

# Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari - AM

Adriana Maria Coimbra HORBE<sup>1</sup>, Mara Rúbia Pereira de PAIVA<sup>2</sup>, Marcelo Batista MOTTA<sup>1</sup> e Marco Antonio HORBE<sup>3</sup>

## RESUMO

O estudo do intemperismo das rochas é uma ferramenta indispensável para entender a evolução paleoambiental do Cenozóico na Amazônia. Com esse objetivo foram estudados seis perfis intempéricos desenvolvidos a partir da Formação Solimões e um perfil do Quaternário da várzea do rio Solimões, no centro-leste do estado do Amazonas. As informações obtidas permitiram determinar o grau de evolução intempérica na região, além das suas características estruturais, mineralógicas e químicas. Os perfis desenvolvidos sobre a Formação Solimões são constituídos, de baixo para cima, pelos horizontes saprolítico (C), mosqueado (B) e solo (A), enquanto o perfil sobre a sedimentação quaternária é estruturado nos horizontes saprolito (C) e solo (A). São argilo-arenosos a areno-argilosos, cinzentos, amarelados, avermelhados e esbranquiçados e compõem-se de quartzo, caulinita, muscovita, illita e esmectita. Segundo as suas características os perfis são divididos em dois grupos: 1) perfis 2, 3, 4 e 5: são areno-argilosos, tem altos teores de SiO<sub>2</sub>, Hg e Zr e estão associados unicamente à Formação Solimões; 2) perfis 1, 6 e 7: são pelíticos, têm maiores conteúdos em esmectita, illita, muscovita, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, álcalis e elementos-traço, especialmente de Ba, Co, Li, Ni, Sr, V, Y e Zn, e agrupam parte dos perfis sobre a Formação Solimões e o sedimento quaternário. A semelhança geoquímica entre este último e parte dos perfis sobre a Formação Solimões sugere que esta pode ser a fonte pelo menos de parte do material depositado na várzea. O conjunto das características demonstra que os horizontes dentro de cada perfil são muito semelhantes entre si e, portanto, pouco evoluídos, apesar do clima atual quente e chuvoso da região de Coari (2300 mm.ano<sup>-1</sup>) promover intensa lixiviação. Conseqüentemente, por serem derivados dos sedimentos mais jovens da Bacia do Solimões, e, portanto sob ação recente do intemperismo, pode-se afirmar que a unidade que deu origem aos perfis na Formação Solimões foi exposta no Quaternário e que estes se encontram em desequilíbrio com as condições agressivas de lixiviação do ambiente laterítico reinantes na Amazônia pelo menos desde o Paleógeno.

## PALAVRAS-CHAVE

Neossols, formação do Solimões, lateritização.

## *Mineralogy and geochemistry of Neogene and Quaternary sediment profiles from the Solimões Basin in the region of Coari, Amazonas*

## ABSTRACT

*To shed light on lateritic evolution, six profiles were studied of weathered sediment developed on the Solimões Formation and one profile on Quaternary floodplain deposits of the Solimões River within the Solimões basin in the center-east of Amazonas State. The profiles on the Solimões Formation are comprised upwards of saprolitic (C), mottled (B) and soil (A) horizons, while the profile on the Quaternary floodplain sediments has only the saprolitic (C) and soil (A) horizons. All profiles are clayey-sands to sandy-clays, grey, yellowish, reddish or whitish and predominantly composed of quartz, kaolinite, muscovite, illite and smectite. Based on their textural, mineralogical, and chemical characteristics, the profiles are divided into two groups. Profiles 2, 3, 4 and 5 are sandy-clays, have high contents of SiO<sub>2</sub>, Hg and Zr and are only associated with the Solimões Formation; Profiles 1, 6 and 7 are pelitic, have higher contents of smectite, illite and muscovite, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alkalis and trace-elements, especially Ba, Co, Li, Ni, Sr, V, Y and Zn, and are found on both the Solimões Formation and the Quaternary floodplain sediments. This suggests that the Solimões Formation was the source for some of the Quaternary floodplain sediments in the region. The set of mineralogical and chemical characteristics indicates a similarity between horizons within each profile. The profiles on the Solimões Formation are not highly weathered, despite the hot and rainy climate prevailing in the Coari region (2300 mm.year<sup>-1</sup>), which would favor intense leaching. Therefore the studied profiles are in disequilibrium with the lateritic environment in Amazonia.*

## KEY-WORDS

*Neossols, Solimões Formation, lateritization.*

<sup>1</sup> Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Avenida General Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 3000 – Japiim. CEP: 69077-000 Manaus, AM e-mail: ahorbe@ufam.edu.br

<sup>2</sup> Autônoma

<sup>3</sup> Serviço Geológico do Brasil, Avenida André Araújo 2160, Aleixo, 69060-001, Manaus – AM.

## INTRODUÇÃO

Na Amazônia predominam Latossolos e Argissolos associados ao topo de perfis lateríticos desenvolvidos sobre rochas intensamente intemperizadas em condições de clima tropical sazonal quente e úmido (Costa, 1991; Truckenbrodt *et al.*, 1991). Na Amazônia Ocidental as Formações Alter do Chão, PA e Novo Remanso são as unidades mais recentes da Bacia do Amazonas afetadas pela lateritização (Fernandes Filho *et al.*, 1996; Horbe *et al.*, 2001; Horbe *et al.* 2005). Perfis dessas unidades ocorrem ao longo do quase todo o rio Amazonas até um pouco a oeste da confluência do Solimões com o Negro (Figura 1). O rio Solimões ocorre encaixado em rochas sedimentares da Formação Solimões da bacia homônima, bem como em depósitos quaternários que formam a várzea desse rio (Nogueira *et al.*, 2003; Rossetti *et al.*, 2005). Há poucos trabalhos sobre as características desses sedimentos (Konhauser *et al.*, 1994; Kronberg *et al.*, 1998; Rossetti *et al.*, 2005) e sobre os perfis resultantes de seu intemperismo e não há relatos da presença de

crostas lateríticas (Rosolen *et al.*, 2002; Radambrasil, 1978) o que indica que o intemperismo na Amazônia Ocidental foi pouco expressivo. Portanto, este trabalho tem por objetivo a caracterização geoquímica dos perfis da Formação Solimões e dos sedimentos quaternários que formam as escarpas do rio Solimões, na região centro-leste da Bacia do Solimões (Figura 1), com vistas a contribuir no estudo das transformações dos sedimentos Neógenos e Quaternários sob as condições climáticas quentes e úmidas reinantes na região.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados 7 perfis para este estudo, localizados ao longo das principais drenagens da área, dos quais 6 se desenvolveram a partir da Formação Solimões (lago de Coari – perfis 1, 2, 3 e 4; lago Mamiá – perfil 5; lago Urucu – perfil 6) e um a partir dos sedimentos quaternários da várzea do rio Solimões (perfil 7).

