

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

MINERALOGIA E QUÍMICA DE TRÊS SOLOS DE UMA TOPOSEQUÊNCIA DA BACIA SEDIMENTAR DO ALTO SOLIMÕES, AMAZÔNIA OCIDENTAL⁽¹⁾

Hedinaldo Narciso Lima⁽²⁾, Jaime Wilson Vargas de Mello⁽³⁾,
Carlos Ernesto G.R. Schaefer⁽³⁾, João Carlos Ker⁽³⁾ & Augusto
Miguel Nascimento Lima⁽⁴⁾

RESUMO

Pouco se conhece sobre os atributos mineralógicos e químicos dos solos da região do Alto Solimões, em comparação aos solos do Médio e Baixo Amazonas, mais estudados. No Alto Solimões, pela maior proximidade do ambiente andino, há maior possibilidade de enriquecimento dos solos. Este trabalho teve por objetivo ampliar o conhecimento dos solos dessa região por meio da caracterização de atributos mineralógicos e químicos de três solos de uma topossequência na região de Benjamin Constant (AM), próximo à fronteira Brasil-Peru. Tais solos situam-se das partes mais elevadas até a várzea, sendo classificados como Argissolo Amarelo Ta aluminico abrupto, Plintossolo Argilúvico aluminico abrupto e Neossolo Flúvico Ta eutrófico. Os resultados mostram que estes solos possuem maior riqueza de nutrientes e de minerais alteráveis, com menor grau de intemperismo, em comparação aos solos mais bem drenados da parte oriental da Amazônia, derivados de sedimentos mais antigos ou de rochas cristalinas. Os baixos teores de Fe e Mn no Plintossolo em todas as frações analisadas, em comparação aos demais solos da topossequência, indicam o predomínio de processos de remoção nesse ambiente, enquanto, no Neossolo Flúvico, a remoção é superada pela deposição de novos sedimentos, possibilitando a ocorrência em teores elevados de Fe e Mn. Os valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato são baixos nos horizontes superficiais, tornando-se elevados nos horizontes subsuperficiais mais ricos em argila ou com ocorrência de plintita, podendo representar, em caso de erosão, um fator limitante ao cultivo agrícola.

Termos de indexação: Amazônia, Formação Solimões, capacidade de adsorção de P, plintita, solos de várzea, terra firme.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Projeto financiado com recursos do CNPq. Recebido para publicação em agosto de 2004 e aprovado em agosto de 2005.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Universidade Federal do Amazonas – UFAM. Av. Gal. Rodrigo Otávio J. Ramos 3.000, CEP 69077-000 Manaus (AM). E-mail: hedinaldo@ufam.edu.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36570-000 Viçosa (MG). Bolsistas do CNPq. E-mails: jwvmello@ufv.br; carlos.schaefer@ufv.br; jcker@ufv.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, UFV. E-mail: lima.ufv@bol.com.br

SUMMARY: MINERALOGY AND CHEMISTRY OF THREE SOILS ALONG A TOPOSEQUENCE FROM THE UPPER SOLIMÕES BASIN, WESTERN AMAZONIA

Little is known about chemical and mineralogical attributes of soils from the upper Amazon, compared with well-studied soils from the middle and lower Amazon. In the well-drained uplands of Upper Amazon, due to the Andes Cordillera proximity, soils are expected to be chemically richer. This work aimed to increase the knowledge of soils from the upper Amazon, by means of studying three soils along a typical topossequence at Benjamin Constant, near the Brazilian-Peruvian Border. These soils range from the uplands, where Al concentration is high (possessing an "aluminic" character) down to the floodplain, with eutric, richer soils. They were classified as Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto, Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto and Neossolo Flúvico Ta eutrófico in the last version of the Brazilian System of Soil Classification. The results showed greater nutrient and primary minerals amounts and youthful development in these soils, compared with well-drained, deeply weathered soils from eastern Amazonia, derived from older, pre-weathered sediments or ancient crystalline rocks. The low amounts of Mn and Fe in the Plintossolo in all fractions analysed, compared with the other soils, indicate that removal is pronounced in this pedo-environment, whereas in the Neossolo Flúvico, new sedimentary additions allow the occurrence of higher Fe and Mn amounts. The maximum phosphorous adsorption capacity values are generally lower in the surface soil horizons, increasing with depth, accompanied by higher clay contents, or plinthite occurrence. Thus, exposure of subsurface layers may be a limiting factor for agriculture in these soils.

Index terms: Amazonia, Solimões Formation, P adsorption capacity, plinthite, lowland soils, uplands soils.

INTRODUÇÃO

As características mineralógicas e químicas dos solos da Amazônia são, em grande parte, ditadas pela natureza do material de origem. Áreas mais extensas de solos eutróficos só existem onde há influência atual (planície aluvial) ou pretérita (terraços e baixos planaltos das bacias do Acre e do Alto Amazonas) de sedimentos andinos; ou, ainda, onde afloram rochas de maior riqueza em bases (calcários e margas em Monte Alegre-Ererê; basaltos e diabásios em Roraima, Pará e Amapá) (Schaefer et al., 2000). De modo geral, nas demais áreas, as condições bioclimáticas atuais, as características do material de origem e o relevo levam à formação de solos profundos e muito intemperizados (Lima, 2001).

A planície aluvial que margeia os rios de "águas brancas" (águas barrentas), ricas em material suspenso, como o Amazonas, Juruá, Madeira e Purus, e que está sujeita à inundação sazonal é, regionalmente, denominada várzea. A várzea compreende grandes faixas de terras, podendo alcançar até 100 km de largura (Iriondo, 1982), em um complexo sistema de canais, lagos, ilhas e diques marginais (Sioli, 1951).

