

MINERAIS PESADOS PROVENIENTES DO LEITO DO RIO AMAZONAS

Paulo M. B. Landim (*)
Nivaldo J. Bósio (*) (**)
Fu T. Wu (*)
Paulo R. M. Castro (***)

Resumo

Com a intenção de verificar a origem do material transportado pelo Rio Amazonas, amostras de calha foram coletadas em 60 locais entre Belém (Brasil) até Iquitos (Peru). Tendo sido escolhidos 28 amostras, as mesmas foram submetidas a um estudo mineralógico, o qual revelou os seguintes minerais pesados presentes: turmalina, zircão, granada, estauroлита, hiperstênio, piroxênio (augita), anfibólio (hornblenda), tremolita, magnetita ou ilmenita e leucóxênio. Em quase todas as amostras ocorre uma grande quantidade de minerais instáveis idiomórficos, como hiperstênio, augita e anfibólio, indicando uma área fonte constituída pelas rochas básicas e ultrabásicas, diminuindo para jusante. Minerais estáveis, como zircão e turmalina, apresentam-se tanto angulosos como arredondados, indicando mais de uma área fonte, mas de qualquer modo sempre a partir de rochas ácidas. Aplicando aos dados o método classificatório multivariante da análise de agrupamentos (cluster analysis), dois maiores grupos de amostras foram ressaltados: um constituído por amostras localizadas no alto Rio Amazonas e com maior teor em minerais instáveis, provavelmente com origem andina; o outro formado principalmente por amostras que se localizam, a partir da confluência com o Rio Juruá, até Belém e contendo uma alta porcentagem em zircão e turmalina, indicando além de uma contribuição andina, fontes nos escudos precambrianos a norte e sul do Rio Amazonas.

(*) UNESP, Rio Claro - SP

(**) Endereço atual IPT, São Paulo, SP

(***) UNICAMP, Limeira, SP

INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica com uma área de aproximadamente 6×10^6 km², situada na região norte da América do Sul, pelas suas dimensões continentais vem, de há muito, despertando interesse da comunidade científica que tem procurado enfocá-la sob os mais diversos aspectos. Um dos mais importantes é sobre o comportamento da atual rede de drenagem do Rio Amazonas e tributários. Geologicamente a região constitui-se em uma bacia intracratônica paleozóica disposta, a grosso modo, no sentido este-oeste, limitada por dois escudos precambrianos ao norte e ao sul. Como depósitos de cobertura encontram-se sedimentos cretácicos e cenozóicos sobre os quais o Rio Amazonas e seus afluentes instalaram-se. A história pré-atual dessa drenagem está, portanto, ligada às condições do ambiente de deposição ao fim do Cretáceo e início do Terciário, principalmente durante o levantamento dos Andes no Terciário mé-

dio que foi de fundamental importância no estabelecimento do atual padrão.

Na tentativa de contribuir para o esclarecimento desse problema foram coletadas amostras de sedimentos do fundo do leito do Rio Amazonas, de Belém, no Brasil até Iquitos, no Peru, durante a expedição do navio oceanográfico Alpha-Helix à Amazônia em 1976-1977. A idéia foi a de ao estudar a suite de minerais pesados existentes nesses sedimentos de fundo, poder caracterizar quais as fontes e como conseqüência quais as áreas que atualmente contribuem de maneira mais significativa.

GEOLOGIA REGIONAL

O Rio Amazonas distribui-se por mais de 4.000 km dos Andes ao Oceano Atlântico ocupando aproximadamente o eixo da Bacia Sedimentar Amazônia. Essa bacia, de caráter intracratônico, teve sua origem no Paleozóico inferior situando-se entre o Escudo das Guianas ao norte e o Escudo Central Brasileiro ao sul, ambos compostos por rochas pré-Cambrianas de idades diversas e predominantemente ácidas.

Tectonicamente, essa bacia é dividida em três porções: região oriental ou bacia do Marajó; região central e região ocidental ou bacia do Acre. A região oriental

que corresponde à foz do Amazonas, apresenta grande espessura de sedimentos cretácicos e cenozóicos e acha-se separada da região central pelo arco de Gurupá. A região ocidental que abrange a porção centro-oeste do Estado do Amazonas e o Estado do Acre é constituída por sedimentos mesozóicos dobrados por influência da orogenia Andina e principalmente por sedimentos cenozóicos e está separada da região central pelo arco de Iquitos. A região central situada entre os rios Xingu e Negro, corresponde a parte mais estreita da bacia e é bem caracterizada por sedimentos paleozóicos e intrusões básicas de idade mesozóica, sendo coberta por sedimentos cretáceos e cenozóicos. Esta região é subdividida pelos altos do Purus a oeste, e de Monte Alegre a leste, em Bacia do Alto Amazonas, Bacia do Médio Amazonas e Bacia do Baixo Amazonas.

A sedimentação paleozóica foi essencialmente marinha. Com a saída definitiva dos mares interiores da região amazônica durante o Permiano médio, o ambiente passou a ser continental, sendo a regressão no sentido geral de Este para Oeste. A Bacia Amazônica durante a sedimentação final do Paleozóico consistiria de duas bacias distintas: Alto Amazonas e Médio-Baixo Amazonas, separadas pelo Arco do Purus (Carozzi *et al.*, 1972).