Após a coleta, as amostras foram secas e descritas, com ênfase nas características texturais e de cor. Em seguida, foram feitas análises granulométricas, mineralógicas via difração por raios-x (DRX) e químicas. A análise granulométrica consistiu, inicialmente, na separação do material pelítico com peneira de 0,062 mm. As duas frações obtidas (<0,062 mm e >0,062 mm) foram secas em estufa e a fração mais grossa foi submetida a novo peneiramento, desta vez a seco, nas seguintes malhas granulométricas: 1; 0,5; 0,25 e 0,125 mm. A fração pelítica foi tratada com pirofosfato de sódio e as frações silte e argila separadas por decantação. O objetivo deste procedimento foi identificar os

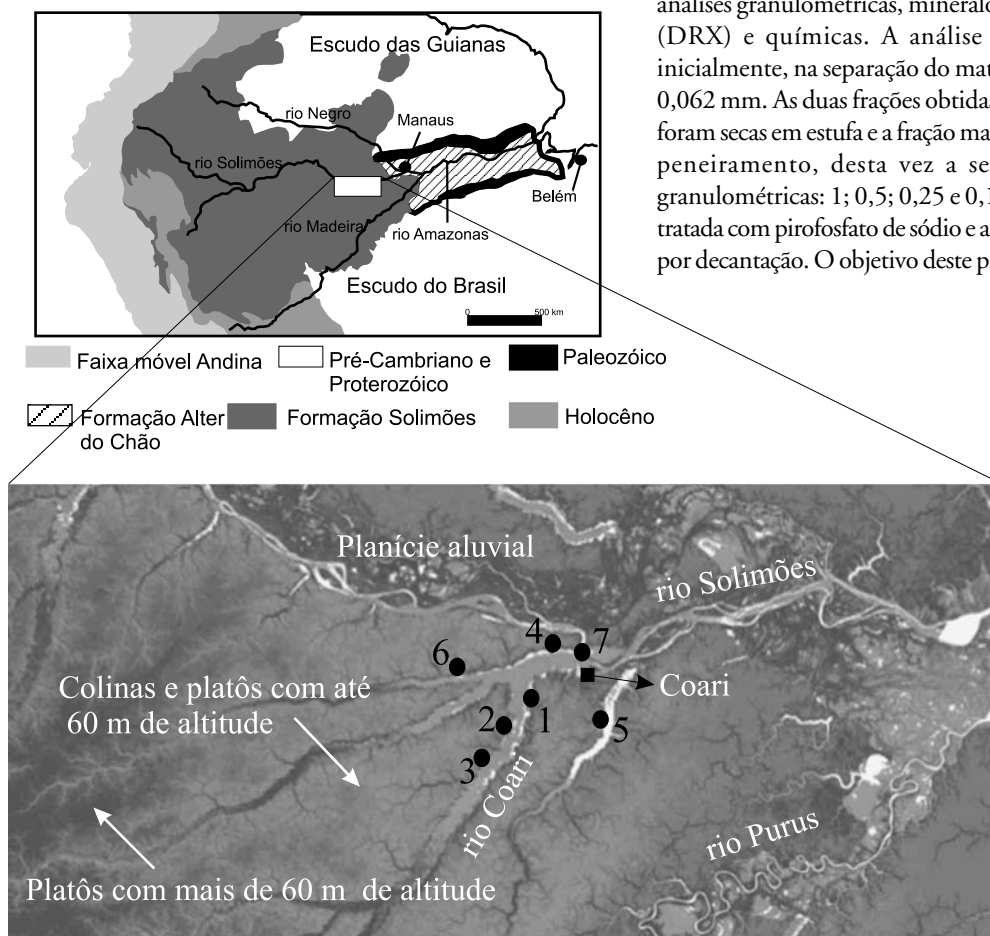


Figura 1- Mapa geológico e de localização da área de estudo

argilominerais com base nos difratogramas de raios-x em condições naturais com os submetidos à adsorção de etilenoglicol e aquecidos a 500 °C por 5 horas. As análises de DRX foram realizadas em equipamento Shimadzu XRD 6000, equipado com anodo de Cu, e com intervalo de leitura entre 5° a 60° 2θ.

As análises químicas para os óxidos maiores totais foram feitas via abertura ácida e fusão alcalina em todas as amostras. Por fusão, foram determinados, por gravimetria, SiO<sub>2</sub>; por calcinação, PF (perda ao fogo); por titulação, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e C orgânico; por colorimetria, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Na solução ácida foram dosados, por espectrometria de absorção atômica, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO e MgO. Os elementos trocáveis foram analisados nos perfis 4 (sobre a Formação Solimões) e 7 (sobre o sedimento quaternário), que representam aqueles onde a variação dos teores de álcalis é mais elevada. Foram obtidos por extração com KCl 1M (Ca, Mg e Al) e com HCl 0,05M e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125M (P, K e Na). Todas essas análises descritas foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas. Os elementos traços Cu, Pb, Zn, Zr, Ni, Co, Cr, B, Ba, Be, Bi, Cd, Li, Mo, Sc, Sr, Sn, V, W e Y foram analisados por plasma de indução acoplada; Ag, As e Sb por absorção atômica, sendo os dois últimos com geração de hidretos, todos na Lakefield Geosol Ltd em Belo Horizonte. O Hg foi analisado também por absorção atômica a partir da geração de vapor frio nos laboratórios do Instituto Evandro Chagas – FUNASA, em Belém do Pará.

A diferenciação geoquímica dos perfis foi definida por análise de componentes principais com o programa Statistica 5.1. Esse método permite determinar as correlações entre os dados (variáveis) que são expressas em fatores. Cada fator é representado por valores que informam as cargas de correlação entre as variáveis. Para a expressão dessas cargas utilizou-se um diagrama XY.