O nível elevado do lençol freático e a inundação periódica limitam o processo pedogenético, ocasionando solos jovens e, em alguns casos, sedimentos em processo incipiente de pedogênese (Lima, 2001). Por sua natureza sedimentar recente, os solos destas várzeas guardam estreita relação com

o material de origem, sedimentos provenientes das regiões, andina e subandina, transportados pelos rios e depositados na planície aluvial (Gibbs, 1964; Irion, 1976).

Na várzea do Solimões/Amazonas, os solos normalmente apresentam teores elevados de silte e de areia fina. São, freqüentemente, eutróficos, apresentando elevados valores de capacidade de troca de cátions e de cátions trocáveis, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e, em alguns casos, Na^+ e Al^{3+} . Em contraste aos solos bem drenados de terra firme, apresentam reação menos ácida, níveis mais elevados de cátions básicos, baixos graus de saturação por alumínio e argilominerais de alta atividade (Lima, 2001). A composição mineralógica dos solos da várzea é bastante rica, destacando-se a presença de minerais primários, tais como: mica, clorita e feldspato, além de conteúdo significativo de esmectita, caulinita e vermiculita (Kitagawa & Möller, 1979; Irion, 1984; Möller, 1986) e, em menor concentração, lepidocrocita, hematita e gibbsita (Möller, 1991).

As terras que não sofrem inundação são regionalmente denominadas terra firme. Na região estudada, os solos da terra firme são formados a partir de sedimentos terciários da Formação Solimões. As características do material de origem, as condições de drenagem, o tempo de exposição e a atuação dos agentes bioclimáticos resultaram em solos menos profundos e menos intemperizados, em comparação aos solos de terra firme derivados de sedimentos terciários/cretáceos da Formação Alterdo-Chão, na parte mais leste da região amazônica.

Este trabalho objetivou ampliar o conhecimento dos solos da parte mais ocidental da Amazônia brasileira, por meio da caracterização de atributos mineralógicos e químicos, bem como avaliar os aspectos de sua gênese, relacionando-os com os demais solos de ocorrência regional.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na bacia sedimentar do Amazonas, sub-bacia do Alto Solimões, no estado do Amazonas, situada dentro do domínio das terras baixas extensivas da Amazônia brasileira (Ab'Sáber, 1996), no município de Benjamin Constant (AM), próximo à fronteira Brasil-Peru. A terra firme na região é recoberta por sedimentos terciários da Formação Solimões (Radambasil, 1977) e quaternários da Formação Içá (Santos, 1984), enquanto a várzea é recoberta por sedimentos quaternários holocênicos (Sioli, 1951).

Foram selecionados três pedons em uma toposequência que se estende desde a terra firme até à várzea (Figura 1). Em seguida, foram abertas trincheiras para a descrição dos perfis, segundo Lemos & Santos (1996), e para a coleta das amostras. Os solos foram classificados de acordo com Embrapa (1999), a saber: Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto (PAva), Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto (FTa) e Neossolo Flúvico Ta eutrófico (RUve).

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm de abertura, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras foram caracterizadas quanto aos seguintes atributos (Embrapa, 1997): granulometria, pelo método da pipeta; pH em água e em KCl 1 mol L⁻¹, em suspensão solo/solução relação 1 g/2,5 mL; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, via extração com KCl 1 mol L⁻¹, e quantificação, por espectrometria de absorção

atômica (Ca²⁺ e Mg²⁺) e titulometria com NaOH (Al³⁺). Na⁺ e K⁺ trocáveis, via extração com solução Mehlich-1, e quantificação, por fotometria de chama. Acidez total (H + Al), por meio de extração com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0, e quantificação, por titulometria com NaOH. P disponível extraído por solução Mehlich-1 e quantificado pelo método do ácido ascórbico, conforme Kuo (1996).

Os teores de Fe, Al e Mn na fração argila e na TFSA, via extração por ditionito-citrato de sódio (Coffin, 1963) e por oxalato ácido de amônio (Schwertmann, 1964), e os teores totais de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn das frações: argila, silte e areia fina solubilizadas por uma mistura de HF + HNO₃ + HCl (USDA, 1996) foram quantificados por espectrometria de absorção atômica.

O fracionamento das substâncias húmicas foi realizado segundo Swift (1996) e o carbono orgânico total determinado, via úmida, de acordo com procedimento descrito por Yeomans & Bremner (1988). O fósforo remanescente e a capacidade máxima de adsorção de fosfato foram determinados, segundo Alvarez V. & Fonseca (1990).

A difratometria de raios X da fração argila foi realizada em amostras orientadas, usando-se lâminas de vidro e analisadas de acordo com procedimento descrito por Whittig & Allardice (1986) e USDA (1996). Os difratogramas foram obtidos na velocidade de 2 °2 θ/min, na amplitude de 2 a 50 °2 θ. O difratômetro, equipado com ânodo de cobre e filtro de níquel, foi operado a 25 mA e 35 kV para todas as análises realizadas. Amostras que continham argilominerais do tipo 2:1 foram tratadas para diferenciar minerais expansíveis de não-expansíveis, vermiculita de esmectita e clorita de vermiculita e de vermiculita com hidróxi entre camadas (USDA, 1996). Para identificar os óxidos de Fe presentes na fração argila, essa foi tratada com solução NaOH 5 mol L⁻¹ (Kämpf & Schwertmann, 1982), as lâminas

