	Superfície	Bray (HCl, 0,1N + NH <sub>4</sub> F, 0,5 mol L <sup>-1</sup> )	Sombroek (1966)
Belterra - PA	3,8	65,1	35	Muito argiloso	Subsuperfície	Bray (HCl, 0,1N + NH <sub>4</sub> F, 0,5 mol L <sup>-1</sup> )	Sombroek (1966)
Belterra - PA	3,2	98,8	40	Arenoso	Superficial	Truog (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,01-0,001 N + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,05 mol L <sup>-1</sup> )	Sombroek (1966)
Belterra - PA	6,7	31,2	20	Arenoso	Subsuperfície	Truog (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,01-0,001 N + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,05 mol L <sup>-1</sup> )	Sombroek (1966)
Cachoeira Porteira - PA	139	321		Argiloso	Superfície	Mehlich-1 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kern & Kampt (1989)
Cachoeira Porteira - PA	70	193		Argiloso	Superfície	Mehlich-1 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kern & Kampt (1989)
Costa do Laranjal	66,86	96,12	81,81	Argiloso	Superfície	Mehlich-1 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	27,52	35,33	30,64	Argiloso	Superfície	Mehlich-3 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	63,95	90,24	77,44	Argiloso	Superfície	Bray (HCl, 0,1N + NH <sub>4</sub> F, 0,5 mol L <sup>-1</sup> )	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	40,53	50,93	44,79	Argiloso	Superfície	Olsen Modificado	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	174,14	187,15	181,13	Argiloso	Subsuperfície	Mehlich-1 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	70,44	76,29	73,65	Argiloso	Subsuperfície	Mehlich-3 (HCl 0,05N + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N)	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	108,17	126,57	119,07	Argiloso	Subsuperfície	Bray (HCl, 0,1N + NH <sub>4</sub> F, 0,5 mol L <sup>-1</sup> )	Kely & Falcão 2004
Costa do Laranjal	101,32	111,72	106,29	Argiloso	Subsuperfície	Olsen Modificado	Kely & Falcão 2004

## Potássio

Tisdale & Nelson (1975) classificam o potássio segundo critérios de disponibilidade do nutriente para as plantas, em: relativamente indisponível, lentamente disponível e prontamente disponível. Outros autores, como Ritchey (1982), seguem um critério químico: o K ocorrendo na forma de componente estrutural de minerais primários, como micas e feldspatos potássicos; temporariamente fixado entre as camadas de argilas 2:1; trocável, facilmente extraível por sal neutro, como acetato de amônio; presente na solução do solo (Ribeiro et al., 2005).

O teor médio de potássio na crosta terrestre é de 2,6%, constituindo o sétimo elemento químico, na ordem decrescente, em abundância. Nos solos os teores de K variam entre 0,1% e 3,0%, com valores mais freqüentes ao redor de 1,0% (Ribeiro et al., 2005). Lopes (1982) revisando vários trabalhos de avaliação dos teores de potássio em solos do Brasil, relata que os teores de K total na maioria dos solos brasileiros ficou em torno de 0,05% a 2,5%. O teor total de potássio (% de  $K_2O$ ), na camada arável dos Latossolos fica em torno de 0,14%. Em regiões úmidas, o conteúdo de potássio trocável mais solúvel é, em geral, menor do que  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  e raramente maior do que  $600 \text{ mg kg}^{-1}$ . No Estado de São Paulo os teores de K trocáveis considerados adequados no solo são de 0,16 a  $0,30 \text{ cmolc kg}^{-1}$ . Para o Estado de Minas Gerais, esses valores considerados adequados ficam na faixa de 0,18 a  $0,31 \text{ cmolc kg}^{-1}$  (Ribeiro et al., 2005). Na solução do solo a concentração de K é da ordem de 2 a  $6 \text{ mg kg}^{-1}$  em média (Malavolta, 2006). Semelhante aos solos adjacentes (Latosolos, Argissolos e Neossolos) e em decorrência do hábito alimentar das populações que não utilizavam sais, exceto as amostras coletadas nos sítios localizados em Marabá (Smith, 1980) e Iranduba (Grosh, 2005), os solos de TPI apresentam baixos teores de K disponível (Tabela 8).