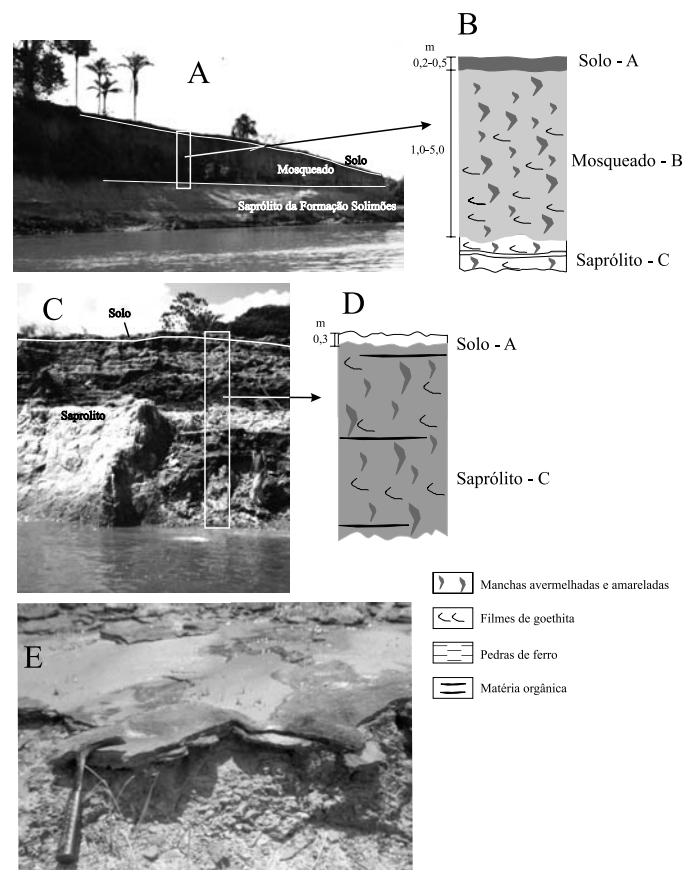
#### GEOLOGIA E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

A bacia do rio Solimões, localizada na porção central do Estado do Amazonas, entre os arcos de Iquitos e Purus, foi, até o Mioceno, palco de sedimentação que culminou com a deposição da Formação Solimões. No Neógeno, com a consolidação da cadeia andina, houve inversão da drenagem de oeste para leste, com o estabelecimento da atual bacia do rio Solimões (Hooghiemstra & Hammen, 1998), e ao longo do seu curso, em consequência dos seus meandros e da grande quantidade de material carregado em suspensão, houve deposição de sedimentos quaternários.

Apesar de Rossetti *et al.* (2005) considerar os sedimentos desta região como depósitos quaternários, é a Formação Solimões que ocorre ao longo das escarpas mais altas de parte dos rios Solimões, Coari e Purus (Figura 2). Esta é constituída por argilitos friáveis cinza a cinza esverdeados, com finas intercalações de areia, tendendo a ser mais arenoso no topo. Recobrimdo esta unidade ocorre a Formação Içá, que também é constituída de sedimentos arenosos inconsolidados de coloração esbranquiçadas e argilitos cinza a amarelados (Maia, 1977; Radambrasil, 1978). A

sedimentação quaternária configura os depósitos arenosos e argilosos das várzeas e ilhas do rio Solimões, também forma escarpas, porém de menor altura. Na Formação Solimões e nos depósitos quaternários, é comum a presença de matéria orgânica, como restos de folhas e troncos.

Os perfis da Formação Solimões estudados se encaixam na unidade geomorfológica de colinas e platôs rebaixados com até 60 m de altitude, enquanto o do Quaternário faz parte da planície aluvial atual do rio Solimões (Figura 1). A região de Coari é caracterizada pela ausência de período seco no ano e por chuvas mais intensas entre dezembro e maio, com totais anuais da ordem de 2300 mm e temperatura média de 26 °C. A cobertura vegetal é do tipo floresta tropical densa. A malha hidrográfica da área é formada pelos rios Coari e seus afluentes, o Urucu e o Arauá, que deságuam na margem direita do rio Solimões, onde está localizada a cidade de Coari; e pelo rio Mamiá, cuja confluência com o Solimões ocorre mais à jusante (Figura 1). Esses rios menores formam lagos tipo *ria*.



**Figura 2** - Escarpa no rio Solimões (A), perfil esquemático desenvolvido sobre da Formação Solimões no rio homônimo (B), escarpa (C) e perfil esquemático do Neossolo (D); pedras de ferro no saprólito da Formação Solimões (E).

### CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS

Nas escarpas dos rios percorridos ocorrem as melhores exposições dos perfis (Figura 2). Estas apresentam até 15 m de altura nos desenvolvidos sobre a Formação Solimões, mas os sedimentos desta unidade nem sempre estão expostos, pois, muitas vezes, ocorrem feições de escorregamento o que dificulta a observação de perfis completos. Os perfis estão estruturados, de baixo para cima, nos horizontes da rocha-mãe (Formação Solimões), saprólito, mosqueado e solo (Figura 2B). O saprólito, genericamente correlato ao horizonte C dos perfis de solo, é argilo-arenoso a areno-argiloso, tem coloração cinza clara a amarelada e, em geral, exibe abundantes manchas de cores amareladas a avermelhadas, produto do acúmulo de óxi-hidróxidos de ferro, com dimensões que variam de 5 mm a 15 mm. Ocorrem filmes de goethita recobrimdo os canais de percolação de água o que indica intensa migração de ferro. Neste horizonte também são comuns as pedras de ferro (iron stone) constituídas por goethita e, subordinadamente, hematita, que cimentam grãos de quartzo de até 2 mm de diâmetro (Figura 2E). Formam placas sinuosas com 1 a 5 cm de espessura e ocorrem na zona de flutuação atual do nível de água subterrânea, no contato de zonas arenosas e argilosas com diferentes permeabilidades.

O horizonte mosqueado ou horizonte B mantém a textura areno-argilosa a argilo-arenosa do horizonte saprolítico, tem espessura de 1,0 m a 5,0 m. Tem estrutura maciça, apresenta coloração de cinza a laranja avermelhado com filmes marrom-amarelados de goethita e manchas mais avermelhadas e amareladas que o fundo matricial. Em relação ao saprólito, estas são mais intensas, mais abundantes e interligadas.