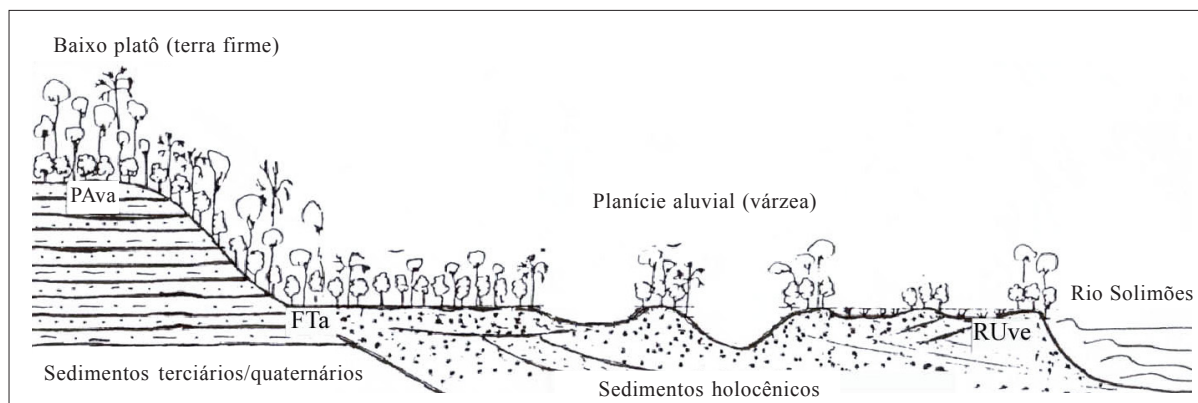


Figura 1. Bloco diagrama da distribuição dos solos na paisagem. PAva – Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto; FTa – Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto; RUve – Neossolo Flúvico Ta eutrófico.

foram irradiadas de 15 a 80 °2 θ , na velocidade de 2 °2 θ /min, utilizando-se ânodo de ferro como fonte de radiação. As lâminas de silte foram irradiadas de 4 a 40 °2 θ na velocidade de 2 °2 θ /min, com ânodo de ferro. A fração areia fina foi triturada em almofariz de ágata e as lâminas preparadas em pó (não orientadas) e analisadas sob as mesmas condições descritas para a fração silte, porém na amplitude de 4 a 65 °2 θ .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição mineralógica

A composição mineralógica dos solos, em todas as frações analisadas, revela uma riqueza elevada de minerais silicatados, com pequenas variações em toda a topossequência. O Argissolo Amarelo Ta alumínico e o Plintossolo apresentam composição mineralógica semelhante na fração argila: caulinita, esmectita, mica/ilita, pirofilita, quartzo e vermiculita. Destaca-se, todavia, a ausência de esmectita no Plintossolo (Quadro 1).

Esmectitas são componentes freqüentemente encontrados em solos pouco intemperizados da Amazônia (Irion, 1984; Möller, 1986; Silva, 1999). A ocorrência de esmectita no Argissolo Amarelo Ta alumínico pode ser atribuída aos teores elevados de cálcio e magnésio, especialmente no horizonte 2C₂, onde os teores elevados de bases e sílica são suficientes para a síntese e estabilização desse mineral. Nos horizontes superficiais, onde a atuação dos agentes bioclimáticos é mais intensa e a acidez é mais elevada, a esmectita torna-se instável, decompondo-se e liberando alumínio para o meio, o que resulta em elevados teores de alumínio trocável, notadamente no horizonte B. Na parte inferior do pedon, onde o processo de intemperismo é menos intenso, a esmectita é mais estável, podendo ser o componente predominante da fração argila, conforme observou Irion (1984) em solos da mesma formação geológica.

A composição mineralógica da fração argila do Plintossolo, exceto pela presença de pirofilita (Quadro 1), não difere daquela descrita por outros autores para outros solos desta classe na Amazônia (Sombroek, 1966; Möller, 1986; Rego, 1986). A pirofilita é um aluminossilicato muito raro nos solos (Allen & Hajek, 1989), mas é freqüentemente encontrada em rochas e saprolitos nos Andes (Wilke & Zech, 1987), tendo sido observada em solos que recebem sedimentos andinos (Irion, 1984; Lips & Duivenvoorden, 1996; Marques et al., 2002). Segundo Irion (1984), esse mineral seria formado a partir da lixiviação de cátions das entre-camadas da montmorilonita, anteriormente presente. No entanto, de acordo com Marques et al. (2002), a pirofilita presente nos solos da Amazônia Ocidental

foi transportada diretamente dos Andes e depositada ao longo dos rios daquela região. Esses autores argumentam que, sendo a pirofilita formada no ambiente do solo, sua presença seria detectada na fração argila fina, o que não foi observado por eles.

As condições restritas de drenagem, resultantes das características ambientais e da granulometria fina dos sedimentos originais, condicionaram um processo de intemperismo menos acentuado do que aquele normalmente observado nos solos bem drenados da Amazônia, o que resulta em perfis mais rasos e de maior riqueza em minerais primários. Tal composição difere expressivamente daquela observada nos solos de terra firme da região mais oriental da Amazônia, derivados de sedimentos mais antigos e de rochas cristalinas.

No Neossolo, observou-se a presença de caulinita, esmectita, mica/ilita, clorita, vermiculita e quartzo (Quadro 1). Há poucos registros da ocorrência de clorita em solos, provavelmente em razão da grande instabilidade deste mineral em ambientes pedogenéticos (Allen & Hajek, 1989). Sua ocorrência em solos da Amazônia Ocidental foi relatada por Irion (1984), Lima (2001) e Marques et al. (2002). Esses poucos registros podem ser atribuídos ao limitado número de trabalhos sobre a composição mineralógica dos solos de várzea da Amazônia Ocidental. Lima (2001) observou ainda a ocorrência de clorita em solos da várzea do Médio Amazonas.