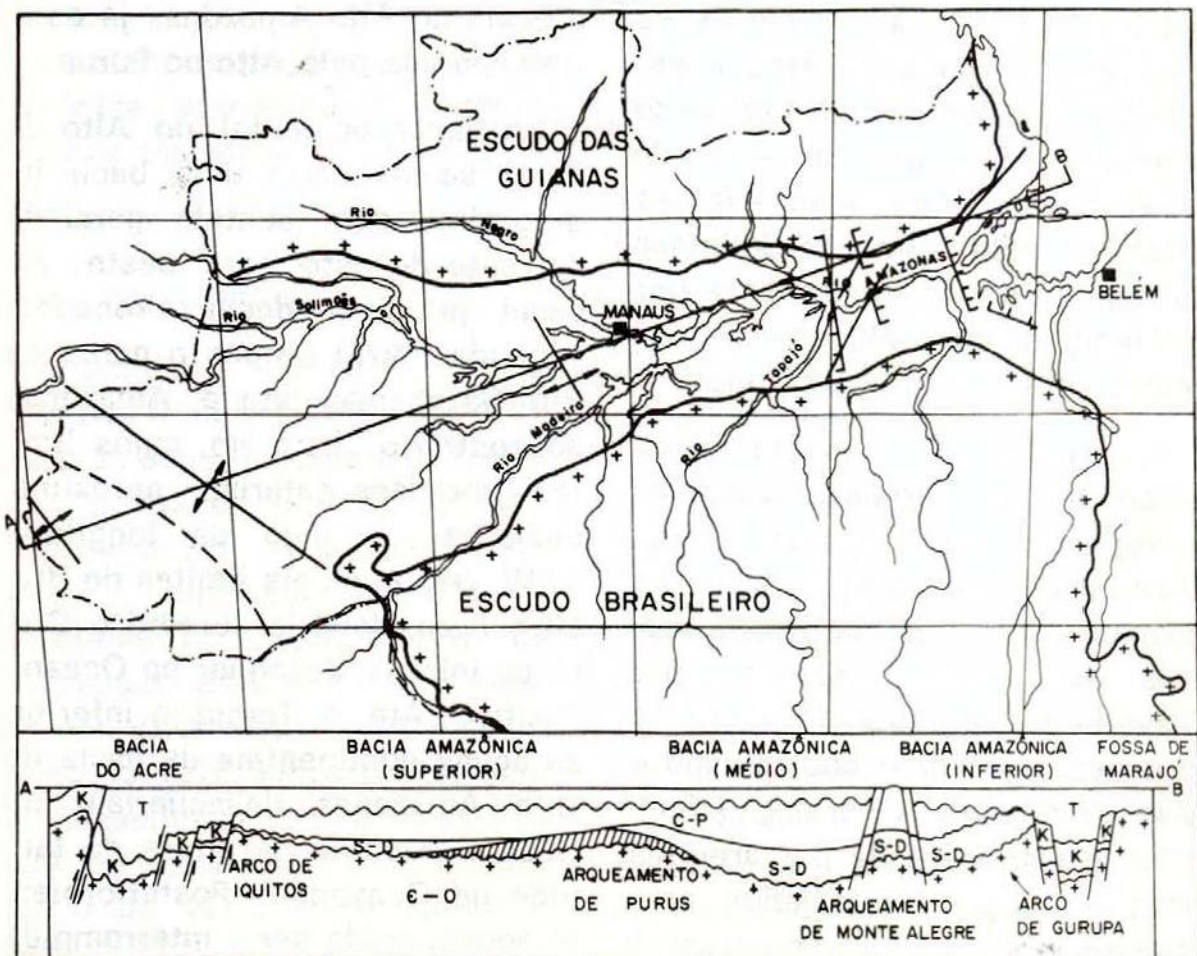


Figura 1 — Mapa Geológico esquemático da região amazônica, modificado de Andrade e Cunha 1971.

Os períodos Triássico e Jurássico corresponderam a tempos de intensa deformação tectônica da crosta como uma preparação à abertura do Oceano Atlântico iniciada no fim do Jurássico. Essa fase tectônica foi acompanhada de magmatismo básico na região amazônica representado por inúmeras intrusões de diabásio.

Importante para se entender o estabelecimento da atual drenagem é o conhecimento das condições de deposição dos sedimentos de cobertura. Até há bem pouco tempo essa extensa cobertu-

ra continental pós-paleozóica da Amazônia era admitida como representada por uma única unidade sedimentar, isto é, a Formação Barreiras. Caputo *et al.* (1971) foram os primeiros a demonstrar a existência de duas seqüências sedimentares distintas nessa área: a Formação Alter do Chão e a Formação Solimões, sem entretanto definir os seus limites. A observação de imagens de radar, na escala 1:1.000.000, permitiu Santos (1976) delimitar a vasta distribuição da Formação Solimões desde a região ocidental do Alto do Pu-

rus até as cercanias do Peru e da Colômbia, abrangendo área superior a 1.000.000 km². A Formação Alter do Chão ocorre na região do médio e baixo Amazonas, estando recoberta pela Formação Solimões na região do alto Amazonas e por sedimentos cenozóicos mais recentes na foz do rio Amazonas.

A Formação Alter do Chão é representada por arenitos argilosos e argilitos, com grauvacas, brechas intraformacionais e níveis de conglomerados de ocorrência restrita. Sua idade é referida por Daemon & Contreira (1971) como cretáceo superior (Cenomaniano e Maestrichtiano). A Formação Solimões é representada por arenitos finos a médios intercalados com argilitos e siltitos contendo restos vegetais e concreções de gipsita. Os argilitos gradam para margas e calcários argilosos e nos 300m superiores ocorre linhito de baixa qualidade em camadas de 2 m a 10 m de espessura (Santos, 1976). Segundo Daemon & Contreira (1971) a Formação Solimões foi depositado do Paleoceno ao Pleistoceno.

Segundo Almeida (1976) durante o Cretáceo Superior grande parte da região amazônica seria constituída por terras altas, servindo como área-fonte, enquanto as bacias do Médio e do Baixo Amazonas recebiam os sedimentos que iriam constituir a Formação Alter do Chão. Nessa ocasião

a bacia do Alto Amazonas já estaria separada pelo Alto do Purus.

No flanco ocidental do Alto do Purus se instalaria uma bacia hidrográfica com sentido geral de corrente de este para oeste. Ao canal principal dessa drenagem Almeida (1976) propôs o nome de Rio Sazonama, isto é, Amazonas ao contrário. Este rio, cujos limites litorâneos estariam aproximadamente ao longo da longitude 73°W, isto é, atuais limites do Brasil e Peru, deveria durante o Cretáceo inferior desaguar no Oceano Pacífico. Até o Terciário inferior, as águas continentais da bacia do Alto Amazonas desaguariam no Oceano Pacífico na altura da latitude de Guayaquil. Posteriormente aquela saída seria interrompida como conseqüência do início da orogenia andina. A partir de então as águas fluviais ao atingirem aproximadamente a longitude de Iquitos, deslocaram-se para o norte interconectando-se com a drenagem do Rio Orenoco; ver a propósito Irving (1971). Esta situação teria perdurado até o início do Pleistoceno inferior, segundo Almeida (1976), quando pelo dobramento do geossinclíneo andino na Colômbia e Venezuela ocorreria a inversão da drenagem rumo ao oeste. Isso significa que a inversão do sentido da rede hidrográfica da bacia amazônica, condicionada aos movimentos tectônicos da orogenia andina e da epirogênese sul-americana, é mais nova que

Pleistoceno inferior. Em outras palavras, a configuração que a bacia Amazônica apresenta atualmente não deve ter mais de 1.000.000 anos.

COLETA DE MATERIAL

As amostras do leito do rio Amazonas e da desembocadura de alguns de seus maiores tributários foram coletadas durante um cruzeiro do navio oceanográfico Alpha-Helix, pertencente ao Scripps Institutions of Oceanography, da Universidade da Califórnia, à Amazônia em duas etapas: entre junho e julho de 1976, entre Belém, junto à desembocadura, e Iquitos a 4.000 km rio acima, e entre maio e junho de 1977, entre Iquitos e Belém.

Na primeira fase 60 locais foram amostrados e dessas amostras estudou-se a fração pesada contida na classe areia fina (0,125 — 0,250 mm) de 28 amostras se-

leccionadas. A localização dessas amostras está na Figura 2 e o resultado do estudo dos minerais pesados na Tabela 1.

Foram determinadas 12 espécies minerais: turmalina, zircão, granada, apatita, estauroлита, epidoto, hiperstênio, piroxênio (augita), anfibólio (hornblenda), tremolita, magnetita ou ilmenita e leucoxênio. Todas as amostras são constituídas predominantemente por opacos e entre os transparentes distinguem-se os instáveis hiperstênio, augita e anfibólio, que se apresentam idiomórficos. A presença desses minerais decresce em direção à foz do Amazonas. Minerais ultraestáveis presentes, como zircão e turmalina, apresentam-se tanto angulosos como arredondados indicando tanto derivação direta como material re-trabalhamento.

Amostras situadas no terço superior do rio, como as de número 60, 56 e 50 apresentam minerais

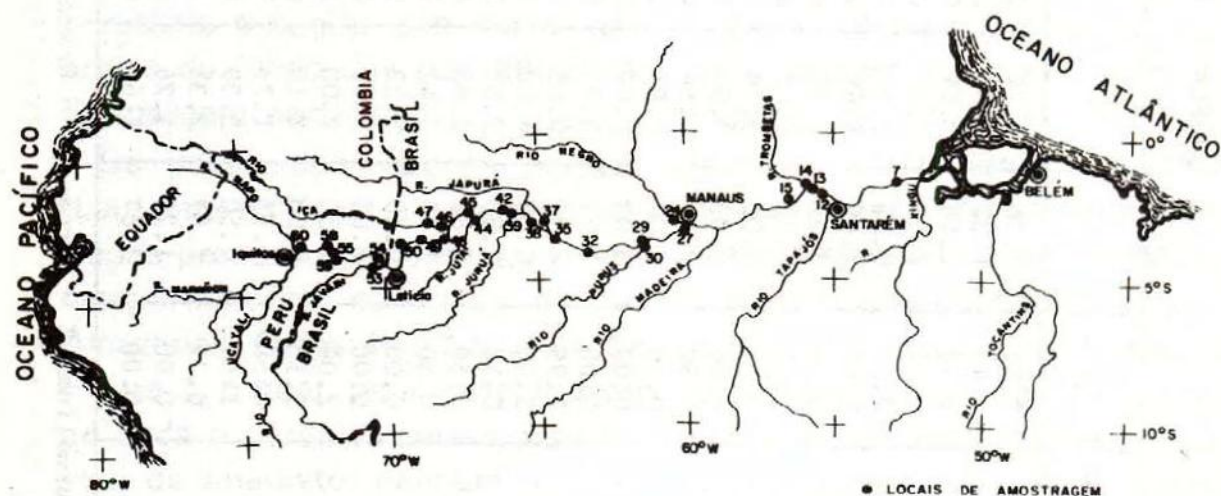


Figura 2 — Localização das amostras coletadas na 1.ª fase, ou seja, entre junho e julho de 1976.