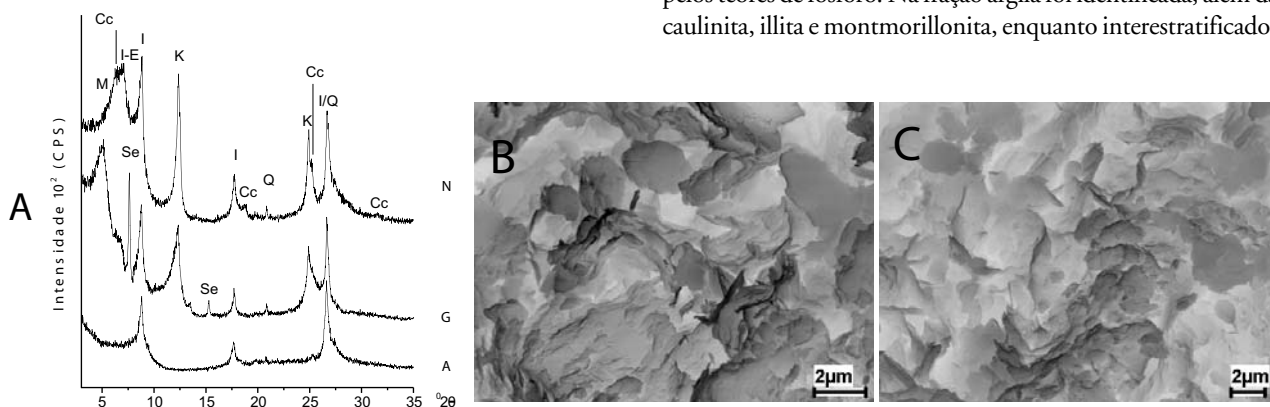
O solo ou horizonte A, com 0,2 a 0,5 m de espessura, tem textura similar ao horizonte mosqueado, mas exibe cor marrom a cinza escuro, é estruturado em blocos com prismas colunares a anisoformes, tendendo a microagregado no topo. Somente no perfil 6 foram encontrados nódulos ferruginosos, de 0,5 a 1 cm de diâmetro, caracterizando maior enriquecimento em ferro.

Os sedimentos quaternários que, preferencialmente, ocorrem nas várzeas do rio Solimões mostram incipiente estruturação de horizontes e são classificados como Neossolos Flúvicos (Figura 2B e C). O saprólito do perfil estudado, ou o horizonte C, é texturalmente argilo-arenoso, contém restos de matéria orgânica, tem coloração cinzenta com manchas amareladas e filmes de goethita formados pela percolação de água e é nítida a preservação da laminação da rocha-mãe. O horizonte de topo, ou A, tem no máximo 0,30 m de espessura, constituição argilo-arenosa, friável, coloração cinza clara, localmente esbranquiçado.

### CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS E MINERALÓGICAS

Em quase todos os perfis predomina a fração pelítica (< 0,062 mm), que representa pelo menos 38% do material total. A areia fina (0,25 - 0,125 mm) a muito fina (0,125 - 0,062 mm) perfaz no máximo 52 % no saprólito e 47 % no solo. A areia grossa (> 1 mm) representa menos que 1 %, exceto no saprólito de alguns perfis onde ocorrem pedras de ferro, neste caso, essa fração alcança 70 % do material e é composta por fragmentos derivados do seu quebramento *in situ*. Dentre as frações, a areia fina e a média são as que apresentam maior variação de proporção, entre 2 e 60 % do material total, especialmente nos perfis 2 e 4. Em apenas dois perfis a fração pelítica predomina no solo e no horizonte mosqueado, o que pode indicar provável corrosão/dissolução do quartzo, contudo, devido a incipiente diferenciação entre os horizontes dos perfis, esse fato deve estar ligado a variação granulométrica herdada da rocha sedimentar. No Neossolo (perfil 7) a fração pelítica é a predominante (entre 60 e 97 %) seguida da areia fina com até 50%, o horizonte de topo é composto basicamente de areia fina e pelito, em proporções similares.

Nos difratogramas de raios-X de amostra total de todos os perfis estudados, quartzo e caulinita são os minerais mais abundantes, seguidos de muscovita. Hematita, goethita e anatásio ocorrem em baixas proporções, pois apenas a reflexão de 100 % desses minerais (33,152 - 21,240 - 25,156 °2θ, respectivamente) foi identificada. A presença de apatita é sugerida pelos teores de fósforo. Na fração argila foi identificada, além da caulinita, illita e montmorillonita, enquanto interestratificados



**Figura 3** - A - Difratogramas de raios-x da fração argila na condição de seca ao ar, glicolada e aquecida (Cc - clinocloro, M - motmorillonita, I - illita, K - caulinita, Se - sepolita, I-E - interestratificado illita-esmectita, I/Q - illita e quartzo e Q - quartzo); B e C cristais de caulinita do saprólito.

illita-esmectita, clinocloro, sepiolita e clorita-vermiculita estão restritos aos sedimentos da Formação Solimões (Figura 3A). Em condições normais (seca ao ar), a caulinita apresentou reflexões apenas em 12,21 e 24,99 °2θ, o que indica seu baixo ordenamento cristalográfico. A illita é identificada em 8,74; 17,72 e 26,68°2θ; a sepiolita, em 7,54°2θ; a clorita-vermiculita em 6,32°2θ; o clinocloro em 18,76°2θ e interestratificado em 6,42°2θ. A montmorillonita foi identificada após ser submetida à adsorção de etilenoglicol que descolou a sua reflexão entre 6° e 7°2θ coincidente com a do clinocloro e do interestratificado para 4.98°2θ. Os demais argilominerais mantiveram suas reflexões por não serem expansivos. Ao serem aquecidos a 550 °C, somente a illita manteve suas reflexões e os demais tiveram suas estruturas destruídas (Figura 3A). Nas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi identificada somente caulinita, que ocorre

na forma de cristais planares com bordas arredondadas, sugerindo origem detrítica (Figura 3).

## CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

### ÓXIDOS MAIORES E MENORES

Os resultados das análises químicas totais dos sete perfis estudados indicam conteúdos de SiO<sub>2</sub> entre 42% e 79%, como principal componente, especialmente nos perfis 2, 4 e 5, seguido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre 1% e 27% (Tabela 1). O Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varia entre 2% e 10%, exceto no saprólito do perfil 1, onde perfaz 35% (Tabela 1), valor esse justificado pela intensa impregnação por ferro provocada pela presença de um nível de pedra de ferro nesse horizonte. A perda ao fogo (PF) varia entre 2% e 9%, sendo geralmente mais elevada no saprólito o que é justificado pela

