QUÍMIO-ESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO DOS JASPILITOS DA FORMAÇÃO CARAJÁS (PA)

JOEL BUENANO MACAMBIRA¹ & ALFONSO SCHRANK²

Abstract *CHEMO-STRATIGRAPHY AND EVOLUTION OF THE JASPILITES OF THE CARAJÁS FORMATION – PARÁ STATE* Banded iron-formations (BIFs) are relatively frequent rocks in the Earth's crust and in the geological time but, after decades of research, their genesis remains controversial. Although ancient, with *ca.* 2,75 Ga, the BIFs of the Carajás formation are adequate to litho-geochemical studies since unlike the majority of other worldwide deposits, they were not affected by metamorphic transformations, and their chemical composition remain unchanged. These BIFs are jaspilites of the oxide facies and occur interlayered in volcanic rocks of the Grão Pará group.

Whole rocks chemical analyses for major, trace, rare earth elements and loss-on-ignition (PF) as related to the original stratigraphic positions are presented together with analyses from separated iron and silica bands. The study involved a qualitative survey using optical-emission-spectrography and chemical analyses by classical methods, ICP-MS, XRF, AAS and INAA.

The BIFs of the Carajás Formation have average contents as follow (62 samples): $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} = 53,65\%$; $\text{SiO}_2 = 44,60\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,63\%$; $\text{FeO} = 1,31\%$; $\text{MnO} = 0,06\%$; $\text{MgO} = 0,1\%$; $\text{CaO} = 0,04\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,04\%$; $\text{K}_2\text{O} = 0,02\%$; $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,01\%$ and $\text{PF} = 0,73\%$. The sampling with stratigraphic control was very important to establish that from base to top of the BIFs there is Si enrichment with a proportional decrease in Fe (correlation coefficient = -0,99). The REE presents very low abundances ($\Sigma\text{REE}_{\text{mean}} = 5,27$ ppm), when compared with others BIFs and these abundances are higher in the iron-rich bands and at the base of the BIFs. From base to top of the package there is a relative enrichment in HREE and a less pronounced Eu positive anomaly, indicating a gradual reduction on the contribution of the hydrothermal sources to the jaspilite genesis.

These results indicate that at *circa* 2.750 Ma the jaspilites of the Carajás formation were deposited in a wide and tectonically stable shallow marine platform. The foremost contribution of hydrothermal sources in the jaspilite genesis at the base of the sedimentary package and the absence of associated clastics points out to a depositional site away from the coastline. However, while the BIFs were deposited, the contribution of these hydrothermal sources decreased while the Si contents were increased.

Keywords: geochemistry, jaspilites, BIF, Archean

Resumo Formações ferríferas bandadas (*banded iron-formations* = BIFs) são rochas relativamente frequentes na crosta terrestre e no tempo geológico, mesmo assim, após décadas de estudos, sua gênese ainda é controversa. Apesar de antigas, com cerca de 2,75 Ga, as BIFs da Formação Carajás são adequadas para o estudo lito-geoquímico pois, diferentes da maioria dos depósitos do mundo, não foram afetadas por transformações metamórficas e sua composição química permanece original. Essas BIFs ainda são jaspilitos de fácies óxido e ocorrem intercalados entre rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará.

São aqui apresentados os resultados de análises químicas de elementos maiores, traços e terras raras, além de perda ao fogo (PF) em rocha total, relacionadas com as posições estratigráficas originais e análises de bandas ferríferas e silicosas em separado. Do estudo fizeram parte um levantamento qualitativo por espectrografia óptica de emissão e análises químicas por via úmida, ICP-MS, FRX, AA e INAA.

As BIFs da Formação Carajás apresentam os seguintes teores médios (62 amostras): $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} = 53,65\%$; $\text{SiO}_2 = 44,60\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,63\%$; $\text{FeO} = 1,31\%$; $\text{MnO} = 0,06\%$; $\text{MgO} = 0,1\%$; $\text{CaO} = 0,04\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,04\%$; $\text{K}_2\text{O} = 0,02\%$; $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,01\%$ e $\text{PF} = 0,73\%$.

O controle estratigráfico na coleta das amostras foi fundamental para estabelecer que, da base para o topo do pacote, ocorre enriquecimento em Si com proporcional empobrecimento em Fe (coeficiente de correlação = - 0,99). Os ETR apresentam teores muito baixos, comparados com as demais BIFs ($\Sigma\text{ETR}_{\text{médio}} = 5,27$ ppm), sendo concomitantemente mais elevados na base do pacote e nas bandas ferruginosas. A partir da base, observam-se, ainda, progressivos enriquecimento relativo em ETRP e diminuição da anomalia positiva em Eu, indicando uma contribuição gradativamente menor de fontes hidrotermais na origem destes jaspilitos, em direção ao topo do pacote.