TABELA 1 Distribuição dos minerais pesados por amostra

Amostras	Tu	Z	G	Ap	Et	Ep	H	Ag	Af	Tr	M + I	L
60	1.89	5.26	2.26	0.00	0.00	0.00	12.63	29.73	4.38	1.25	35.46	5.59
58	1.43	1.32	2.52	2.03	0.00	0.00	12.45	49.36	2.86	0.72	21.56	2.63
56	1.53	2.46	3.94	0.89	0.00	0.15	12.86	19.89	2.62	1.07	47.92	5.95
55	0.50	1.20	1.25	0.72	0.50	1.00	7.88	43.40	5.86	1.95	26.87	6.38
54	0.50	10.53	3.51	0.00	0.00	0.50	12.28	38.10	3.51	0.00	25.82	3.51
53	1.69	1.69	1.69	1.69	0.00	0.00	22.03	37.29	5.08	1.69	20.34	3.39
50	0.50	0.50	2.90	0.50	0.50	0.00	10.14	33.58	1.45	0.50	45.08	4.35
49	2.62	0.70	0.99	1.28	0.30	0.00	15.80	41.13	5.75	2.26	17.30	7.42
48	0.50	0.00	3.70	0.00	0.00	0.00	20.07	40.04	11.11	0.50	18.02	5.56
47	4.00	4.00	3.00	0.50	0.00	2.00	4.00	15.00	45.50	7.00	4.00	2.00
46	0.50	0.50	3.64	0.90	0.00	0.50	14.88	38.84	16.83	2.31	16.36	3.49
45	0.50	0.00	3.95	1.32	0.00	0.50	10.53	38.47	20.05	5.26	14.47	3.95
44	0.00	3.03	0.00	0.00	0.00	3.03	6.06	12.12	6.06	0.00	57.58	12.12
42	0.00	1.67	3.33	0.00	1.67	0.00	23.33	43.33	5.00	5.00	13.33	3.33
39	2.99	8.96	0.00	0.00	2.99	1.49	1.49	1.49	2.99	7.46	50.25	17.91
38	2.00	0.00	4.00	2.00	2.00	0.50	27.00	28.00	6.00	4.00	18.00	2.00
37	0.50	2.53	2.53	1.27	0.00	0.00	5.06	22.28	18.99	1.27	25.32	13.92
35	0.50	2.88	2.88	4.23	0.50	0.00	12.86	27.17	2.82	0.00	35.62	11.27
32	0.50	1.70	3.41	1.05	0.00	0.50	18.26	30.76	5.90	1.70	29.61	6.47
30	0.00	0.50	5.33	1.33	1.33	1.33	14.67	25.67	6.67	2.69	33.33	2.67
29	0.00	2.00	2.00	0.00	2.00	2.00	8.00	42.00	4.00	2.00	18.00	12.00
27	2.00	0.50	2.00	2.00	0.50	0.50	19.50	35.00	14.00	2.00	16.00	4.00
24	3.13	0.00	3.13	0.00	3.13	6.25	0.50	3.13	4.69	1.56	41.64	26.56
15	0.50	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	19.00	26.00	14.04	3.51	22.81	3.51
14	1.69	0.50	3.39	0.50	0.50	3.39	16.00	36.29	10.17	6.78	10.86	6.78
13	0.72	1.67	2.31	1.55	1.21	3.35	16.74	21.39	9.89	4.28	29.19	6.06
12	0.00	1.75	5.26	1.75	1.75	7.02	5.26	27.57	19.30	0.50	24.06	5.26
7	0.00	1.67	1.67	0.50	0.50	3.33	18.33	22.83	3.33	3.33	37.33	5.00

Tu = Turmalina; Z = Zircão; G = Granada; Ap = Apatita; Et = Estauroлита; Ep = Epidoto; H = Hiperstênio; Ag = Augita; Af = Anfibólio; Tr = Tremolita; M + I = Magnetita e Ilmenita; L = Leucoxênio.

pesados ultra-estáveis angulosos e arredondados, como turmalina e zircão, como minerais instáveis angulosos, como hiperstênio, augita e anfibólio.

Amostras situadas no terço médio do rio, como as de número 47, 44, 39 e 24, apresentam maior frequência em minerais ultra-estáveis e minerais metaestáveis como epidoto e estauroлита.

Amostras situadas no terço inferior, como as de número 30 a 7, são constituídas por epidoto e estauroлита em porcentagens consideráveis.

As amostras coletadas na segunda etapa, aproximadamente nos mesmos locais, foram utilizadas para comparação com os resultados da primeira amostragem, tendo tal comparação revelado valores idênticos. Neste segundo estudo revelaram que andalusita aparece em alguns locais ao longo do alto e médio Amazonas e em afluentes da margem sul e que hiperstênio e augita são raras nas areias do fundo dos rios afluentes da margem norte.

De posse dos valores percentuais para os doze minerais encontrados procurou-se constatar o seu comportamento ao longo do rio Amazonas. O resultado acha-se na Figura 3, o qual, pela variabilidade de cada um dos minerais, não revela de imediato nenhum padrão de distribuição. Como essa maneira de apresentação gráfica do comportamento dos minerais pe-

sados ao longo do Rio Amazonas mostrou-se nada conclusiva, optou-se pela utilização de uma outra metodologia. A fim, pois, de verificar se existe a possibilidade de uma classificação das amostras em areia, utilizando-se dos minerais pesados, aplicou-se aos dados a técnica multivariante da análise de agrupamentos (cluster analysis).

ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (cluster analysis)

Quando se dispõe, como no presente caso, de uma matriz de dados resultante de diversas variáveis (minerais pesados) observados em diversos espécimes (amostras de areia) e há necessidade de um processo classificatório que coloque os espécimes em grupos mais ou menos homogêneos, a técnica estatística multivariante da análise de agrupamentos deve ser usada.

Essa técnica procura revelar agrupamentos, representados num espaço multidimensional em um número conveniente, relacionando-os através de coeficientes de similaridade ou de semelhança.