Para facilitar a identificação dos óxidos de ferro, amostras da fração argila foram pré-tratadas com solução NaOH 5 mol L⁻¹. Os difratogramas, assim obtidos, no entanto, mostraram uma diversidade extraordinária de picos que, além dos óxidos de ferro, refletem a presença de minerais, tais como: quartzo, caulinita e minerais silicatados primários. Schwertmann & Kämpf (1983) relatam a presença de outros componentes, como caulinita, feldspatos, quartzo e gibbsita em solos submetidos a tratamentos com NaOH 5 mol L⁻¹. Esse fato pode ser indicativo de que o método empregado precisa ser mais bem adaptado para os solos como os observados neste estudo, ricos em minerais silicatados e pobres em ferro livre. Não obstante, observa-se a ocorrência de goethita, hematita e, em algumas amostras, lepidocrocita. Tomando por referência os valores de Fe_o e da relação Fe_o/Fe_d, pode-se inferir a ocorrência de óxidos de ferro de menor cristalinidade, como ferriidrita, nos solos estudados.

A ocorrência de hematita nesses solos, com drenagem de moderada a deficiente e, por vezes, sujeitos à inundação, estaria associada à presença de plintita no Plintossolo e no Argissolo Amarelo Ta alumínico, enquanto, no Neossolo, pode representar um componente detrítico presente nos sedimentos transportados e depositados na planície aluvial ou constituir plintita em formação.

Não foram observadas variações significativas na composição mineralógica da fração silte de todos os solos estudados, em comparação com a fração argila (Quadro 1), exceto pela ocorrência de plagioclásio, no Plintossolo, e plagioclásio e feldspato potássico, no Neossolo. Na fração areia fina do Neossolo, observa-se uma significativa diversidade mineral, a saber: quartzo, caulinita, mica/ilita, vermiculita, feldspato e plagioclásio. No Plintossolo, a diversidade de minerais é menor nessa fração, indicando, desta forma, menor reserva de nutrientes em comparação ao Neossolo. O Plintossolo apresentou basicamente quartzo como componente da fração areia fina, à exceção do horizonte C, no qual se observaram ainda mica e plagioclásio. No

Argissolo Amarelo Ta aluminico, além do quartzo, observou-se plagioclásio nos horizontes A e C, bem como calcita no horizonte C (Quadro 1).

Características químicas

A acidez é moderada no Neossolo, especialmente nos horizontes subsuperficiais. No horizonte 2C₂ do Argissolo Amarelo Ta aluminico, em razão da ocorrência de uma camada de conchas fósseis, o valor do pH é maior que 8,0. No Plintossolo, a acidez é mais acentuada em todo o perfil. Os valores de ΔpH são negativos, indicando predomínio de carga superficial líquida negativa em todos os solos da topossequência (Quadro 2).

Quadro 1. Composição mineralógica das frações: argila, silte e areia fina dos solos estudados, por difratometria de raios X (minerais silicatados e calcita)

Solo	Horizonte	Argila	Silte	Areia fina
PAva	A	Vm, Es, Mi/Il, Pf, Ct, Qz	Qz, Mi/Il, Vm, Ct, Fs	Qz, Pg
	Bt	Vm, Mi/Il, Pf, Ct, Qz	Qz, Ct, Mi/Il, Es, Vm, Pf, Pg	Qz
	2C ₂	Vm, Es, Mi/Il, Ct, Qz	Qz, Ct, Mi, Vm, Pg	Qz, Ca, Pg
FTa	A	Vm, Mi/Il, Pf, Ct, Qz	Qz, Mi/Il, Pf, Ct, Pg	Qz
	Btf	Vm, Mi/Il, Pf, Ct, Qz	Qz, Mi/Il, Pf, Ct, Pg	Qz
	C	Vm, Mi/Il, Pf, Ct, Qz	Qz, Mi/Il, Pf, Ct, Pg	Qz, Mi, Pg
RUve	A	Cl, Vm, Es, Mi/Il, Ct, Qz	Qz, Ct, Mi/Il, Es, Cl, Vm, Fs	Qz, Mi/Il, Vm, Ct, Fs, Pg
	2C ₂	Cl, Vm, Es, Mi/Il, Ct, Qz	Qz, Ct, Mi/Il, Es, Cl, Vm, Fs	Qz, Mi/Il, Vm, Ct, Fs, Pg

Ca – calcita; Ct – caulinita; Cl – clorita; Es – esmectita; Fs – feldspato; Il – ilita; Mi – mica; Pf – pirofilita; Pg – plagioclásio; Qz – quartzo; Vm – vermiculita.

Quadro 2. Características químicas dos solos estudados

Horizonte	pH		ΔpH	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ³⁺	Mg ³⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC	T	V	m
	H ₂ O	KCl													
mg kg ⁻¹															
Argissolo Amarelo Ta aluminico abrupto															
A	5,82	4,70	-1,12	4	46	38	9,9	2,1	0,1	4,8	12,2	17,0	47,3	72	1
Bt	5,41	3,60	-1,81	1	32	28	5,4	1,1	10,8	15,3	6,8	22,1	36,8	31	62
C	6,74	4,78	-1,96	152	34	48	15,4	2,2	0,0	1,7	17,9	19,6	50,2	92	0
2C ₂	8,09	6,85	-1,24	6	14	65	16,8	3,9	0,0	0,0	20,5	20,5	42,8	100	0
Plintossolo Argiluvico aluminico abrupto															
A	4,91	3,98	-0,93	6	57	41	1,1	0,4	1,2	6,6	1,8	8,4	46,7	22	40
Bt	4,96	3,53	-1,43	1	42	33	0,5	0,3	11,4	14,9	1,0	16,0	30,7	7	92
C	5,12	3,48	-1,64	1	70	51	0,3	0,5	17,3	21,0	1,2	22,2	37,0	5	98
Neossolo Fluvico Ta eutrifico															
A	5,38	4,36	-1,02	92	300	186	9,0	3,3	0,2	5,6	14,0	19,6	65,3	71	1
C	5,62	4,14	-1,48	14	72	59	10,1	4,4	0,4	3,8	14,9	18,7	36,0	30	2
2C ₂	6,36	4,43	-1,93	11	39	44	4,9	5,0	0,1	1,9	10,1	12,0	35,9	34	1
3C ₃	6,41	4,44	-1,97	173	35	48	4,0	5,6	0,1	1,7	10,0	11,7	97,4	35	1

SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca de cátions a pH 7,0; T – atividade da fração argila; V – saturação por bases; m – saturação por alumínio da CTC efetiva.