**Tabela 1** - Composição química dos perfis estudados em % em peso.

Horizontes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C orgânico	Total*
Perfis sobre a Formação Solimões												
Perfil 1												
Solo	73,9	13,18	4,06	5,49	1,09	0,15	0,42	0,22	0,88	0,34	0,61	99,72
Mosqueado	66,01	20,25	4,73	5,98	0,55	0,13	0,36	0,25	1,23	0,26	3,50	99,75
Mosqueado	65,77	20,84	5,39	5,52	0,59	0,12	0,27	0,24	1,13	0,20	1,21	100,07
Saprólito	67,01	17,89	3,84	6,44	0,37	0,81	1,56	0,23	1,05	0,23	4,90	99,43
Saprólito	42,14	12,18	35,11	9,18	0,27	0,07	0,17	0,19	0,51	0,67	0,15	100,40
Perfil 2												
Solo	79,15	11,28	3,22	5,49	0,89	0,07	0,08	0,01	0,17	0,63	3,40	100,99
Solo	72,11	15,9	4,54	6,19	0,65	0,12	0,27	0,01	0,17	1,05	3,03	101,01
Solo	72,13	16,8	4,41	5,65	0,60	0,07	0,16	0,02	0,17	0,66	3,22	100,67
Mosqueado	78,03	12,92	3,17	3,61	1,08	0,06	0,05	0,16	0,14	0,31	1,27	99,53
Mosqueado	71,58	19,84	3,30	4,27	0,38	0,14	0,09	0,21	0,22	0,32	0,50	100,35
Perfil 3												
Solo	69,37	19,04	5,17	5,82	0,39	0,12	0,11	0,01	0,28	0,30	3,95	100,61
Solo	63,44	24,75	4,14	5,42	0,32	0,17	0,03	0,03	0,27	0,36	1,27	98,93
Mosqueado	69,46	18,82	3,88	4,32	0,22	1,08	0,49	0,01	0,38	0,19	1,23	98,85
Saprólítico	69,78	19,93	2,83	5,55	0,88	0,75	0,12	0,12	0,31	0,19	1,49	100,46
Perfil 4												
Solo	71,27	12,86	5,45	6,37	4,30	0,08	0,01	0,03	0,20	0,29	0,63	100,85
Solo	73,24	15,38	3,10	5,74	0,54	0,08	0,06	0,03	0,21	1,15	0,88	99,53
Mosqueado	75,77	14,15	2,45	4,84	0,49	0,09	0,05	0,01	0,26	0,84	0,54	98,95
Mosqueado	73,07	16,06	3,48	4,84	0,99	0,09	0,06	0,06	0,28	0,62	0,75	99,55
Mosqueado	74,26	17,48	2,30	3,94	0,40	0,08	0,11	0,06	0,22	0,72	0,54	99,57
Saprólítico	73,23	19,62	2,37	3,22	1,11	0,06	0,03	0,06	0,15	0,50	1,53	100,35
Perfil 5												
Solo	75,81	17,43	2,11	5,37	0,31	0,15	0,10	0,08	0,19	0,46	3,30	101,55
Mosqueado	75,64	18,79	3,67	2,04	0,27	0,08	0,09	0,01	0,11	0,40	8,80	100,70
Mosqueado	72,50	19,30	2,27	5,23	0,30	0,11	0,14	0,03	0,17	0,40	0,84	100,05
Perfil 6												
Solo	60,25	23,29	9,59	6,81	0,35	0,08	0,14	0,01	0,36	1,02	1,49	101,90
Solo	62,23	27,62	2,98	6,44	0,33	0,12	0,26	0,01	0,40	1,95	0,84	102,34
Mosqueado	68,81	18,44	5,57	6,21	0,34	0,12	0,18	0,01	0,37	1,02	0,75	101,07
Mosqueado	65,25	24,06	2,43	6,78	0,33	0,10	0,26	0,01	0,71	1,17	1,01	101,10
Saprólítico	47,19	12,03	30,26	8,10	3,15	0,05	0,16	0,02	0,38	0,50	0,93	101,84
Perfil sobre o sedimento quaternário												
Perfil 7												
Horizonte A	62,08	24,66	6,45	5,27	0,34	0,09	0,32	0,4	1,59	1,99	1,53	103,19
A	69,92	20,89	2,65	4,43	0,29	0,12	0,25	0,3	1,11	2,96	1,82	102,92
C	61,96	24,38	6,45	5,73	0,33	0,13	0,33	0,24	1,18	1,18	0,33	101,91
C	66,76	20,59	6,43	5,72	0,30	0,14	0,27	0,29	1,25	0,90	1,64	102,65
C	63,99	21,16	4,67	7,73	0,28	0,11	0,22	0,22	0,56	2,82	0,08	101,76

\* somatória exceto o C orgânico.

**Tabela 2** - Resultados em ppm dos elementos disponíveis nos perfis 4 e 7.

Perfil/Horizontes	Al	Na	K	Ca	Mg	P
Perfil 4						
Solo	1039	69	234	9	14	1
Solo	947	69	219	6	7	0
Mosqueado	847	69	1815	7	76	5
Mosqueado	747	71	582	6	21	1
Mosqueado	998	71	340	6	12	2
Saprólito	378	69	302	11	13	0
Formação Solimões	847	64	154	7	29	1
Perfil 7						
A	94	69	967	1106	954	5
A	178	71	662	938	944	4
C	278	69	482	1639	1093	3
C	178	69	1245	889	1011	5
C	94	69	755	1154	980	3

maior proporção de argilominerais. Dentre os álcalis, o MgO é o que apresenta teores mais elevados, especialmente nos perfis 1 e 7 (entre 0,51% e 1,59%). O Na<sub>2</sub>O é o mais baixo nesses dois perfis, enquanto o CaO é o mais alto e o K<sub>2</sub>O acompanha o MgO, mas com teores mais baixos. O valor máximo de TiO<sub>2</sub> é 4,3% no solo do perfil 4, enquanto P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, em geral é inferior a 1%, destacam-se somente nos perfis 6 e 7, onde alcança quase 3% no solo. O carbono varia independente do horizonte, entre 0,15% e 8,8% (Tabela 1). Essas características químicas, especialmente os teores elevados em álcalis, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e carbono orgânico, diferenciam estes perfis daqueles desenvolvidos sobre a Formação Alter do Chão, a leste da área estudada, onde o processo laterítico foi responsável pela formação de Latossolos, Argissolos e Espodosolos (Costa, 1991; Truckenbrodt *et al.*, 1991; Leal, 1996; Horbe *et al.*, 2001; Horbe *et al.*, 2004). A pouca variação no conteúdo dos óxidos maiores, exceto Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que nos níveis de *ironstone* do saprólito alcança 36% e nas concreções do solo 9% (Tabela 1), demonstra que há grande homogeneidade química entre os horizontes de cada perfil, inclusive com semelhança entre os perfis 1 e 6 da Formação Solimões com o Neossolo (perfil 7).