Para o desenvolvimento de tal metodologia, parte-se de uma matriz simétrica de coeficientes de associação entre itens. Para a combinação dos mesmos, segundo níveis hierárquicos de similaridade, adota-se um procedimento aglomerativo apropriado. Isto sig-

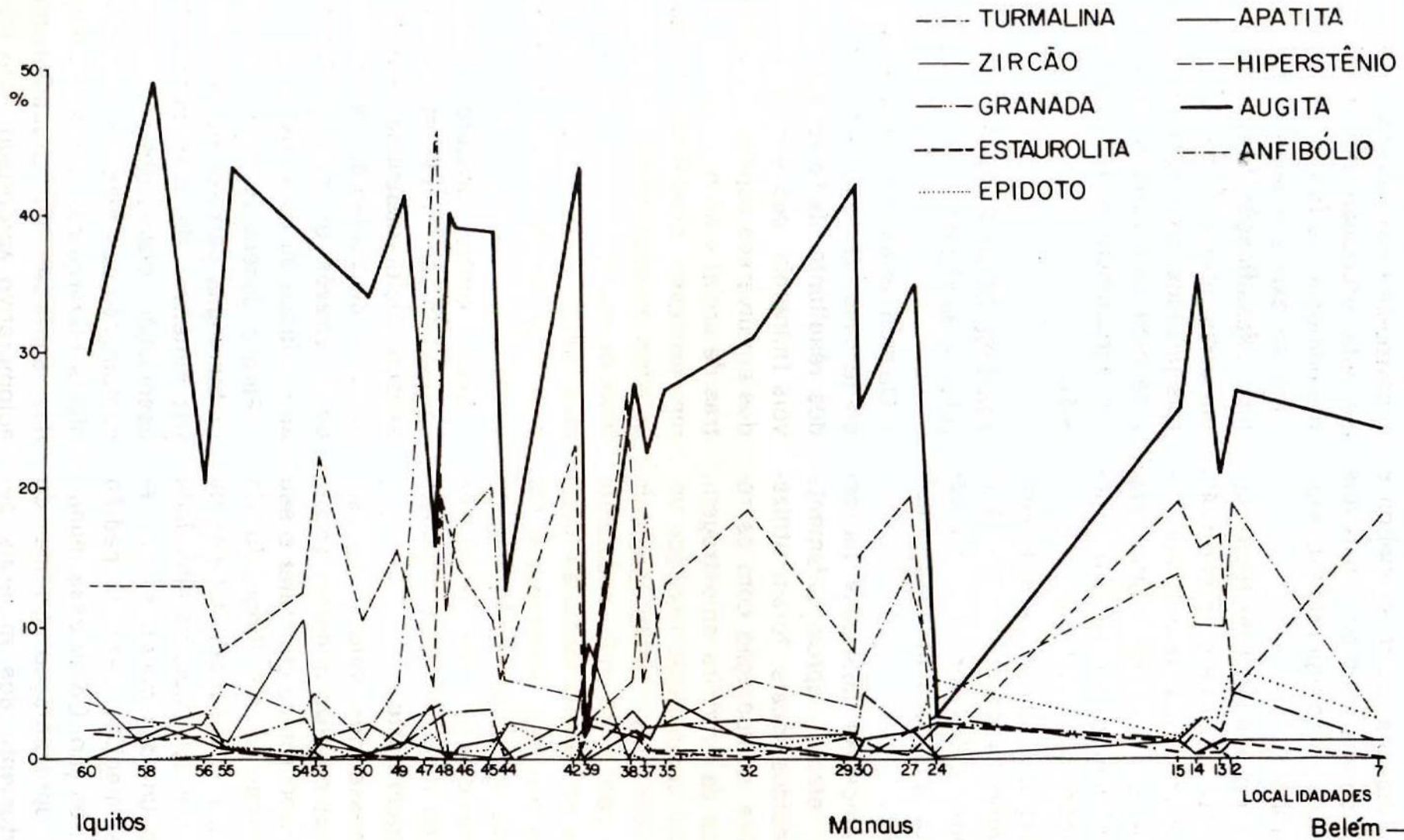


Figura 3 — Distribuição em valores percentuais dos minerais pesados encontrados desde Iquitos (Peru) até proximidades de Belém (Brasil).

nifica que a matriz de associações deve ser recalculada a cada ciclo de agrupamentos em uma ordem sucessiva no sentido de decréscimo de similaridade.

A forma gráfica mais usada para representar tal agrupamento hierárquico é o dendrograma. Maiores detalhes podem ser vistos em Davis (1973).

Para o presente estudo escolheu-se como coeficiente de similaridade o coeficiente de distância. Esse coeficiente expressa o grau de similaridade como distância em um espaço multidimensional. Quanto menor a distância, maior o grau de similaridade e vice-versa. A distância D entre dois pontos, cuja localização é especificada num sistema de eixos ortogonais, é fornecida, segundo o teorema de Pitágoras, por:

$$D_{1,2} = \left\{ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right\}^{1/2}$$

onde x_1 , x_2 , y_1 e y_2 são as coordenadas dos dois pontos.

Para a distância entre k pontos, num espaço n -dimensional, a forma generalizada é:

$$D_{ij} = \left\{ \sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2 \right\}^{1/2}$$

Tendo todas as variáveis o mesmo peso, a função distância será limitado pelos valores 0 (maior similaridade) e 1,0 (menor similaridade).

Se as variáveis não forem previamente homogeneizadas D assumirá os valores de 0 até $+\infty$.

Como procedimento aglomerativo, foi adotado o "weighted pair-group method" (WPGM). Segundo esse método procura-se na matriz inicial de coeficientes de similaridade entre amostras pelos mais altos coeficientes de similaridade por coluna que sejam simultaneamente os mais altos coeficientes por linhas. Esses valores serão então registrados em um diagrama que indique num de seus limites o grau de similaridade entre pares de amostras.

Em seguida a matriz de similaridade é recalculada, tratando os elementos anteriormente agrupados como elementos singulares. Para tanto calculam-se as médias aritméticas dos valores para os pares de colunas agrupadas. Procura-se novamente pelos mais altos coeficientes de similaridade na nova matriz e esses valores serão também registrados no gráfico. A operação de recálculo continua até a obtenção de uma matriz 2×2 . Ao gráfico que mostra o relacionamento entre todas as amostras dá-se o nome de dendrograma.

Aplicando-se a análise de agrupamentos à matriz de dados em que as amostras representam as linhas e as porcentagens de minerais pesados as colunas, três agrupamentos foram determinados (Figura 4). Esses agrupamentos re-