No Neossolo, os teores de nutrientes são elevados, notadamente Ca, Mg e P, enquanto os teores de Al^{3+} são baixos. O Ca^{2+} é o cátion predominante nos solos de várzea; todavia, os teores de Mg^{2+} e Na^+ são também elevados, resultando em valores elevados de soma e de saturação por bases e em valores reduzidos de saturação por alumínio (Quadro 2). Os valores de CTC são elevados e a argila apresenta alta atividade.

O Argissolo Amarelo Ta alumínico apresenta teores relativamente elevados de nutrientes, principalmente Ca e Mg. No horizonte B deste solo, o teor de Al^{3+} é superior a $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e a saturação por alumínio superior a 60% (Quadro 2). Nos demais horizontes, o Ca^{2+} é o cátion predominante e os valores de soma e saturação por bases são elevados. Os teores de P disponível são baixos, sendo esta característica a que mais diferencia o Argissolo Amarelo Ta alumínico do Neossolo.

No horizonte 2C_2 do Argissolo Amarelo Ta alumínico, onde se encontram conchas fósseis de moluscos incompletamente intemperizadas, o teor de P é também elevado. Grande parte do P primário, ligado ao cálcio, teria sido extraída em razão da natureza ácida do extrator Mehlich-1, utilizado na determinação do P disponível. O Argissolo Amarelo Ta alumínico apresenta, ainda, valor elevado de CTC e argila de alta atividade.

O Plintossolo apresenta menor riqueza de nutrientes em comparação aos demais solos da toposequência avaliada, o que pode estar associado à sua posição na paisagem, visto que, embora não esteja sofrendo novas deposições de sedimentos, a exemplo do que acontece com o Neossolo situado na margem do rio Solimões, pode permanecer saturado por água ou submerso por parte do ano em razão da elevação do nível do lençol freático. Neste caso, elementos mais solúveis e, portanto, mais móveis seriam removidos do perfil com a drenagem natural, empobrecendo o solo e aumentando a concentração dos elementos menos móveis.

Os teores de ferro extraídos por ditionito (Fe_d) variaram de 7 a 40 g kg^{-1} (Quadro 3). São valores relativamente baixos, atribuíveis à pobreza em ferro do material de origem e ao baixo grau de intemperismo, conforme Kämpf & Curi (2000). As condições úmidas durante o transporte e a deposição dos sedimentos e as condições bioclimáticas atuais do ambiente também devem ser consideradas.

Os teores de Fe_d foram menores no Plintossolo, especialmente no horizonte A e C, enquanto, no horizonte B, onde a presença de plintita é maior, os teores de Fe_d são mais elevados. Isto pode ser atribuído à maior redução e posterior migração do ferro do horizonte superficial e posterior precipitação e segregação no horizonte subsuperficial, formando plintita, o que resulta em teores mais elevados do elemento na parte inferior do perfil, em comparação

ao horizonte superficial, onde a matéria orgânica pode inibir a cristalização dos óxidos de ferro (Lovley, 1995). Os baixos teores de Fe_d e ferro total (Fe_t) observados no Plintossolo são indicadores da maior mobilidade do Fe nesse ambiente. Os teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Fe_o) variaram de 1,2 a $20,1 \text{ g kg}^{-1}$ (Quadro 3). Os maiores valores foram observados no Neossolo e os menores no Argissolo Amarelo Ta alumínico, especialmente nos horizontes subsuperficiais deste.

Os valores da relação Fe_o/Fe_d (Quadro 3) são elevados no Neossolo e no horizonte superficial do Plintossolo, refletindo o predomínio de formas de óxidos de ferro de menor grau de cristalinidade nestes locais. Os baixos valores desta relação, especialmente nos horizontes subsuperficiais do Argissolo Amarelo Ta alumínico, refletem o predomínio de formas de óxidos de ferro de maior cristalinidade.

No Neossolo e no horizonte superficial do Plintossolo, os óxidos de ferro mal cristalizados representam mais de 50% do total de ferro livre. Neste caso, além dos efeitos da matéria orgânica, retardando ou inibindo o processo de cristalização, percebem-se também os efeitos do regime hídrico desses solos, os quais podem permanecer saturados ou inundados por períodos prolongados de tempo, resultando em condições temporariamente redutoras e na manutenção de teores relativamente elevados de formas de ferro de menor cristalinidade, notadamente nos horizontes superficiais.

A relação Fe_d/Fe_t , determinada na fração argila, variou de 0,23 a 0,56. Em média, o Fe livre representa menos de 50% do ferro total, sendo característica marcadamente diferenciada em relação aos solos bem drenados de terra firme da Amazônia Oriental, como os Latossolos (Lima, 2001).