Nos perfis 4 e 7, onde foram analisados Al, Na, K, Ca, Mg e P na fase disponível (Tabela 2) e dos quais depende a fertilidade do solo, constata-se que há relação direta entre os conteúdos totais de CaO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e, em parte, de K<sub>2</sub>O, mais elevados, com os também elevados na fase disponível (Tabelas 1 e 2). O Na não apresenta essa correlação, enquanto para o Al ela é inversa, ou seja, os teores totais de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são mais elevados no perfil 7, mas mais baixos na fase disponível, enquanto no perfil 4 ocorre o oposto. Há variações irregulares ao longo dos perfis, especialmente de K, que não se correlaciona com a composição total de K<sub>2</sub>O. Isto pode ser consequência da partição desse elemento tanto na muscovita, mais resistente ao intemperismo,

como na illita. Os conteúdos elevados de Ca, Mg e P na fase disponível do perfil 7 sugerem maior proporção de argilominerais 2:1, que são, dentre os minerais presentes nos perfis, os que têm maior capacidade de adsorção nos seus espaços interplanares, enquanto a pequena variação no teor de Na disponível nos dois perfis reflete a similaridade no teor total desse elemento. O Al disponível, mais elevado no perfil com álcalis mais baixos, reflete o seu enriquecimento residual, por este ser muito imóvel, e eleva a acidez do meio (Tabela 1).

#### ELEMENTOS-TRAÇO

Dos elementos analisados, As, Mo, Sb, Ag, B, Be, Bi, Cd, Sn e W apresentam teores próximos ou abaixo do limite de detecção e somente Pb está acima da média crustal. Os conteúdos de Hg, Co, Li, Y e Zn variam em relação à média crustal (Tabela 3). Em todos os perfis os teores de elementos-traço variam pouco entre os horizontes, com oscilações mais acentuadas para o Hg (14 ppb a 161 ppb), com tendência dos teores acima de 100 ppb estarem no solo, e para o Co (< 8 a 126 ppm), com conteúdos em geral maiores no saprólio (Tabela 3). A ausência de clara partição dos elementos segundo os horizontes reflete a fraca diferenciação mineralógica e química e o baixo enriquecimento em ferro, que é o principal carreador desses elementos no ambiente intempérico.

Os perfis 3, 4 e 5 apresentam as menores concentrações de elementos-traço, especialmente de Ba e Zn; os perfis 1 e 7 exibem as maiores, com destaque para Ba, Co, Li, Ni, Sr (principalmente no perfil 7), V e Zn; enquanto os perfis 2 e 6 têm teores intermediários. Deve-se ressaltar que o Hg é o único elemento cujos maiores teores (até 161 ppb) estão nos perfis com as menores concentrações de elementos-traço (2 a 6). Este fato corrobora os dados que indicam o Hg como mais elevado em perfis mais lixiviados (até 200 ppb - Costa *et al.*, 1999, Oliveira *et al.*, 2000 - 258 ppb), onde tende a se combinar com os óxi-hidróxidos de ferro. Essa correlação com o ferro é observada nas amostras com os teores mais elevados de Hg (Tabelas 1 e 3), contudo, no contexto de todas as amostras analisadas, somente Cu, As e Co tem correlação com o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (r > 0,7). Os demais elementos, que normalmente tem afinidade com o ferro, como o Zn, V, Ni e Pb, não apresentam correlação, provavelmente devido a estarem associados, também, com os argilominerais 2:1, como indica a correlação deles com o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (r > 0,7). Considerando-se que os horizontes/perfis que apresentam maiores conteúdos em álcalis têm também os maiores conteúdos da maioria dos elementos-traço, estes devem estar relacionados, principalmente, à presença de muscovita, illita e esmectita, que ocorrem em todos os perfis estudados.

#### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise estatística multivariada do tipo componente principal dos dados químicos (óxidos maiores e

**Tabela 3** - Concentração dos elementos traço nos perfis estudados em ppm exceto Hg em ppb.

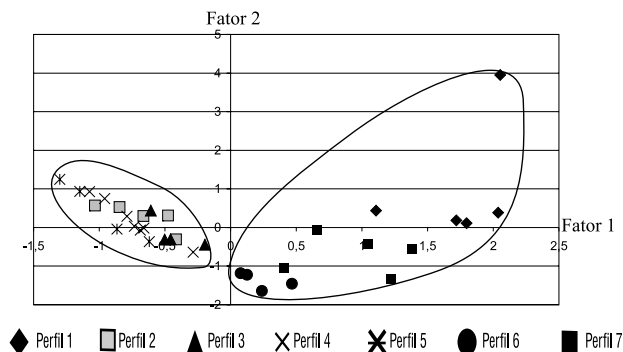
Horizonte	Ba	V	Zr	Zn	Sr	Pb	Y	Cr	Ni	Co	Cu	Li	Sc	Mo	As	Hg
Perfil 1																
Solo	480	113	109	238	74	72	61	62	56	43	38	31	12	6,2	4	29
Mosqueado	525	134	111	326	84	81	48	71	76	59	50	42	14	3,4	5	45
Mosqueado	521	137	131	278	88	76	48	71	72	51	45	40	14	3,4	4	39
Saprólito	425	138	111	309	81	80	32	71	72	42	53	37	14	4,5	4	42
Saprólito	601	96	83	243	44	81	27	62	41	126	75	20	10	1,5	21	62
Perfil 2																
Solo	224	81	142	48	47	55	16	42	5,2	12	28	19	8,6	<3,0	4	94
Solo	270	92	127	68	62	58	13	47	6,7	12	29	20	8,6	<3,0	6	120
Solo	263	111	110	55	66	73	12	53	7,4	11	25	20	11	<3,0	2	150
Mosqueado	162	76	62	26	30	51	6,9	28	5,9	<8,0	14	15	7,9	3,1	2	69
Mosqueado	175	73	58	30	26	57	7,6	33	7,2	<8,0	12	16	7,9	3,8	2	31
Perfil 3																
Solo	173	115	101	35	35	73	11	51	6,9	9,3	21	18	11	3,4	9	95
Solo	184	95	89	33	32	68	11	39	7,7	8,5	19	17	8,6	4,8	3	57
Mosqueado	226	97	90	38	34	75	24	43	7,9	9,4	22	22	11	4,5	4	23
Saprólito	242	98	100	66	36	74	38	42	13	11	28	25	13	5,2	4	22
Perfil 4																
Solo	136	95	140	23	44	55	13	48	4,4	10	17	15	7,9	3,1	3	161
Solo	161	97	115	27	34	67	10	50	5,8	8,9	19	17	9,3	5,5	4	117
Mosqueado	202	95	113	25	35	66	12	46	6,7	9,6	16	18	8,6	4,5	2	59
Mosqueado	195	98	78	33	33	67	10	42	8,1	8,8	18	17	10	4,5	3	49
Mosqueado	182	74	58	34	23	56	7,6	30	7,3	<8,0	13	14	7,1	3,1	2	28
Saprólito	148	62	45	27	21	43	7,3	28	5,7	<8,0	11	13	6,4	<3,0	4	14
Saprólito	241	139	102	51	38	93	15	54	9,6	15	23	20	13	5,9	1	22
Perfil 5																
Solo	135	93	99	21	34	62	9,3	44	7,7	<8,0	15	16	9,3	<3,0	4	124
Mosqueado	134	69	88	22	24	40	7,4	31	7,2	<8,0	12	13	5,7	3,1	1	67
Mosqueado	178	105	96	35	36	68	10	49	9,7	9,4	17	19	11	4,1	2	115
Saprólito	99	47	90	25	23	35	8,8	24	5,8	<8,0	11	14	4,3	<3,0	1	69
Perfil 6																
Solo	237	137	137	49	44	91	15	85	7,6	10	31	25	15	3,4	11	171
Solo	298	122	141	37	49	94	20	62	8,6	13	25	29	14	3,8	4	40
Mosqueado	283	120	110	60	46	94	30	55	15	13	30	32	15	4,1	4	24
Mosqueado	300	122	117	78	49	105	45	64	18	14	29	35	15	6,2	2	31
Saprólito	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Perfil 7																
A	524	114	95	115	206	71	114	54	26	23	44	40	13	3,8	8	59
A	509	94	81	96	218	61	94	46	21	19	35	31	11	<3,0	3	44
C	537	131	100	119	134	89	131	63	24	22	40	49	14	3,1	4	69
C	502	112	94	115	204	72	112	54	25	24	40	39	12	4,8	5	61
C	357	148	101	66	74	85	148	65	15	15	25	38	12	<3,0	5	67
Média crustal	580	150	150	80	300	10	30	100	75	25	50	30	13	1,5	2	200