Coeficiente de Similaridade distância

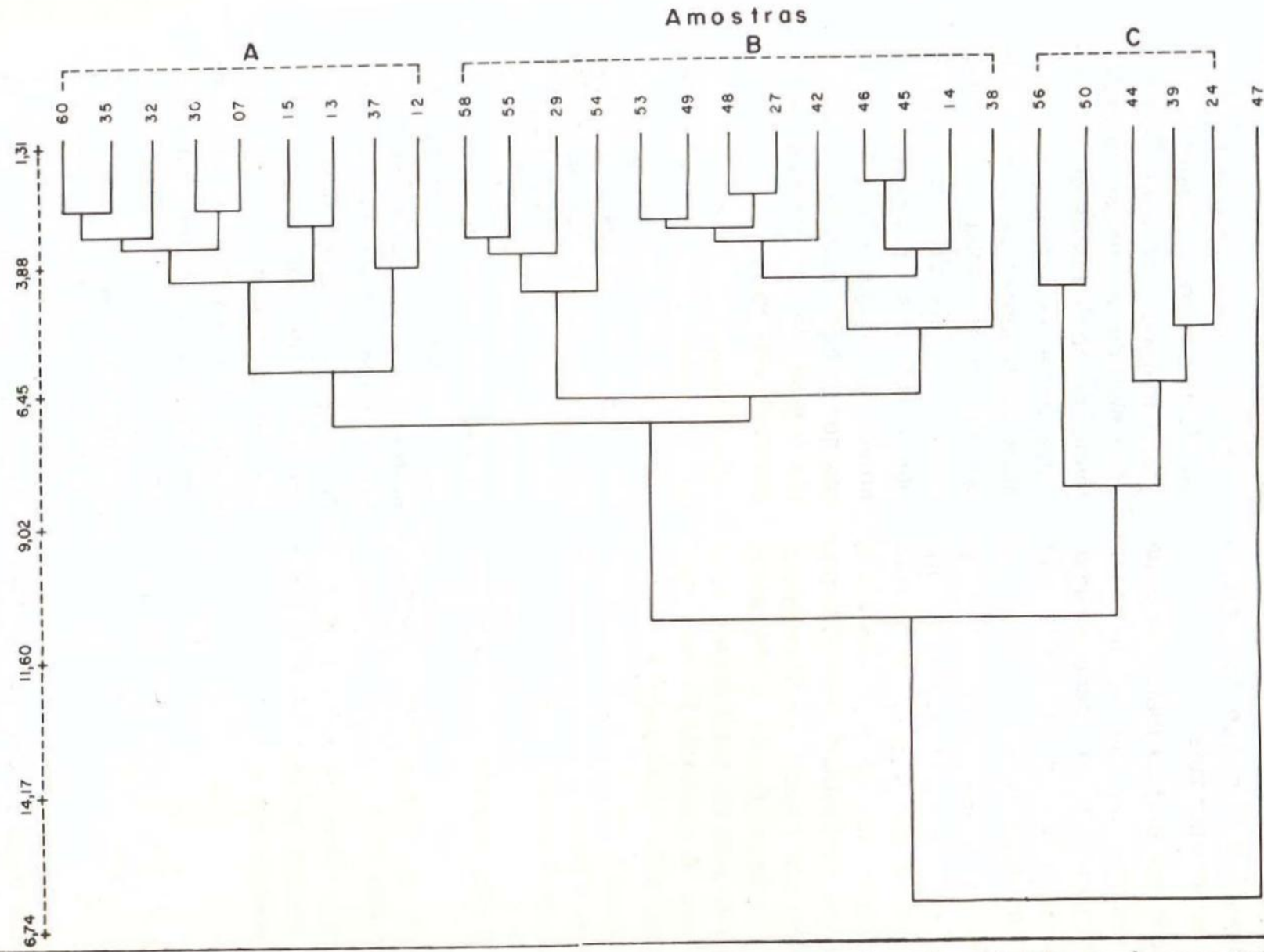


Figura 4 —Dendrograma resultante da análise de agrupamentos aplicada às amostras de areias estudadas, tendo como variáveis a porcentagem presente de minerais pesados.

velam que as amostras de um dos grupos distribuem-se principalmente pelo alto Amazonas, que as amostras de um outro grupo distribuem-se da confluência com o Rio Juruá até a foz e o terceiro grupo ocupa uma posição intermediária, porém mais coincidente com o primeiro (Figura 5).

O que já se percebia quando da primeira verificação da distribuição dos minerais pesados por amostra, isto é, um certo condicionamento espacial, ficou mais evidente pelos resultados da análise de agrupamentos.

A fim de tentar uma explicação geológica para esses agrupamentos calculou-se para cada amostra índices que relacionam minerais instáveis com minerais estáveis, segundo Hubert, 1962.

$$I_1 = \frac{\text{hornblenda} + \text{epidoto} + \text{granada}}{\text{zircão} + \text{turmalina} + \text{rutilo}}$$

epidoto + granada + augita

$$I_2 = \frac{\text{epidoto} + \text{granada} + \text{augita}}{\text{zircão} + \text{turmalina} + \text{rutilo}}$$

O índice I_1 indica como fonte uma maior ou menor proveniência a partir de gnaisses e xistos. O índice I_2 evidencia contribuição a partir de rochas básicas.

Os resultados referentes a esses índices encontram-se na Tabela 2 e na figura 6.

Pela figura 6, pode notar-se que as amostras situadas na porção superior do rio Amazonas tem uma tendência a apresentarem valores maiores para I_2 ou seja uma influência a partir de rochas básicas, e que as amostras situadas abaixo da confluência com o rio Juruá tem uma tendência a apresentarem valores maiores para I_1 , ou seja uma influência a partir de rochas metamórfitas.

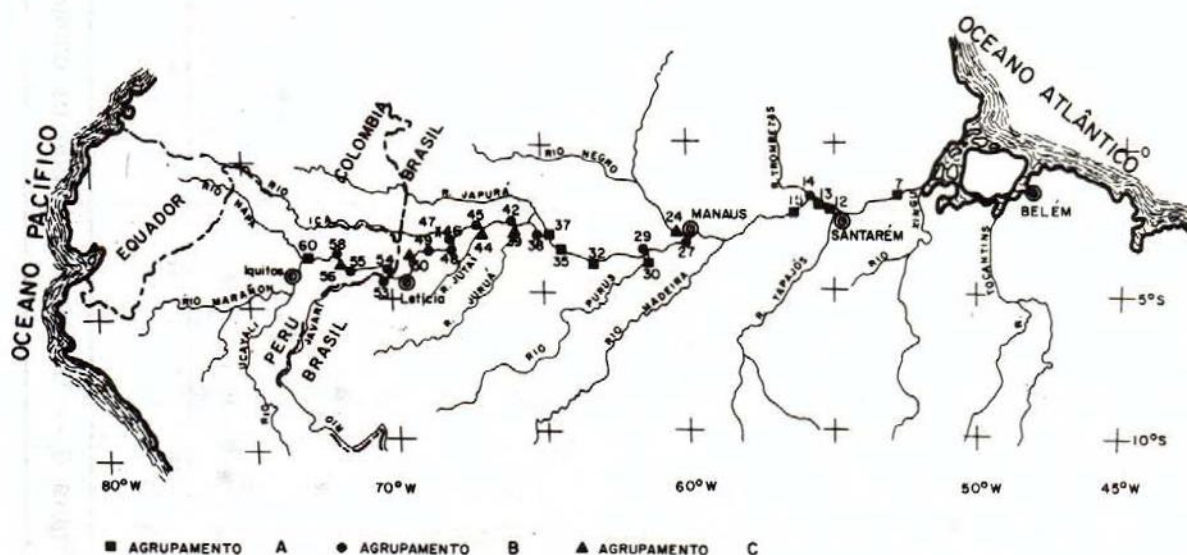


Figura 5 — Localização das amostras de acordo com os grupos resultantes da análise de agrupamentos.