Estes resultados, em conjunto, sugerem que os jaspilitos da Formação Carajás depositaram-se em uma plataforma submarina rasa, ampla e tectonicamente estável. A contribuição preponderante de fontes hidrotermais na gênese dos jaspilitos da base do pacote sedimentar e a ausência de clásticos associados indicam um sítio de deposição distante de regiões costeiras. Entretanto, à medida que os BIFs se depositaram esta contribuição das fontes hidrotermais diminuiu enquanto aumentaram os teores de Si.

Palavras-chaves: geoquímica, jaspilitos, BIF, Arqueano

INTRODUÇÃO As formações ferríferas bandadas (*banded iron-formations* = BIFs) pré-cambrianas são responsáveis por 98% da produção mundial de ferro. Resistentes à erosão, afloram nos grandes terrenos pré-cambrianos de várias partes do Globo. Indicam condições específicas de sedimentação química aquosa de baixa energia, representam marcadores estratigráfico e ambiental e

registram muito bem transformações tais como deformação e metamorfismo.

O estudo dessas rochas visa esclarecer quais foram (i) os controles físico-químicos da sua deposição, (ii) as causas da ciclicidade, da espessura e da persistência do bandamento, (iii) em que ambiente tectônico se depositaram, (iv) qual era a composição da at-

1 - Caixa Postal: 1611- CEP: 66075-900 Belém – Pará, E-mail: joel@ufpa.br

2 - Caixa Postal: 6152- CEP: 13081-970 Campinas – São Paulo, E-mail: alfonso@ige.unicamp.br

mosfera e hidrosfera durante a deposição, (v) quais as fontes do Si e Fe e (vi) conhecer melhor a história evolutiva dos oceanos, atmosfera e biosfera.

As BIFs da Formação Carajás são extremamente adequadas para tais estudos pois, diferentes da maioria dos depósitos do mundo, não foram afetadas por metamorfismo regional e mostram estruturas deposicionais e diagenéticas preservadas (Macambira & Silva 1995). Nesse contexto, a sua composição química original pode ter sido preservada. São excelentes marcadores litológicos, devido à sua resistência à erosão, facilidade de identificação, e pelo seu posicionamento estratigráfico bem estabelecido (DOCEGEO 1988). Os jaspilitos da Formação Carajás são BIFs de fácies óxido, contidas numa seqüência vulcano-sedimentar arqueana não metamorfisada, o Grupo Grão Pará.

A área da presente investigação localiza-se no conjunto de jazidas de ferro denominado Serra Norte. As amostras provêm dos depósitos N1, N2 e N4 e a região em torno da Mina de Ferro N4E foi selecionada para detalhamento em função das facilidades de acesso e da disponibilidade de coleta de testemunhos de sondagem da CVRD, além do acompanhamento do avanço das frentes de lavra da Mina.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO A Província Mineral de Carajás (PMC) é uma unidade metalogenética que ocorre na borda SE do Cráton Amazônico, limitando-se a leste pelos rios Araguaia-Tocantins, a oeste pelo rio Xingu, a norte pela Serra do Bacajá e a sul pela Serra dos Gradaús (DOCEGEO 1988). Essa Província abriga um dos maiores depósitos de ferro do mundo (18 bilhões de toneladas) além de importantes depósitos de Mn, Au, Cu, Zn, e etc. As principais unidades litoestratigráficas encontram-se representadas no mapa geológico da figura 1.

A parte norte da PMC é constituída pelo Cinturão Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988), onde as rochas mais antigas pertencem ao Complexo Pium ou ao Complexo Xingu. O primeiro compreende granulitos máficos derivados de gabros, piroxenitos, noritos, dioritos e monzodioritos diferenciados e estratificados. O segundo é composto principalmente por gnaisses de composição essencialmente granodiorítica variavelmente migmatizados. O Complexo Pium foi datado em 3.002 ± 14 Ma - idade de cristalização do protólito dos granulitos e em 2.859 ± 9 Ma - idade do metamorfismo de fácies granulito (Pidgeon *et al.* 2000) enquanto o Complexo Xingu forneceu valores de 2.859 ± 4 Ma (Machado *et al.* 1991) para a idade da última migmatização que o afetou. Localmente ocorrem complexos máfico-ultramáficos arqueanos, como o Complexo Luanga, que é mineralizado em Cr e platinóides.

O Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO 1988) compreende seqüências arqueanas, dentre elas o Grupo Grão Pará, que é uma seqüência vulcanossedimentar não metamorfisada, composta na base pela Formação Parauapebas representada por basaltos com níveis de riolitos subordinados, cuja idade de cristalização é de 2.758 ± 2 Ma (Machado *et al.* 1991). Em seguida ocorrem os jaspilitos da Formação Carajás e, segundo Macambira *et al.* (1990) sobre os jaspilitos ocorrem rochas da Formação Igarapé Cigarra (basaltos com lentes de BIFs, cherts, siltitos e arenitos), assim como os siltitos carbonáticos da jazida de manganês do Azul (Formação Igarapé Boa Sorte). Nogueira *et al.* (1995) redefiniram a Formação Águas Claras (de Araújo *et al.* 1988) posicionando-a discordantemente sobre a Formação Carajás.

Granitos e dioritos arqueanos (Suíte Plaquê) ocorrem principalmente nas porções sul e oeste da Serra Sul. Ainda no Arqueano alojou-se o Granito Estrela, a leste da Serra Norte.

Espero pacote de arenitos fluviais com níveis de conglomerados e siltitos que recobrem o Grupo Grão Pará foram denominados de Membro Azul (base da Formação Rio Fresco) por Silva *et al.* (1974), de Formação Igarapé Azul por Macambira *et al.* (1990) e de Formação Gorotire por Nogueira *et al.* (1995), retomando proposta de Tolbert *et al.* (1968, 1971).

Granitos intrusivos anorogênicos (tipo Serra dos Carajás) datados em cerca de 1.880 Ma (Wirth *et al.* 1986, Machado *et al.* 1991) cortam os vários litotipos da região da Serra dos Carajás, além de corpos máficos intrusivos mais jovens.

Os jaspilitos da Formação Carajás são BIFs de fácies óxido com cerca de 220 m de espessura, na área da Mina N4E, com bandamento centimétrico extremamente persistente lateralmente, constituído por bandas de hematita/magnetita que se alternam com bandas de jaspe vermelho e/ou chert branco. Apesar do caráter bimodal dos jaspilitos observam-se, ao microscópio, lentes e níveis de uma banda na outra. As estruturas sedimentares encontram-se preservadas e o baixo grau de recristalização do jaspe, indicado pela presença de quartzo micro- a criptocristalino, mostra que essas rochas não sofreram metamorfismo regional. A idade de deposição obtida por Krymsky *et al.* (2002) foi de 2.751 ± 4 Ma. Trendall *et al.* (1998) estabeleceram um intervalo de 2.759 a 2.681 Ma para a deposição de todo o Grupo Grão Pará e de 2740 a 2750 Ma para a sedimentação do material precursor do jaspilito.

Os depósitos de minério de ferro hematítico são produto de enriquecimento supergênico sobre os jaspilitos da Formação Carajás, que causou a lixiviação preferencial da sílica e elevou os teores de ferro de cerca de 36–45% para 64–68% (Beisiegel 1982). Segundo Vasconcelos (1996) o processo supergênico teria ocorrido desde, pelo menos 70 Ma, de forma episódica, até o presente.

BIFs PRÉ-CAMBRIANAS—ALGUMAS CARACTERÍSTICAS PARTICULARES Segundo James (1983) as BIFs seriam compostas essencialmente por Fe e Si, cujos teores somariam 60 a 85%. Os demais componentes seriam Al_2O_3 , MgO, CaO, CO_2 , K_2O , Na_2O e S. Os teores de elementos-traço e terras raras são sistematicamente baixos em todas as BIFs.

Segundo Lepp (1987) os únicos componentes das BIFs que mostram tipicamente mais de um por cento do total são: SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO, MgO, CaO e CO_2 . Algumas vezes alumina pode participar da lista, mas a maioria dos pesquisadores considera-a como representando mistura de clásticos e não o precipitado inicial.

A diferença composicional é marcante entre as bandas de Fe e Si. Essas bandas, em função da mineralogia contrastante, representam condições de precipitação totalmente distintas dentro do mesmo ambiente, com recorrência sistemática dessas condições contrastantes refletidas no bandamento persistente lateralmente e na homogeneidade de cada banda, independente da sua espessura. No entanto, apesar do contraste, essas condições não são sempre excludentes, pois existem lentes e lâminas de Fe nas bandas silicosas e vice-versa. De fato a deposição do Si ocorre por supersaturação, de forma lenta e quase contínua, enquanto a precipitação do Fe, por oxidação, ocorre de forma rápida mas é intermitente, o que resulta no bandamento.