Sb, Ag<1, Cd<3, B<10, Bi, Sn, W<20; NA – não analisado.

elementos-traço), os elementos que melhor definem as características dos perfis estudados são: SiO<sub>2</sub>, MgO, V, Y, Ba, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Sc e Zn; todos apresentam fatores com carga superior a 0,7 sendo o do SiO<sub>2</sub> negativo e o dos demais positivos. Com base nesses elementos foram definidos dois grupos de amostras, que integrados às análises granulométricas e mineralógicas, refletem dois tipos geoquímicos de perfis (Figura 4): A - Perfis 2, 3, 4 e 5: formam as colinas tabulares da Formação Solimões, apresentam textura arenosa a areno-argilosa, tem teores relativamente mais altos de SiO<sub>2</sub>, em consequência da predominância de quartzo e caulinita, bem como conteúdos mais elevados de Al disponível e mais baixo em álcalis e elementos-

traço. O Hg tem em média as maiores concentrações; B - Perfis 1, 6 e 7: os dois primeiros perfis formam também as colinas tabulares da Formação Solimões e o último o Neossolo da várzea do rio Solimões. Apresentam textura mais peltítica, são geoquimicamente mais heterogêneos que o grupo anterior e se caracterizam por conteúdos mais elevados de esmectita, illita, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e álcalis, especialmente de MgO, e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, e, conseqüentemente, são mais férteis. Contém, também, as maiores concentrações de elementos-traço, especialmente de Ba, Cu, Li, Ni, Pb, Sr, V, Y e Zn.

As características desses dois grupos indicam que os perfis do grupo A são os mais lixiviados e/ou formados, provavelmente, a partir de fácies, mais arenosas, pobres em álcalis e em elementos-



**Figura 4** - Distribuição das amostras segundo os fatores 1 e 2 obtidos por análise de componentes principais.

traço; enquanto que os perfis 1 e 6 do grupo B são mais pelíticos e com maior concentração de álcalis e elementos-traços e, portanto, com menor grau de lixiviação o que sugere também, origem a partir de fácies argilosas da Formação Solimões. A semelhança geoquímica entre o perfil desenvolvido sobre o sedimento quaternário (perfil 7) com os perfis 1 e 6, sobre a Formação Solimões, sugere que não há variações químicas acentuadas entre os dois sedimentos, o que indica que o sedimento quaternário pode ter forte contribuição do material retrabalhado mais antigo.

A ausência de interestratificados illita-esmectita, clinocloro, sepiolita e clorita-vermiculita no saprólito, mosqueado e solo nos perfis sobre a Formação Solimões indica que durante a sua evolução houve diminuição na diversidade mineralógica. Contudo, a preservação de muscovita, esmectita e illita, as concentrações mais elevadas em álcalis, Ba, Cu, Li, Ni, Pb, Sr, V, Y e Zn incomum nos solos e perfis lateríticos desenvolvidos sobre rochas sedimentares mais antigas a leste (Costa, 1991; Truckenbrodt *et al.*, 1991; Horbe & Costa, 1997; Fernandes Filho *et al.*, 1996; Leal 1996; Horbe *et al.*, 2001; Horbe *et al.*; 2004) e a semelhança com o perfil 7 sobre o sedimento quaternário, é indicativa de que são pouco evoluídos, face a idade miocena da Formação Solimões e ao clima atual quente e chuvoso da região de Coari (2300 mm/ano), que promove intensa lixiviação. Portanto, os perfis 1 a 6 sobre a Formação Solimões estão em desequilíbrio com o ambiente laterítico reinante na Amazônia nos últimos 60-70 milhões de anos, por serem derivados de sedimentos com exposição recente ao ambiente laterítico da Amazônia. Essas características indicam que a exposição e o intemperismo dessa unidade deram-se, provavelmente durante o período Quaternário, mesma época de formação do perfil 7.