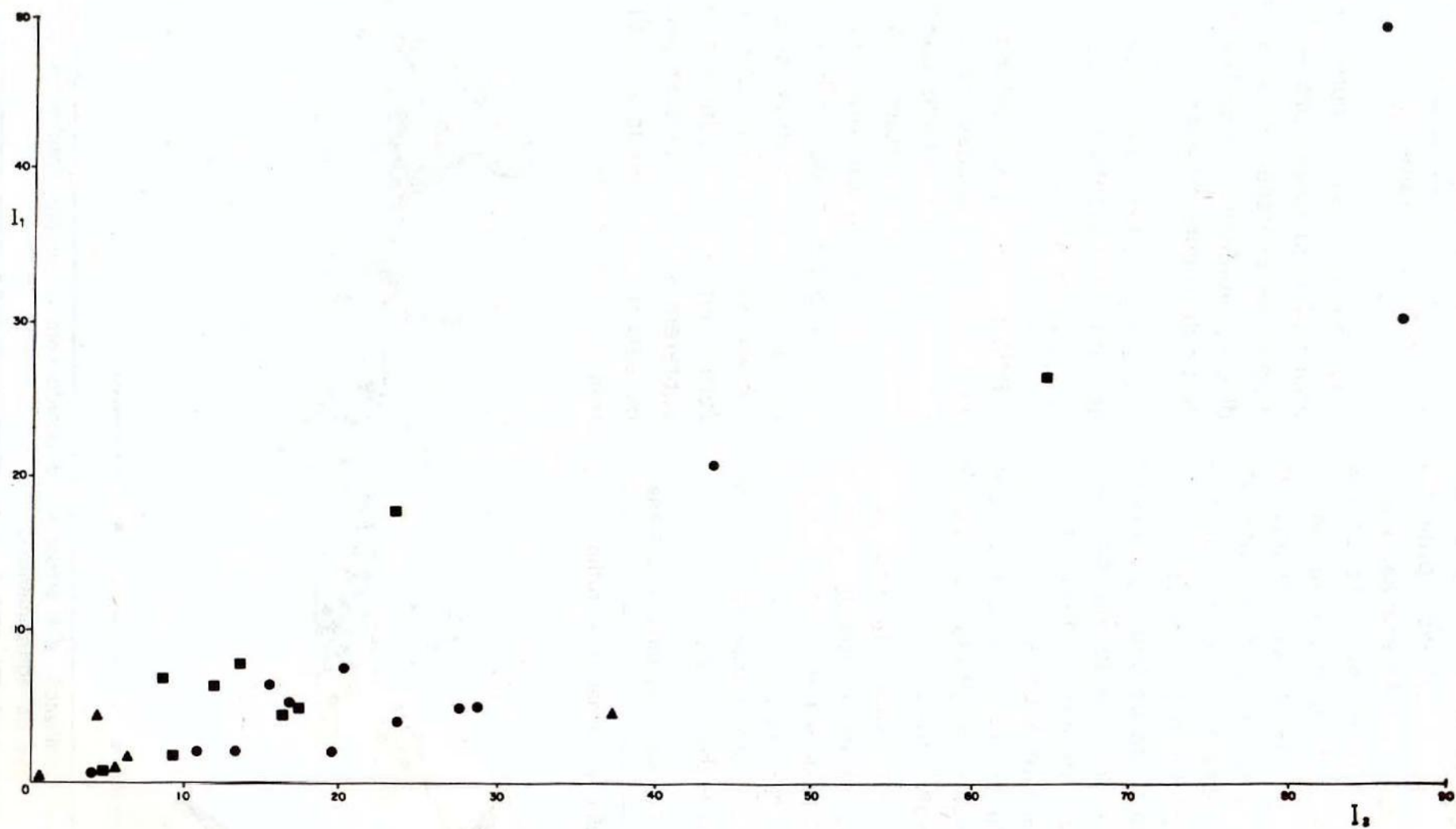


Figura 6. — Gráfico mostrando os comportamentos das amostras, segundo os índices I e II de Hubert, 1962.

TABELA 2. Índices, segundo Hubert (1962)

Amostras	Índices	
	I ₁	I ₂
60	0.93	4.47
58	1.96	18.87
56	1.68	6.01
55	4.77	26.85
54	0.68	3.82
53	2.00	11.53
50	4.35	36.48
49	2.03	12.69
48	29.62	87.48
47	6.31	2.50
46	20.97	42.98
45	49.00	85.84
44	3.00	5.00
42	4.99	27.94
39	0.37	0.25
38	5.25	16.25
37	7.10	8.19
35	1.69	8.89
32	4.46	15.76
30	26.66	64.66
29	4.00	23.00
27	6.60	15.00
24	4.50	4.00
15	7.80	13.11
14	7.74	19.67
13	6.51	11.32
12	18.05	22.77
7	4.99	16.66

CONCLUSÕES

A interpretação que se pode dar aos resultados obtidos é a de que os Andes contribuem de maneira decisiva com minerais pesados para os sedimentos de fundo do rio Amazonas. Essa contribuição é mais importante no alto rio, porém constata-se a presença de mi-

nerais andinos até junto à foz. Abaixo porém do Rio Juruá nota-se um aumento da contribuição dos escudos pré-Cambrianos situados a norte e sul do Rio Amazonas. Interessante notar que minerais instáveis, como hiperstênio, augita e anfibólio, apresentam-se idiomórficos mesmo junto à foz.

A constatação da importância da contribuição andina para o Rio Amazonas quanto à composição e concentração de sólidos em suspensão já havia sido feita por Gibbs (1967). No presente trabalho verifica-se que a contribuição andina para os sedimentos de fundo é muito mais importante apenas no terço superior do rio.

Sedimentos terciários coletados pelo Projeto RADAM-BRASIL na folha Rio Branco entre os paralelos 8° e 11° e meridianos 66° e 72° W, situada, portanto ao sul das nascentes do Rio Juruá, e estudadas por Suguio & Coimbra (1977) revelaram, como características gerais, abundância de andaluzita em quase todas as amostras e presença de turmalinas com crescimento secundário. Isso significa que esses sedimentos terciários não apresentam contribuição andina, mas sim a partir de metassedimentos com baixo grau de metamorfismo e de rochas submetidas a metamorfismo regional, em outras palavras, do escudo cristalino situado mais ao sul.

AGRADECIMENTOS

A coleta desse material somente foi possível porque dois dos autores, Landim e Bósio, participaram como representantes do CNPq na expedição à Amazônia efetuada pelo navio oceanográfico Alpha-Helix, operado para a US National Science Foundation pelo

Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, Cal. Essa expedição teve um caráter de cooperação internacional envolvendo cientistas de diversas instituições e este trabalho inclui-se na fase que estudou a "Geochemistry and Sediment of the Amazon River and its Plume", cujo cientista-chefe foi o Dr. John M. Edmond, do Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo suporte financeiro proporcionado aos dois primeiros. Agradecimentos são também apresentados ao Geólogo Augusto Meyer Jr. pela sua colaboração na análise granulométrica":

ABSTRACT

Bed samples of the Amazon River were collected from Iquitos (Peru) to Belém (Brazil). 28 selected samples were analysed and 12 types of heavy minerals were found: tourmaline, zircon, garnet, staurolite, hypersthene, pyroxene (augite), amphibole (hornblende), tremolite, magnetite or ilmenite and leucosene. Most of the samples presented large amount of idiomorphic unstable minerals such as hypersthene, augite and amphibole pointing towards basic and ultrabasic rocks source. These unstable minerals diminish toward the lower portion of the river. Stable minerals such as zircon and tourmaline have showed both angular and round shapes, which indicate more than one source but in any case originating from acid rocks. A cluster analysis method was applied to the data and two main clusters were determined. The first group, located at the upper

Amazon River, is rich in unstable minerals, probably from an Andean source. The second group, which includes samples located below the confluence of the Juruá River, presents a high zircon and tourmaline percentage which indicates a contribution from the Precambrian Shields in addition to the Andean source.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C.A.C. & CUNHA, F.M. BEZERRA

- 1971 — Revisão Geológica da Bacia Paleozóica do Amazonas. **An. XXV Congr. Bras. Geol.**, vol. 3:93-112.

ALMEIDA, L.F.G.

- 1976 — A drenagem festonada e seu significado fotogeológico. In: **28.º Congresso Brasileiro de Geologia**, Vol. 7, p. 175-197.

CAPUTO, M.V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELLOS, D.N.N.

- 1972 — Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas. Histórico e atualização. In: **Anais do 26.º Congresso Brasileiro de Geologia**, Belém, Vol. 3, p. 35-46.

CAROZZI, A.V.; ALVES, R.J.; CASTRO, J.C.

- 1972 — Controle tectônico sensedimentar dos carbonatos permocarboníferos das Formações Itaituba e Nova Olinda da Bacia do Amazonas, Brasil. In: **26.º Congresso Brasileiro de Geologia**, Belém, Volume 3, p. 47-64.

DAEMON, R.F. & CONTREIRAS, C.J.A.

- 1971 — Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas, Brasil. In: **25.º Congresso Brasileiro de Geologia**, São Paulo, Vol. 3, p. 79-92.

DAVIS, J.C.

- 1973 — **Statistic and Data Analysis in Geology**, John Wiley and Sons, Inc.

GIBBS, R.J.

- 1967 — The Geochemistry of the Amazon River System: Part I. The Factor that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. **Boletim da Geological Society of America**, Vol. 78, 1203-1232.

IRVING, E.M.

- 1971 — La evolution structural de los Andes nas septentrionales de Colombia, **Boletim Geológico**, Bogotá, Vol. 19, p. 1-89.

SANTOS, J.Ó.S.