Ao se tentar estabelecer a composição química média das BIFs observam-se diferenças marcantes em função do principal mineral de ferro presente (as fácies ou tipos): óxido, silicato, sulfeto ou carbonato. Também foram observadas diferenças composicionais entre rochas de mesma fácies em função do ambiente deposicional, os dois principais tipos de BIFs: Algoma e Superior. O primeiro teria se depositado em fossas e *grabens* ao longo de cadeias

Figura 1 - Mapa geológico da região de Carajás, segundo Tallarico et al. (2000).

meso-oceânicas, arcos vulcânicos e bacias pós-arco por processos hidrotermais e vulcânicos associados ao desenvolvimento de faixas tectônicas principais. O tipo Superior teria se depositado próximo ao litoral, em plataforma continental, em bacias restritas e isoladas estendendo-se até bacias profundas e fossas de falhamento onde a sedimentação clástica foi limitada ou restringida. Por isso os estudiosos da geoquímica das BIFs recomendam comparar apenas rochas de mesmas fácies e tipos. Considerando-se apenas as BIFs do tipo óxido (Algoma e Superior) verifica-se que embora os elementos maiores apresentem teores bem semelhantes, os traços são influenciados pela presença de clásticos ou vulcânicos, maior ou menor contribuição de soluções hidrotermais ou fluviais, de modo que é possível estabelecer qual a influência da área fonte, da história do transporte e do ambiente deposicional na origem de diferentes depósitos de BIF no mundo (Rai & Paul 1990). No presente estudo serão comparados as BIFs da Formação Carajás com ambos tipos, Superior e Algoma, uma vez que

elas apresentam características dos dois tipos.

Mais recentemente, os elementos terras raras (ETR) tem sido usados para auxiliar a inferir características do ambiente deposicional das BIFs pré-cambrianas de fácies óxido, em termos de fonte dos elementos, temperatura e profundidade da água, situação paleogeográfica, ambiente tectônico, Eh, pH, etc.

Segundo Manikyamba et al. (1993) os oceanos modernos recebem a maioria dos seus ETR de três fontes: (1) a carga dissolvida dos rios, (2) alteração hidrotermal da crosta oceânica e (3) soluções derivadas da diagênese dos sedimentos. A magnitude e padrão da contribuição diagenética dos ETR é incerta, mas na escala global ela é provavelmente pequena comparada com os fluxos erosional e hidrotermal. Dados de ETR de sedimentos metalíferos da Cadeia Leste do Pacífico (*East Pacific Rise - EPR*) mostram evidências da remoção dos ETR da água pelos óxi-hidróxidos de ferro e um claro padrão de decréscimo gradual do empobrecimento em ETR leves (ETRL) com a distância do eixo da cadeia. Essas

relações implicam que oxi-hidróxidos de metais que precipitam a partir de plumas hidrotermais são preferencialmente enriquecidos em ETRL de tal modo que, até que os ETR na pluma sejam removidos para longe do eixo da cadeia, a massa de água residual fica empobrecida em ETRL. As semelhanças entre o padrão de ETR dos sedimentos metalíferos modernos e as BIFs de fácies óxido sugerem que a remoção por hidróxidos de ferro foi o mecanismo responsável pela incorporação dos ETR nas BIFs. O *trend* geral dos ETR nas BIFs é compatível com um mecanismo de formação de BIFs de fácies óxido no qual hidróxidos de ferro precipitaram a partir da água do mar com um padrão de ETR similar ao do oceano moderno (exceto para Ce e Eu).

Segundo Derry & Jacobsen (1990) as BIFs fácies óxido independente da idade e tipo (Algoma ou Superior) mostram típico padrão empobrecido em ETRL em relação aos folhelhos, $(La/Yb)_N$ entre 0,3-0,8 e anomalia positiva de Eu. Sugerem que Fe e ETR coprecipitaram a partir da água do mar como oxi-hidróxidos de Fe e indicam que fontes hidrotermais submarinas foram importantes, ou mesmo dominantes para o fornecimento de Fe e ETR para as BIFs. Numerosos trabalhos seguem esta mesma linha de raciocínio: Alibert & McCulloch (1993), Bau & Moller (1993), Manikyamba *et al.* (1993), Gnaneshwar Rao & Naqvi (1995), Khan *et al.* (1996), Kato *et al.* (1998), entre outros.