Diversos trabalhos de caracterização química das Terras Pretas têm mostrado que o potássio não está presente em altas concentrações, da mesma forma como ocorre com os valores encontrados para P, Ca e Mg. Sombroek (1966) relata que a percentagem de  $Mg^{++}$  é, normalmente, menor que 1/5 da percentagem de  $Ca^{++}$ . O  $K^+$  e o  $Na^+$  juntos, em geral, apresentam menos de 2% da CTC potencial. Vieira (1988) descrevendo perfis de Latossolo Amarelo com A antrópico do Município de Manacapuru encontrou uma relação  $Ca^{++} / Mg^{++} / K^+$  trocáveis da ordem de 9,39; 1,91 e  $0,07 \text{ cmolc kg}^{-1}$  respectivamente. Esse mesmo autor encontrou um teor médio de  $K^+$  trocável, até a camada de 63 cm, de  $0,046 \text{ cmolc kg}^{-1}$ . Uma análise descritiva do teor de  $K^+$  trocável, realizada em 100 amostras simples de TPI, coletadas da camada de 0-20 cm, revelou um teor médio de 0,17; máximo de 0,40 e mínimo de  $0,05 \text{ cmolc kg}^{-1}$  de  $K^+$ . Esses resultados mostram que a Terra Preta apresenta teor médio de  $K^+$  trocável muito próximo do limite inferior da faixa considerada adequada, tanto para os solos do Estado de São Paulo como também para os solos do Estado de Minas Gerais, podendo-se inferir que a utilização intensiva desses solos, sem adubação complementar com alguma fonte de potássio, pode ocasionar deficiência desse nutriente para as culturas.

Falcão & Borges (2006) avaliando o efeito da fertilidade da Terra Preta no estado nutricional e na produtividade do mamão Havaí (*Carica papaya* L.), encontraram o menor valor de potássio na gleba de Terra Preta não adubada com  $0,09 \text{ mg.kg}^{-1}$  e o maior valor na gleba de Terra Mulata não adubada, com  $0,19 \text{ mg.kg}^{-1}$  de potássio trocável. Esse estudo mostrou que existe um desbalanço nutricional muito grande, provocado pelos altos teores de P, Ca, Mg e baixo teor de K, interferindo, provavelmente na disponibilidade de Zn, Mn.

## Micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco)

Diferente dos Neossolos flúvicos, localizados nas margens dos rios de águas barrentas (rio Solimões, Amazonas, Madeira, entre outros), caracterizados por apresentarem altos teores de Cu, Fe, Mn e Zn e dos Latossolos e Argissolos, que não sofrem influência das enchentes dos rios ( $\pm 70\%$  dos solos da região), com altos teores de B e Fe, os solos antrópicos (TPI) apresentam baixos valores de B, Cu e Fe e altos de Mn e Zn disponível (Tabelas 9 e 10).

Dos teores de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn disponível, presentes na fração argila, analisados por Lima (2001), os resultados revelaram altas concentrações de Mn e Zn disponível no horizonte A antrópico da TPI, quando comparados com os horizontes B do mesmo solo e com os horizontes A e B dos adjacentes (Tabela 10). Essas altas concentrações de Mn e Zn na TPI também foram verificadas por Kern & Kämpf (1989) em sítios localizados no Município de Oriximiná (PA), Amazônia Oriental.

O teor de Mo disponível na camada superficial do sítio de TPI da Estação Experimental do Caldeirão - Embrapa, (Iranduba, AM) apresentou  $0,237 \pm 0,014 \text{ mg kg}^{-1}$ , não havendo outros registros de análise desse nutriente em solos antrópicos. Comparativamente, o teor médio de Mo na TPI mostrou ser superior a solos de alta fertilidade, como a Terra Roxa Estruturada ( $0,11 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e o Latossolo Roxo Eutrófico ( $0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ) do Estado de São Paulo (Malavolta, 2006).