O Plintossolo apresentou os menores valores da relação Fe_d/Fe_t (Quadro 3), pois a maior parte dos óxidos de Fe desse solo encontra-se associado à plintita, em concreções que ocorrem predominantemente na fração areia fina, o que resulta em teores elevados de Fe total nessa fração. Os teores de Al_d e Al_o são relativamente baixos em todos os solos analisados. No Argissolo Amarelo Ta alumínico, esses teores variaram de 3,4 a $5,5 \text{ g kg}^{-1}$ e de 1,7 a $3,1 \text{ g kg}^{-1}$; no Plintossolo, de 2,9 a $4,6 \text{ g kg}^{-1}$ e de 2,6 a $2,8 \text{ g kg}^{-1}$, e, no Neossolo, de 3,6 a $5,9 \text{ g kg}^{-1}$ e de 3,1 a $3,8 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente. Os baixos teores de Mn extraídos por ditionito e por oxalato indicam a virtual ausência de formas oxídicas deste elemento na fração argila do Plintossolo. No Argissolo Amarelo Ta alumínico e no Neossolo, os teores de Mn são mais elevados (Quadro 3).

Tomando por base os teores de Fe e Al extraídos por ditionito e oxalato na fração argila, estimou-se a substituição do Fe pelo Al. Os valores da substituição observados variaram de 0 a $0,3 \text{ mol mol}^{-1}$ (Quadro 3). Estes valores encontram-se dentro do limite máximo estabelecido para goethitas de solos

Quadro 3. Alumínio, ferro e manganês extraídos por oxalato ácido de amônio e ditionito-citrato de sódio e ferro total da fração argila, suas relações e estimativa da substituição do ferro por alumínio na fração argila dos solos estudados

Horizonte	Al _d	Al _o	Fe _d	Fe _o	Mn _d	Mn _o	Fe _t	Al _o /Al _d	Fe _o /Fe _t	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _t	Sub. Fe/Al
	g kg ⁻¹											mol mol ⁻¹
Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto												
A	4,54	2,86	25,69	6,08	1,15	1,12	53,4	0,63	0,11	0,24	0,48	0,17
Bt	5,47	3,10	25,11	4,24	0,17	0,09	-	0,57	-	0,17	-	0,21
C	3,37	1,69	32,76	4,34	0,59	0,28	66,0	0,50	0,07	0,13	0,50	0,12
Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto												
A	2,86	2,75	14,65	14,43	0,02	0,02	33,2	0,96	0,43	0,98	0,44	0,00
Bt	4,64	2,70	24,13	6,31	0,00	0,00	-	0,58	-	0,26	-	0,21
C	3,05	2,56	7,03	1,17	0,00	0,00	30,1	0,84	0,04	0,17	0,23	0,16
Neossolo Flúvico Ta eutrófico												
A	3,62	3,06	25,06	15,36	0,14	0,13	51,3	0,85	0,27	0,61	0,49	0,27
3C ₃	5,91	3,76	40,52	20,05	1,33	1,13	73,0	0,64	0,15	0,49	0,56	0,27

Al_d, Fe_d, Mn_d – alumínio, ferro e manganês via extração com ditionito de sódio; Al_o, Fe_o, Mn_o – alumínio, ferro e manganês via extração com oxalato ácido de amônio; Fe_t – teor total de ferro; Sub. Fe/Al – estimativa de substituição de ferro por alumínio nos óxidos da fração argila, segundo a fórmula: $(Al_{oFe}/27)/[(Al_{oFe}/27) + (Fe_c/56)]$, em que $Al_{oFe} = Al_d - Al_o$ e $Fe_c = Fe_d - Fe_o$.

(Schwertmann & Taylor, 1989). No entanto, excetuando os valores observados no Neossolo, os demais valores são inferiores àqueles observados por Kitagawa (1983) e Silva (1999), estudando solos da região. Os valores reportados estão normalmente associados a ambientes de solos ligeiramente ácidos, eutróficos e sujeitos à inundação sazonal, nos quais a mobilidade do Fe é maior do que a mobilidade do Al (Fitzpatrick & Schwertmann, 1982). Ressalta-se que os valores observados no Neossolo estudado discordam dessa tendência.

Os teores totais de Fe na fração argila apresentam-se relativamente baixos, sendo menores no Plintossolo, o que revela tratar-se de um ambiente onde predomina o processo de remoção, certamente devido às condições redutoras temporais, sem que haja adição de novo material. O Neossolo, por outro lado, continua recebendo periodicamente aporte de novos sedimentos, mantendo o conteúdo de Fe em níveis mais elevados do que aqueles observados no Plintossolo.

Assim como o Fe, o Mn está sujeito às reações de redução e remoção, resultando em baixos valores deste elemento no Plintossolo, sendo este fato observado em todas as frações analisadas. De forma semelhante, os menores teores de Zn foram observados no Plintossolo. Este elemento ocorreu em maior concentração na fração argila, decrescendo nas frações mais grosseiras (Quadro 4). Não se observaram grandes variações, entre solos, nos teores totais de Cd e Ni, mas ressalta-se que os teores foram mais elevados na fração mais fina, decrescendo nas frações mais grosseiras. Não há

diferenças expressivas nos teores de Cu, nos diferentes solos e entre as frações argila e silte. Os teores de Cu são menores na fração areia fina (Quadro 4). O Fe concentrou-se principalmente na fração argila, independentemente das características dos sedimentos e das condições pedogenéticas. Os teores totais de Fe na fração areia fina dos diversos solos são baixos, indicando um material de origem relativamente pobre neste elemento (Quadro 4).

De modo geral, os solos apresentam valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAF) inferiores a 1 mg g⁻¹ de P. Contudo, observa-se um aumento significativo dos valores de CMAF no horizonte B do Plintossolo e do Argissolo Amarelo Ta alumínico (Quadro 5). Este fato pode ser atribuído principalmente ao aumento do teor de argila e, ainda, à ocorrência de plintita. É provável que ácidos orgânicos produzidos durante a decomposição da matéria orgânica diminuam a adsorção de fosfato nos horizontes superficiais mais ricos em matéria orgânica, o que, segundo Easterwood & Sartain (1990), pode ser atribuído à competição por sítios de adsorção. Os valores observados neste estudo são consistentes aos observados por Morais et al. (1995) e Silva (1999) em solos da região.