Lindenmayer *et al.* (2001) apresentam resultados petrográficos e geoquímicos para as BIFs da Formação Carajás da Serra Norte, junto com amostras metamorfizadas da Serra Sul, além de analisarem o comportamento dos ETR, normalizados pelo condrito. Concluem pela influência de fluidos hidrotermais submarinos, provenientes de fumarolas próximas a uma cadeia mesoceânica, na gênese das BIFs.

GEOQUÍMICA DOS JASPILOTOS DA FORMAÇÃO CARAJÁS

As BIFs da Formação Carajás são rochas sedimentares químicas não metamorfizadas, cuja composição aparentemente não foi modificada. A assembléia mineral, se não é primária, foi modificada apenas por processos diagenéticos. Tampouco foram observados materiais clásticos associados aos jaspilitos que pudessem "contaminar" o sedimento químico. Esses fatos permitem considerar os resultados das análises representativos da composição do sedimento na época da deposição. Desse modo, as variações observadas devem refletir as mudanças no processo deposicional e portanto no próprio ambiente sedimentar (o meio aquoso).

Foram selecionadas para análise química as amostras-de-mão e de testemunhos de sondagens isentas de sinais de alteração intempérica e hidrotermal, sem veios ou fraturas preenchidas e não deformadas nem recristalizadas. Cerca de 200 g de amostra foram pulverizadas a menos que 100 mesh em moinho de ágata ou *shutter box*.

Técnicas Analíticas Parte das amostras foram analisadas no Laboratório de Análises Químicas do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), por via úmida. Ali, o Si foi determinado por gravimetria, o Al por titulação com EDTA, o Fe total foi analisado por espectrofotometria e o Fe (II) por titulação com dicromato de K. A perda-ao-fogo (PF) foi calculada gravimetricamente por calcinação. CaO, MgO, K₂O, Na₂O e MnO foram determinados por espectrometria de absorção atômica, bem como os traços: Co, Pb, Cr, Ni, Cu e Zn. Esses elementos-traço foram selecionados a partir de um estudo qualitativo prévio, por espectrografia ótica de emissão, que determinou serem esses os elementos presentes nos jaspilitos que poderiam ser determina-

dos naquele laboratório. Esse estudo prévio qualitativo foi desenvolvido com 25 amostras de bandas separadas, sendo 9 ricas em minerais de Fe (opacos), 7 bandas de jaspe vermelho e 9 bandas de chert branco.

Para a separação em bandas foram selecionadas amostras-de-mão e de testemunhos de sondagem que, uma vez fixadas em torno de bancada, foram golpeadas com talhadeira pequena e martelo nos planos do acamamento, possibilitando a separação em bandas de opacos e de sílica. Eventuais fragmentos de uma banda no contato com a banda adjacente foram desbastados com roda de esmeril.

Outro conjunto de amostras foi analisado para elementos maiores por fluorescência de Raios-X e para 28 elementos-traço por ICP-MS em laboratório comercial (Bondar Clegg, de Vancouver – Canadá). Esse procedimento permitiu verificar a grande concordância de resultados não só entre os métodos clássicos (via úmida) e instrumentais assim como entre as análises produzidas nos laboratórios da UFPA e da Bondar Clegg, para elementos maiores, pois 6 amostras foram analisadas em ambos os laboratórios.

As terras raras foram analisadas por ativação neutrônica no Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN), em São Paulo. Cerca de 100 mg de amostra foram irradiados por 8 h em um fluxo de neutrons térmicos de 10^{12} n cm⁻²s⁻¹, juntamente com aproximadamente 100 mg dos materiais de referência GS-N e BE-N como padrões. A determinação dos elementos foi feita em um espectrômetro de raios gama. A concentração em Gd foi estimada por interpolação entre Sm e Yb, utilizando a fórmula da linha de tendência logarítmica.

Elementos maiores As 62 amostras analisadas em rocha total, coletadas nas jazidas de ferro N1 a N4, revelaram teores médios de Fe₂O₃T= 53,65%; SiO₂= 44,60%; Al₂O₃= 0,63%; FeO= 1,31%; MnO= 0,06%; MgO= 0,1%; CaO= 0,04%; Na₂O= 0,04%; K₂O= 0,02%; P₂O₅= 0,01% e PF= 0,73% (Tabela 1).