- 1976 — Considerações sobre a Bacia Cenozóica Solimões. In: **28.º Congresso Brasileiro de Geologia**, Porto Alegre, Vol. 3, p. 3-12.

SUGUIO, K. & COIMBRA, A.M.

- 1977 — **Folha SC-19/Rio Branco. Relatório parcial de estudos sedimentológicos**, Projeto RADAM-BRASIL — USP. Relatório interno.

(Aceito para publicação em 11/5/83)

APÊNDICE

A EXPEDIÇÃO CIENTÍFICA NO NAVIO ALPHA-HELIX À AMAZÔNIA (Paulo M.B. Landim)

Em 1976-1977 teve lugar uma expedição científica à Amazônia, denominada "Alpha Helix Amazon Expedition", a bordo do navio oceanográfico Alpha-Helix, pertencente ao Scripps Institution of Oceanography da Universidade da Califórnia. Tal expedição, congregando cientistas de diversas partes do mundo, teve como tema fundamental o estudo da Amazônia sob um enfoque multidisciplinar. O suporte financeiro proveio principalmente da National Science Foundation e do National Institute of Health, ambos dos Estados Unidos da América, e do National Research Council do Canadá. A participação brasileira deu-se através de cientistas indicados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ficando a coordenação geral a cargo do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

O programa científico desenvolveu-se em sete fases, de junho de 1976 a julho de 1977, abrangendo os seguintes tópicos:

- fase I: estudos geoquímicos, sedimentares e de vazão do Rio Amazonas;
- fase II: genética humana de tribos indígenas da região de Benjamin Constant;

fases III e IV: bioquímica comparativa, fisiologia comparativa e evolução de hemoglobinas em peixes da Amazônia;

fase V: estrutura e funcionamento dos olhos de peixes da Amazônia;

fase VI: estudos ecológicos de natureza bioenergéticas;

fase VII: estudos botânicos com preocupação farmacológica na região da Amazônia Colombiana.

FASE I DA EXPEDIÇÃO ALPHA-HELIX À AMAZÔNIA: GEOQUÍMICA E SEDIMENTOS DO RIO AMAZONAS

Esta fase teve como cientista chefe o Dr. John M. Edmond do Massachusetts Institute of Technology, dos Estados Unidos da América, e participantes desse Instituto (R. F. Stallard e E. A. Boyle); do U.S. Geological Survey, dos Estados Unidos da América (R.H. Meade e C.F. Nordim Jr.); do Instituto de Mineralogia e Geoquímica de Palermo, da Itália (A. Longinelli); da University of Edinburgh, da Escócia (N.B. Price e E.R. Sholkovitz); do Woods Hole Oceanographic Institution, dos Estados Unidos da América (F.L. Sayles e P.C. Mangelsdorf Jr) e

da Universidade Estadual Paulista, do Brasil (N.J. Bósio e P.M.B. Landim).

Os objetivos dessa fase foram o estudo de geoquímica de águas do Rio Amazonas, o estudo sedimentológico do material em suspensão e de carga de fundo do Rio Amazonas e principais afluentes, bem como medidas de vazão em algumas secções transversais do Rio Amazonas. Numa primeira etapa, isto é, em junho-julho de 1976 o navio Alpha-Helix partiu de Belém (PA) e percorreu o Rio Amazonas até a cidade de Iquitos, no Peru, entrando também na desembocadura dos grandes afluentes. Numa segunda fase, em maio-junho de 1977, o navio fez o caminho inverso. Entende-se por Rio Amazonas todo o trecho do canal principal desde o Peru até a desembocadura no Oceano Atlântico e que recebe os nomes de Rio Marañon em território peruano, Rio Amazonas em território colombiano, Rio Solimões em território brasileiro até a confluência com o Rio Negro e Rio Amazonas a partir desse ponto até a foz.

RESULTADOS DA FASE I DA OPERAÇÃO ALPHA-HELIX

Estudos Geoquímicos

a) Quimismo do Rio Amazonas e principais tributários

Os afluentes do Rio Amazonas provenientes dos Andes mostram

material dissolvido e em suspensão com influência de áreas sedimentares. A geoquímica desses rios foi condicionada pela alteração de rochas com as seguintes proporções: 0,43 m NaCl:15 m CaSO₄:1,0 m CaCO₃:0,23 m MgCO₃:0,23 m feldspato sódico: 0,7 m feldspato potássico. As principais fontes desses materiais são carbonatos, arenitos avermelhados e evaporitos, bem como domos salinos. Assim os rios Ucayali e Marañon, do Peru, tem conteúdos relativamente altos de Na⁺⁺, Cl⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Sr⁺⁺, HCO⁻ (alc.) e SO⁻⁴, 2 a 4 vezes superiores à média da bacia hidrográfica. Conteúdo em SiO₂ e K⁺ são somente 1-1,3 vezes maiores que a média da bacia. Existe uma relação entre Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Sr⁺⁺ e alcalis e entre Na⁺ e Cl⁻, indicando fontes duplas para esses ions.

Afluentes provenientes dos escudos pré-Cambrianos, portadores de rochas ígneas, e que percorrem essas áreas e áreas cobertas por sedimentos lacustres terciários, exibem uma forte relação entre sílica e alcalinidade, característica de intemperismo sobre silicatos. Nesses rios os menores conteúdos (~0,0-0,5 vezes a média geral da bacia para N⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e alcalis e 0,7-1,1 vezes para K⁺ e SiO₂) ocorrem sobre regiões terciárias e em bacias uniformemente aplainadas como o Rio Negro.

O Na⁺⁺, Mg⁺⁺ e Cl⁻ encontrados em água de chuva, cujo pH médio é da ordem de 4,8, são derivados da água do mar. Conteúdos em SO₄⁻ encontrados em amostras perto da costa são duas vezes o esperado, indicando uma fonte marinha adicional. Ca⁺⁺, K⁺, NO₃⁻ e NH₄⁺ parecem não ter uma influência marinha.

b) Elementos traços do Rio Amazonas e alguns tributários

Foram encontradas as seguintes concentrações em mol/kg de Ba, Sr e Cu em águas filtradas em papel de filtro de 0,4μ:

c) Composição do material em suspensão no Rio Amazonas e em seu estuário.

Foram determinados os elementos Mg, K, Ca, Si, Al, Ti, P, Mn e Fe. Baseados na relação elemento/Al amostras provenientes do canal principal do Rio Amazonas desde a região andina até a desembocadura mostram composições constantes. Em contraste, o Rio Negro, o maior tributário do Rio Amazonas, mostram material em suspensão com baixa razão de Si/Al, K/Al, Ca/Al e Mg/Al, enquanto Fe/Al, Mn/Al, Ti/Al e P/Al apresentam valores similares ao do canal principal. Os valores baixos refletem o intenso intemperis-

Locais	Ba	Sr	Cu
Tocantins	142,7	235	16,2
Xingu	310,4	—	7,3
Tapajós	155,5	—	6,0
Trombetas	131,0	185	9,1
Óbidos	157,5	316	29,1
Madeira	152,5	250	30,4
Negro	71,9	51	7,0
Solimões	163,1	390	29,3
Purus	207,2	269	—
Coari	107,4	142	7,4
Tefé	106,8	96	6,1
Japura	137,1	354	13,7
Juruá	347,5	412	19,2
Jutai	103,5	152	5,7
Iça	100,4	147	17,7
Javari	161,8	173	18,9
Napo	130,9	384	37,1
Iquitos	264,6	1078	31,1

mo e as águas muito ácidas do Rio Negro. No estuário do Rio Amazonas a produtividade biológica pode aumentar a razão Si/Al e P/Al.

d) Propriedades de trocas iônicas de sedimentos do Rio Amazonas

Os estudos foram feitos em relação à Na^{++} , Mg^{++} , Ca^{++} , K^{+} e H^{+} . Coeficientes de troca mostram valores aproximadamente constantes dentro do sistema, indicando a dominância de uma única fonte para as secções amostradas. A investigação da distribuição dos íons trocáveis entre fases oxidáveis, redutíveis e residuais demonstrou que todos os três componentes contribuem significativamente para a capacidade total de troca e a composição do complemento limite.