No Neossolo, observa-se comportamento contrário daquele encontrado para os demais solos. Isto é, no horizonte superficial, onde o teor de matéria orgânica é mais elevado, observa-se maior valor de CMAF do que os horizontes subsuperficiais. Neste caso, provavelmente, a atuação dos óxidos de ferro de menor cristalinidade sobrepõe-se aos demais

Quadro 4. Concentração de elementos-traços nas frações: argila, silte e areia fina de horizontes selecionados dos solos estudados

Solo	Horizonte	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr
		g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹					
		Fração argila						
PAva	A	53	1.031	67	226	16	90	0
	2C ₂	66	575	81	230	15	100	0
FTa	A	33	141	92	198	14	100	0
	C	30	38	72	170	14	88	0
RUve	A	51	210	64	217	12	93	0
	3C ₃	73	1.205	130	281	14	102	0
		Fração silte						
PAva	A	10,5	505	69	53	9	76	0
	2C ₂	10,6	518	95	74	7	75	0
PAva	A	3,3	34	72	24	4	67	0
	C	11,9	48	80	39	6	69	0
RUve	A	25,2	254	83	115	6	87	0
	3C ₃	25,0	279	60	86	6	83	0
		Fração areia fina						
PAva	A	11,8	304	10	33	9	43	0
	2C ₂	14,6	624	15	67	8	42	0
FTa	A	1,9	63	30	13	8	34	0
	C	19,4	34	36	22	9	31	0
RUve	A	30,5	1.470	36	60	15	78	0
	3C ₃	25,0	476	28	83	10	49	0

Solo: RUve – Neossolo Flúvico Ta eutrófico; PAva – Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto; FTa – Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto.

Quadro 5. Teor de argila, capacidade máxima de adsorção de fosfato, fósforo remanescente, equações de regressão linear Ce/q como função de Ce, valor da energia de adsorção para os solos estudados

Horizonte	Argila	CMAF	P-rem.	Equação*	R ²	"a"
	%	mg g ⁻¹ P	mg L ⁻¹			
Argissolo Amarelo Ta alumínico abrupto						
A	36	0,40	34,42	Ce/q = 7,9556 + 2,5128 Ce	0,985	0,3158
Bt	60	1,66	nd	Ce/q = 2,8059 + 0,5946 Ce	0,951	0,2119
C	39	0,73	36,33	Ce/q = 0,9872 + 1,3281 Ce	0,988	1,3452
Plintossolo Argilúvico alumínico abrupto						
A	18	0,52	34,03	Ce/q = 3,5912 + 1,8916 Ce	0,990	0,5268
Bt	52	1,99	5,86	Ce/q = 2,7994 + 0,4928 Ce	0,974	0,1760
Neossolo Flúvico Ta eutrófico						
A	30	0,77	21,37	Ce/q = 2,1993 + 1,2993 Ce	0,987	0,5907
3C ₃	12	0,21	50,00	Ce/q = 12,6010 + 4,669 Ce	0,988	0,3726

Ce: Concentração da solução de equilíbrio ($\mu\text{g mL}^{-1}$ de P) e q: Quantidade de P adsorvido (mg cm^{-3}). *Todos os coeficientes lineares significativos a 1%. nd: não-determinado.

agentes que influenciam a adsorção de fosfatos, resultando em maior adsorção no horizonte superficial.

Carbono orgânico total (COT)

Os teores de COT no horizonte superficial foram superiores a 2,0 dag kg⁻¹ (Quadro 6), sem variações

Quadro 6. Carbono orgânico total (COT), fração ácido fúlvico (FAF), fração ácido húmico (FAH), fração humina e relação FAF/FAH dos solos estudados

Horizonte	COT	FAF	FAH	Humina	FAH/FAF
————— dag kg ⁻¹ —————					
Argissolo Amarelo ta alumínico abrupto					
A	2,36	0,36	0,24	1,73	0,67
2C ₂	0,11	0,09	0,0	0,29	0,00
Plintossolo Argilúvico alumínico abrupção					
A	2,10	0,31	0,52	1,04	1,68
C	0,16	0,03	0,04	0,36	1,33
Neossolo Flúvico Ta eutrófico					
A	2,07	0,26	0,26	1,38	1,00
3C ₃	0,28	0,04	0,01	0,31	0,25

expressivas ao longo de toda a topossequência. Mesmo nos solos de drenagem mais restrita (Plintossolo), ou sujeitos à inundação sazonal (Neossolo), onde o processo de decomposição da matéria orgânica é mais lento durante parte do ano. O fracionamento das substâncias húmicas revelou o predomínio da fração humina sobre as demais frações (Quadro 6). A relação fração ácidos húmicos/fração ácidos fúlvicos não mostrou um comportamento típico, sendo mais baixa no Argissolo Amarelo Ta alumínico, o que, neste caso, pode ser atribuído a uma taxa mais elevada de decomposição da matéria orgânica, predominando no ambiente húmicas e ácidos fúlvicos (Mendonça & Rowell, 1996).

CONCLUSÕES

1. De modo geral, os solos estudados apresentam maior riqueza de nutrientes e de minerais silicatados e menor grau de intemperismo, em comparação aos solos mais bem drenados da parte oriental da Amazônia, derivados de sedimentos mais antigos e de rochas cristalinas.

2. Os baixos teores de Fe e Mn no Plintossolo em todas as frações analisadas, em comparação aos demais solos da topossequência, indicam o predomínio de processos de remoção nesse ambiente, enquanto no Neossolo a remoção é superada pela deposição de novos sedimentos, possibilitando a ocorrência em níveis elevados desses elementos.