## CONCLUSÕES

A Formação Solimões e os sedimentos do Quaternário, com os seus respectivos produtos intempéricos, formam as escarpas dos rios da região centro-leste do Amazonas. Nos perfis sobre a Formação Solimões foram identificados, de baixo para cima, os

horizontes saprolítico, mosqueado e solo, enquanto os gerados sobre o Quaternário são bem menos desenvolvidos, correlatos a Neossolos e constituídos dos horizontes C e A. A fração pelítica é a predominante nos perfis, seguida de areia muito fina a fina. Os minerais predominantes são quartzo e caulinita, ocorrendo subordinadamente hematita, goethita, muscovita, illita e esmectita em todos os perfis e horizontes. Interestratificados illita-esmectita, clinocloro, sepiolita e clorita-vermiculita estão restritos aos sedimentos da Formação Solimões. A composição química e a concentração dos elementos-traço permitiram definir dois grupos de perfis: A- perfis 1, 6 e 7, são mais argilosos, apresentam maiores concentrações em esmectita, illita,  $Al_2O_3$  e álcalis, especialmente de MgO e  $P_2O_5$  e, conseqüentemente, são mais férteis e contém maiores concentrações de elementos-traço, especialmente de Ba, Co, Li, Ni, Pb, Sr, V, Y e Zn; B- perfis 2, 3, 4 e 5, são mais lixiviados e/ou, formados, provavelmente, a partir de fácies mais arenosas pobres em álcalis e em elementos-traço. A semelhança geoquímica entre o perfil sobre o sedimento quaternário e parte dos perfis sobre a Formação Solimões sugere que o primeiro pode ser produto do retrabalhamento do sedimento mais antigo. A outra possibilidade para a semelhança mineralógica e química entre os perfis desenvolvidos sobre esses sedimentos, é que a mesma fonte do material. Contudo, a estratigrafia e a faciologia da Formação Solimões indicam que a fonte desta estaria a leste do Arco de Purus (Nogueira *et al.*, 2003), enquanto os sedimentos quaternários estariam relacionados tanto aos Andes como também ao próprio trabalho dos sedimentos mais antigos próximos a calha do Solimões. A variação entre os grupos A e B sugere formação a partir de fácies sedimentares distintas, mais arenosas para o primeiro e mais pelítica para o segundo. Outra característica dos perfis estudados, especialmente aqueles sobre a Formação Solimões, é a sua evolução pouco acentuada em relação aos perfis lateríticos localizados a leste da região, e seu desequilíbrio em relação ao clima atual quente e chuvoso da região de Coari (2.300 mm.ano<sup>-1</sup>).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobrás, ao CNPq programa CTPETRO-CNPq processo no. 460223/01-1 e a CAPES, pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas de mestrado e pesquisa, e ao Instituto Evandro Chagas, pelas análises de mercúrio. Também aos revisores e ao editor da *Acta Amazônica*, pelas correções e sugestões.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- Costa, M.L. 1991 Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira Geologia*, 21:146-160.
- Costa, M.L.; Angélica, R.S.; Costa, N.C. 1999. The geochemical association Au-As-B-W-Cu-Sn in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajás, Brazil: its importance for identification of primary ore. *Journal Geochemical Exploration*, 67: 33-49.



- Fernandes Filho, L.A.; Costa, M.L.; Costa, J.B.S. 1996. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus. *Geociências*, 16: 9-33.
- Hooghiemstra, H.; Hammen, T.V. 1998. Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: the forest refugia hypothesis, and literature overview. *Earth-Science Reviews*, 44:147-183.
- Horbe, A.M.C.; Costa, M.L. 1997. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas sílicoferuginosas. *Acta Amazonica*, 27: 241-256.
- Horbe, A.M.C.; Nogueira, A.C.R.; Horbe, M.A.; Costa, M.L.; Suguio, K. 2001. A lateritização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo-Balbina, nordeste do Amazonas. In: Costa, M.L. & Angélica, R. S.(org.) *Contribuições a Geologia da Amazônia. Vol 2*. Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Norte, Belém, Pará. p.148-176.
- Horbe, A.M.C.; Horbe, M.A.; Suguio, K. 2004. Tropical Spodosols in northeastern Amazonas State, Brasil. *Geoderma*, 119: 55-68.
- Horbe, A.M.C.; Nogueira, A.C.R.; Rozo, J.M.G. 2005. Evidências de dois episódios de lateritização na região de Novo Remanso – AM. Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa. Em CD-Rom.
- Leal, P.C. 1996. *Caracterização e interpretações genéticas de alguns solos da região de Manaus – AM*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 109pp.
- Konhauser, K.O.; Fyfe, W.S.; Kronberg, B.I., 1994, Multi-element chemistry of some Amazonian waters and soils. *Chemical Geology*, 111: 155-175.
- Kronberg, B.I.; Fralick, P.W.; Benchimol, R.E. 1998. Late Quaternary sedimentation and palaeohydrology in the Acre foreland basin, SW Amazonia. *Basin Research*, 10: 311-323.
- Maia, R.G.N.; Godoy, H.K.; Yamaguti, H.S.; Moura, P.A.; Costa, F.S.F; Holanda, M.A.; Costa, J.A. 1977. Projeto carvão no Alto Solimões. Relatório final. Manaus, DNPM/CPRM, 11 v.
- Nogueira, A.C.R.; Arai, M.; Horbe, A.M.C. Horbe, M.A. Silveira, R.R.; Silva, J.J.; Motta, M. 2003. A influência marinha nos depósitos da Formação Solimões na região de Coari (AM): registro da transgressão miocênica na Amazônia Ocidental. In: SBG/Núcleo norte, 8. Simp. Geol. Amaz., Manaus. *Resumos Expandidos*. Cd Rom.
- Oliveira, S.M.B.; Melfi, A.J.; Forstier, A.C.; Favero, D.I.T.; Boulet, R. 1999. O papel dos solos amazônicos como reservatórios de mercúrio. In: *Cong. Bras. de Geol. dos Países de Língua Portuguesa, 5. e Congr. Bras. de Geol.*, 7. Porto Seguro, Resumos Expandidos p. 146-149.
- Radambrasil 1978. Folha SA. 20 Manaus: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1978. (Levantamento de Recursos Naturais, 18). 456p.
- Rossetti, D.F.; Toledo, P.M.; Góes, A.M. 2005. New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. *Quaternary Research*, 64: 279-280
- Rosolen, V.; Lamotte, M.; Boulet, R.; Trichet, J.; Rouer, O.; Merfi, A.J. 2002. Genesis of the mottled horizon by Fe-depletion within a lateritic cover in the Amazon Basin. *C.R. Geoscience*, 334:187-195.
- Truckenbrodt, W.; Kotschoubey, B.; Schellmann, W. 1991 Composition and origin of the clay cover on north Brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, 80: 591-610.

Recebido em 06/10/2006

Aceito em 02/02/2007