Apesar dos altos teores de matéria orgânica, as TPIs mesmo estando localizadas em áreas de terra firme, apresentam baixos teores de B disponível, assemelhando-se aos teores dos solos das várzeas. Com relação aos Latossolos e Argissolos (Tabela 8), os teores de B estão dentro da faixa considerada adequada por Alvarez Venegas et al. (1999), com o extrator água quente. Nesses solos a manutenção dos altos teores ocorre, possivelmente, devido à baixa lixiviação ocasionada pela fixação do B aos sesquióxidos e pela alta reciclagem, o que não ocorre em solos de várzea, em que a lixiviação decorrente das enchentes e a adsorção da matéria orgânica são as principais causas dos baixos teores de B disponível.

**Tabela 6.** Teores de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn disponível em amostras de Latossolo, Argissolo, Neossolo e Terra Preta do Índio (TPI) da Amazônia Central.

Solos	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
mg kg <sup>-1</sup>						
Latossolo	0,70	0,30	455,0	0,65	0,472	0,36
Argissolo	0,64	0,13	182,0	0,11	0,319	0,11
Neossolo	0,13	3,91	631,6	248,64	0,786	8,90
TPI	$0,15 \pm 0,10$	$1,23 \pm 0,57$	$73,1 \pm 68,9$	$73,12 \pm 68,86$	$0,237 \pm 0,014$	$18,85 \pm 21,82$
Adequado <sup>1</sup>	0,61 - 0,90	1,3 - 1,8	31 - 45	9 - 12	0,09 - 0,102	1,6 - 2,2

B disponível - extrator água quente; Cu, Fe, Mn e Zn disponível extrator Mehlich 1; Mo - EDTA.

<sup>1</sup>Alvarez Venegas et al. (1999); <sup>2</sup>Média dos teores encontrados em solos de alta fertilidade do Estado de São Paulo (Malavolta, 2006).

Fonte: Rodrigues (1998); Moreira (2007).

As menores quantidades de Fe e Mo disponível na TPI, provavelmente, são consequência dos elevados teores e da forma do carbono orgânico dos solos de TPI (vide Cunha et al., 2007, neste volume e Madari et al., 2007, idem), atuando como complexante desses elementos. Lehmann et al. (2003), em estudo sobre a disponibilidade e lixiviação de nutrientes em amostras de solos antrópicos, verificaram que o aumento do conteúdo C na forma de carvão acarretou em incremento na disponibilidade de Cu e Zn disponível no solo.

Trabalho realizado por Rodrigues (1998) sobre o efeito da disponibilidade de micronutrientes nos solos da Amazônia, em que se pratica o cultivo de arroz (Tabela 6), mostrou que no cultivo na TPI, mesmo com altos teores de Cu e Fe disponível, os teores foliares ficaram abaixo do considerado adequado por Reuter et al. (1997). Loué (1993) relata a presença de antagonismo do Cu em solos com altos teores de cálcio (Ca), o mesmo ocorrendo com a interação negativa entre o P e o Fe. Com relação ao Mn e Zn, apesar dos efeitos de inibição entre Ca e Mn e entre P e Zn descritos por Malavolta (2006), os altos teores nos solos de TPI devem ter minimizado estes efeitos, haja vista que os cultivos de arroz apresentaram altos teores de Mn e Zn. Segundo Sombroek et al. (2002), os teores de Mn superiores a  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  e de Zn superior a  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  (extrator Mehlich 1), também podem ser utilizados como pré-requisitos para o diagnóstico de classificação da TPI.