3. Os valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato são baixos nos horizontes superficiais, mas tornam-se elevados nos subsuperficiais mais ricos em argila e com ocorrência de plintita, podendo

representar, em caso de exposição desses, um fator limitante ao cultivo agrícola.

LITERATURA CITADA

- Ab'SÁBER, A.N. A Amazônia: do discurso à práxis. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1996. 319p.
- ALLEN, B.L. & HAJEK, B.F. Mineral occurrence in soil environments. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Mineral in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.199-278.
- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. R. Bras. Ci. Solo, 14:49-55, 1990.
- COFFIN, D.E. A method for the determination of free iron in soils and clays. Can. J. Soil Sci., 43:7-17, 1963.
- EASTERWOOD, G.W. & SARTAIN, J.B. Clover residue effectiveness in reducing orthophosphate sorption in ferric hydroxide coated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1345-1350, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FITZPATRICK, R.W. & SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – An indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. Geoderma, 27:335-347, 1982.
- GIBBS, J.R. The geochemistry of the Amazon Basin. San Diego, University of California, 1964. 95p. (Tese de Doutorado)
- IRION, G. Die entwicklung des zentral-und obeamazonischen tieflands im spat-pleistozän und im holozän. Kiel, Amazoniana, 6:67-79, 1976.
- IRION, G. Clay minerals of Amazonian soils. In: The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. SIOLI, H., ed. Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. p.537-579 (Monographiae biologicae, v. 56)
- IRIONDO, M.H. Geomorfologia da planície amazônica. In: SIMPÓSIO DO QUATERNÁRIO DO BRASIL, 4., São Paulo, 1982. p.323-348.
- KÄMPF, N. & CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.107-138.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. Clays Clay Miner., 30:401-408, 1982.
- KITAGAWA, Y. Goethite and hematite in some soils from the Amazon region. Soil Sci. Plant Nutr., 29:209-217, 1983.

- KITAGAWA, Y. & MÖLLER, M.R.F. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. *Pesq. Agropec. Bras.*, 14:201-208, 1979.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L., ed. *Methods of Soils Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, Soil Science Society of American, 1996. p.869-919.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- LIMA, H.N. *Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 176p. (Tese de Doutorado)
- LIPS, J.M. & DUIVENVOORDEN, J.F. Regional patterns of well drained upland soil differentiation in the middle Caquetá basin of Colombian Amazonia. *Geoderma*, 72:219-257, 1996.
- LOVLEY, D.R. Microbial reduction of iron, manganese, and other metals. *Adv. Agron.*, 54:175-231, 1995.
- MARQUES, J.J.G.S.M.; TEIXEIRA, W.G.; SCHULZE, D.G. & CURI, N. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region. *Clay Miner.*, 37:651-661, 2002.
- MENDONÇA, E.S. & ROWELL, D.L. Mineral and organic fractions of two oxisols and their influence on effective cation-exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1888-1892, 1996.
- MÖLLER, M.R.F. Mineralogia de argilas de solos da região Amazônica brasileira. In: *SIMPÓSIO DO TRÓPICO ÚMIDO*, 1., Belém, 1984. Anais. Belém, Embrapa-CPATU, 1986. p.214-223.
- MÖLLER, M.R.F. *Substituição isomórfica em óxidos de ferro de Latossolos da Amazônia e suas implicações na sorção de fósforo*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1991. 70p. (Tese de Doutorado)
- MORAIS, F.I.O.; MARTINS JUNIOR, H.B.; TEIXEIRA NETO, J.F. & COUTO, W.S. Fixação de fósforo em Plintossolo da Ilha de Marajó (PA). *B. FCAP*, 26:67-76, 1995.
- RADAMBRASIL. *FOLHA SB19 JURUÁ*. Ministério das Minas e Energia – Departamento Nacional da Produção Mineral. *Levantamentos de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro, 1977. Vol. 15.
- REGO, R.S. *Caracterização e gênese de solos com plintita da Ilha de Marajó*. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986, 156p. (Tese de Mestrado)
- SANTOS, J.O.S. A parte setentrional do cráton amazônico (escudos das Guianas) e a bacia Amazônica. In: *Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais*, escala 1:2.500.000. SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R. & ASMUS, H.E. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1984. p.57-91.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; LIMA, H.N.; VALE JÚNIOR, J.F. & MELLO, J.W.V. *Uso dos solos e alterações da paisagem na Amazônia: cenários e reflexões*. B. Museu Para. Emílio Goeldi, Sér. Ci. Terra, 12:63-104, 2000.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bondes durch photochemische extraktion mit saurer ammonium-oxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernahr*, 105:194-202, 1964.
- SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:251-255, 1983.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.
- SILVA, J.R.T. *Solos do Acre: caracterização física, química e mineralógica e adsorção de fosfato*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 117p. (Tese de Doutorado)
- SIOLI, H. Alguns resultados e problemas da limnologia amazônica. Belém, IPEAN, 1951. p.3-44. (IPEAN. Boletim Técnico, 24)
- SOMBROEK, W.G. *Amazon soils; a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Wageningen, Centre for agricultural publications and documentation, 1966. 262p.
- SWIFT, R.S. Organic matter characterization. In: *Methods of Soils Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SPARKS, D.L., ed. Madison, Soil Science Society of American, 1996. p.1011-1069.
- UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Version 3.0*, 1996. 693p. (Soil Survey Investigations Report, 42)
- WHITTIG, L.D. & ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.331-362.
- WILKE, B.M. & ZECH, W. Mineralogies of silt and clay fractions of twelve soil profiles in Bolivian Andes (Callavaya region). *Geoderma*, 39:193-208, 1987.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:13:1467-1476, 1988.