Reações entre material em suspensão e água do mar envolveu primariamente trocas entre Ca^{2+} periféricos por Na^{+} , modificando significativamente o fluxo de Na^{+} calculado a partir de dados concentração/descarga. Fluxos de Mg^{2+} e K^{+} decrescem também por reações de trocas, porém a extensões mais limitadas.

e) Geoquímica de isótopos estáveis do Rio Amazonas

O estudo de isótopos de oxigênio e de hidrogênio a partir de amostras de água de chuva e de águas do Rio Amazonas revelou:

1. que para o vapor de água atmosférico, os valores de $0^{18}/0^{16}$ e de D/H variam respectivamente de -10,4 a -15,7 e de -66,7 a -112,1 por mililitro. Perto de Belém os valores isotópicos estão próximos aos esperados em equilíbrio com a água do mar. Tornam-se mais negativos no sentido de Manaus, e nessa região o efeito de continentalidade acha-se bastante diminuído, provavelmente devido à contínua adição de vapor d'água por evapotranspiração;
2. que o valor médio $0^{18}/0^{16}$ das águas do canal principal é $8\text{‰} \pm 0,2$, os tributários mostrando uma variação desde -3,25 (Xingu) até -8,38 (Jupura);
3. que em 1976, no início da estação seca, a razão $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ no CO_2 atmosférico apresentou valores decrescentes para montante até Manaus, e a partir daí são uniformes em torno de -20,5‰. Em 1977, durante a estação chuvosa, os valores apresentavam-se mais dispersos e muito menos negativos, em média -13‰, provavelmente refletindo condições atmosféricas mais instáveis;
4. que a razão $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ dos carbonatos dissolvidos decresce rio abaixo de -14‰ em Iquitos para -22‰ na desembocadura;
5. que a composição isotópica do enxofre a partir de sulfatos dissolvidos é bastante constante em torno de $\sim +6,8\text{‰}$, porém a composição isotópica do oxigênio decresce para jusante de $\sim +8\text{‰}$ para $\sim +3\text{‰}$.

- f) Efeitos químicos do encontro das águas do Rio Amazonas com o oceano

A projeção das águas do Rio Amazonas em direção ao mar origina uma larga cunha salina que se estende por 700 km a noroeste sobre a plataforma continental Brasileira e das Guianas. O desenvolvimento para Leste é controlado pela energia dos ventos alísios predominantes. Em maio-junho de 1976 o eixo principal de fluxo estava por volta de 25 m de profundidade, em condições oceânicas além de 75 m.

Na desembocadura do rio as águas estão bem misturadas verticalmente, iniciando-se o desenvolvimento da cunha salina a uns 40 km da costa. O material em suspensão superficial decresce em profundidade logaritmicamente com a salinidade chegando a concentrações da ordem de 8‰ (5 ppm). O concomitante aumento em transparência resulta condições favoráveis para a existência de diatomáceas entre a zona com essa isossalidade até por volta de 15‰. A rica flora de diatomáceas não é acompanhada por organismos que dela se alimentem. Dentro dessa zona a concentração de nitrato superficial cai abruptamente para zero, sendo $\sim 10\mu$ mol/kg à superfície e o fosfato para $< 0,1\mu$ mol/kg de $0,5\mu$ mol/kg à superfície. A sílica mostra uma substancial deficiência de até 40μ

mol/kg. Dentro dessa zona improdutiva de baixa salinidade uma região altamente nutritiva é observada.

Na cunha salina os níveis de nutrientes são altos e variáveis. Ocorre uma substancial diminuição de nitrato em relação ao fosfato com valores N:P atingindo o mínimo de 6. Parece que ocorre uma intensiva desnitrificação, associado a metabolismo na cunha salina, apesar dos níveis de O_2 estarem geralmente acima de 100μ mol/kg.

A mistura vertical da cunha salina é restrita às áreas perto da costa sendo mais pronunciada em direção ao mar a partir da ilha de Maracá, situada a norte da desembocadura. Aí são encontrados os mais altos valores de NO_3 e PO_4 em superfície.

Estudos de carga e de vazão

- a) Sedimentos e vazão do rio Amazonas e seus principais tributários

Amostras de sedimentos em suspensão foram colhidas por amostrador pontual, especialmente confeccionado, e, com melhores resultados, por amostrador integrador de grande capacidade e para maiores profundidades.

O material em suspensão medido em Óbidos apresentou taxa mé-

dia estimada de 9×10^8 ton/ano, sendo metade desse volume contribuição do Rio Solimões e pelo menos um quarto do Rio Madeira. O Rio Negro contribuiu com menos de um por cento do material em suspensão. Areia ($>63\mu$) compreende um quarto a um terço do material em suspensão durante a estação das cheias. As frações de sedimentos entre 0,01 e 0,5 mm apresentam maior concentração junto ao fundo do rio do que em superfície. As concentrações de material em suspensão em secções transversais do Rio Amazonas e principais afluentes não apresentam distribuições uniformes, quer vertical quer transversalmente, e a maior parte das variações transversais é devido à diferença nas concentrações de silte e argila.

Vazões e cargas de material em suspensão medidas em diversas secções do Rio Amazonas forneceram os seguintes resultados:

O material de fundo, recolhido na sua maioria por draga de sucção, é areia fina à média em quase todas as secções transversais, desde Iquitos até a foz do rio Amazonas. A distribuição granulométrica do material de fundo não varia sensivelmente ao longo dos 3300 km do curso do rio.

b) Minerais pesados no leito do Rio Amazonas

Com a intenção de verificar a origem do material de fundo transportado pelo Rio Amazonas, amostras foram coletadas em 60 locais entre Belém (Brasil) até Iquitos (Peru). Tendo sido escolhidas 28 amostras as mesmas foram submetidas a um estudo mineralógico, o qual revelou os seguintes minerais pesados presentes: turmalina, zircão, granada, estauroлита, hiperstênio, piroxênio (augita), anfibólio (hornblenda), tremolita,

Estação	vazão $m^3 s^{-1}$	carga $10^6 ton d^{-1}$	concentração $mg \ell^{-1}$
Iquitos	48.000	1,7	400
São Paulo de Olivença	70.000	1,7	275
Santo Antonio do Iça	80.000	1,7	245
Coari	110.000	1,4	150
Manacapuru	130.000	2,2	200
Rio Negro	50.000	0,02	5
Rio Madeira	40.000	1,1	300
Óbidos	230.000	4,7	235

magnetita ou ilmenita e leucoxênio. Em quase todas as amostras ocorre uma grande quantidade de minerais instáveis idiomórficos, como hiperstênio, augita e anfibólio, indicando uma área fonte constituída por rochas básicas e ultrabásicas, diminuindo para jusante. Minerais estáveis, como zircão e turmalina, apresentam-se tanto angulosos como arredondados, indicando mais de uma área fonte, mas de qualquer modo sempre a partir de rochas ácidas.

Aplicando aos dados o método classificatório multivariante da

análise de agrupamentos (cluster analysis), dois maiores grupos de amostras foram ressaltados: um constituído por amostras localizadas no alto Rio Amazonas e com maior teor em minerais instáveis, provavelmente com origem andina; o outro formado principalmente por amostras que se localizam a partir da confluência com o Rio Juruá até Belém e contendo uma alta porcentagem em zircão e turmalina, indicando além de uma contribuição andina, fontes nos escudos precambrianos a norte e sul do Rio Amazonas.