**Tabela 7.** Teor de Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Ni e Cr na fração argila dos solos.

Horizonte	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr
	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>					
Argissolo Amarelo com horizonte A antrópico							
A	79,4	627	104	150	21	78	172
Bt	90,2	71	62	45	22	84	146
Latossolo Amarelo com horizonte A antrópico							
A	57,4	387	90	245	20	97	17
Bw	68,5	84	42	97	19	94	1
Cambissolo com horizonte A antrópico							
A	59,3	289	69	248	18	88	3
Bi2	54,2	97	49	73	21	97	0
Latossolo Amarelo distrófico petroplântico							
A	67,2	87	123	41	21	91	98
Bw	71,0	102	101	50	20	84	89
Latossolo Amarelo distrófico típico							
A	53,7	84	81	41	21	86	92
Bw	76,8	81	36	44	21	89	138
Gleissolo Háptico Ta eutrófico							
A	72,3	778	148	176	22	108	92
C	57,7	379	106	168	18	99	80
Neossolo Flúvico Ta eutrófico							
A	74,9	755	121	156	17	103	0
C	64,1	502	82	158	16	91	54

Fonte: Lima (2001)

**Tabela 8.** Teor foliar de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn em arroz cultivado em amostras de Latossolo, Argissolo, Neossolo e Terra Preta do Índio coletadas na Amazônia Central.

Solos	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	mg kg <sup>-1</sup>					
Latossolo	119,61	10	178,0	115	0,35	86
Argissolo	100,87	11	119,7	135	0,15	95
Neossolo	47,51	13	114,3	1475	0,15	117
Terra Preta	59,16	8	62,1	849	0,52	91
Adequado <sup>1</sup>	40 - 70	10 - 20	200 - 300	100 - 150	0,4 - 1,0	25 - 35

<sup>1</sup>Reuter et al. (1997).

Fonte: Rodrigues (1998)

Rodrigues (1998) verificou que em solos não adubados, após a condução de três cultivos sucessivos, a produção de matéria seca total (raiz + parte aérea) de arroz na TPI foi, na média, 65% superior que o cultivo realizado na média dos Latossolos e Argissolos, porém 36% inferior ao Neossolo Flúvico (Tabela 7). O desbalanço nutricional advindo dos altos teores de P, Ca, Mn e Zn, possivelmente, é a principal causa da menor produção na TPI, quando comparado com os solos de várzea que apresentam maior potencial de produção.

**Tabela 9.** Produção de matéria seca de arroz cultivado em amostras de Latossolo, Argissolo, Neossolo e Terra Preta do Índio coletada na Amazônia Central.

Solos	Produção de matéria seca			
	1º Cultivo	2º Cultivo	3º Cultivo	Média
	g vaso <sup>-1</sup>			
Latossolo	1,13	0,97	0,70	0,93
Argissolo	1,14	1,00	0,93	1,02
Neossolo	4,27	1,72	1,61	2,53
Terra Preta	2,14	1,72	1,01	1,62

Fonte: Rodrigues (1998)

## Considerações Finais

As informações compiladas neste capítulo mostram que mesmo em condições de alta temperatura e umidade, como as da Região Amazônica que favorecem a rápida mineralização da matéria orgânica, a TPI, diferentemente da maioria dos solos da região, apresenta altos teores de P, Ca, e Mn disponível e, em alguns sítios, baixos teores de N total, K e B disponível. Nesse sentido, são necessários estudos mais aprofundados sobre o efeito e qualidade da matéria orgânica sobre a disponibilidade dos macro e micronutrientes nos solos de Terra Preta localizados em diferentes condições edáficas; acompanhamento da dinâmica e interação dos nutrientes, contrastando-os com os demais solos representativos da Região Amazônica (Latosolos, Argissolos, Cambissolos, Neossolos e Espodossolos).

A utilização de altas doses de fertilizantes químicos e orgânicos e corretivos agrícolas tem levado a um desbalanço nutricional afetando diretamente o crescimento e a produção de algumas culturas. Nesse contexto, trabalhar junto com agricultores, no sentido de orientá-los na melhor forma de uso, manejo e conservação dessas áreas de Terra Preta e Terra Mulata cultivadas pode contribuir substancialmente para o desenvolvimento de práticas conservacionistas, evitando a degradação e assegurando uma maior produtividade. Neste capítulo serão abordados alguns resultados relevantes do manejo da fertilidade, e nutrição das principais espécies cultivadas nas terras pretas e nos solos adjacentes (Terra Mulata, Latossolos e Argissolos), alcançados nos últimos quatro anos de pesquisas desenvolvidas no Estado do Amazonas.