Chama a atenção, nas amostras de Carajás, o teor de Fe₂O₃T, cerca de 10% acima da média para as BIFs de fácies óxido do tipo Algoma ou Superior (Gross 1990), além dos valores muito mais baixos, para os demais óxidos, conforme pode ser verificado na Tabela 2. Nota-se também que a soma de Fe e Si em Carajás está sistematicamente acima de 97% enquanto para os tipos Algoma e Superior raramente chega a 92%, evidenciando a alta pureza dos jaspilitos de Carajás. Fe₂O₃T e SiO₂ apresentam comportamento antitético, resultado da composição bimodal dos jaspilitos, mostrado pelo coeficiente de correlação negativo (-0,99) (Fig. 2). A razão Fe₂O₃T/FeO variou de 17,81 para 194,48 com média de 53,96, muito acima da média para os BIFs de fácies óxido dos tipos Algoma (3,48) e Superior (5,67) do Canadá (Gross 1990). Entre os óxidos maiores, excetuando-se SiO₂ e Fe₂O₃T, apenas CaO e Na₂O apresentaram coeficiente de correlação observável (+0,77), enquanto nos depósitos do Canadá a correlação é entre Al₂O₃ e K₂O.

Comparando os gráficos (Fig. 3) das composições médias das amostras de BIFs da Formação Carajás com os tipos Algoma e Superior (fácies óxido), verifica-se que SiO₂ e FeO têm valores mais baixos em Carajás e Fe_{total} e Fe₂O₃ têm valores mais altos (Fig. 3A). Do MgO ao P₂O₅ os óxidos são sempre abaixo tanto do tipo Algoma quanto do Superior (Fig. 3B). Comparando o comportamento dos gráficos sem considerar os valores absolutos, verificamos que SiO₂ e Fe (Fe_{total}, FeO e Fe₂O₃) e Al₂O₃, Na₂O, K₂O e P₂O₅ têm mais semelhança com o padrão do tipo Superior. Destaca-se ainda o teor muito baixo de CaO em Carajás.

Elementos-traço Os elementos-traço em BIFs fácies óxido de

Tabela 1 - Óxidos dos elementos maiores e traços dos jaspilitos da Formação Carajás com seus valores mínimos, médios e máximos e a razão Fe_2O_3T/FeO . P.F.= perda ao fogo. ( ) = número de amostras, excluídas aquelas não analisadas e as com valores inferiores aos limites de detecção pelo método utilizado. Análises completas com respectivos limites de detecção podem ser obtidas com os autores.

ÓXIDOS (%)	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	TRAÇOS (ppm)	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO
SiO_2 (62)	27,34	44,60	64,94	Ba (44)	5	29,73	809
TiO_2 (31)	0,01	0,02	0,07	Zr (44)	9	16,89	143
Al_2O_3 (59)	0,07	0,63	4,16	Pb (60)	4	18,33	33
FeO (19)	0,29	1,31	2,43	Ga (44)	14	21,16	27
Fe_2O_3T (62)	32,6	53,65	70,28	Zn (60)	17	66,58	246
Fe_2O_3T/FeO (19)	17,81	53,96	194,48	Cu (56)	1	29,79	185
MnO (62)	0,01	0,06	1,7	Ni (54)	1	7,85	21
MgO (60)	0,01	0,1	2,3	Cr (59)	3	17,20	39
CaO (62)	0,01	0,04	0,23	Sc (44)	0,1	0,27	1,4
Na_2O (12)	0,01	0,04	0,18	Co (60)	7	11,10	22
K_2O (55)	0,01	0,02	0,08	Bi (25)	5	6,20	9
P_2O_5 (43)	0,01	0,01	0,05	Sb (28)	5	7,43	12
P.F. (55)	0,1	0,73	2,91				

Tabela 2: Comparação das composições médias de óxidos maiores das BIFs de Carajás com os tipos Algoma e Superior (fácies óxido) do Canadá (Gross 1990).

%	Carajás	Superior	Algoma
SiO_2	44,6	47,71	47,84
Al_2O_3	0,63	1,28	2,66
Fe_2O_3T	53,65	44,27	44,19
FeO	1,31	7,80	12,7
MgO	0,10	1,24	1,58
CaO	0,04	1,61	1,67
MnO	0,06	0,66	0,14
K_2O	0,02	0,15	0,72
Na_2O	0,04	0,11	0,33
Fe_2O_3T/FeO	53,96	5,67	3,48

Figura 2 - Correlação SiO_2/Fe_2O_3T para 62 amostras de rocha total ($r = -0,99$).

Figura 3 - A) Comparação da média dos elementos maiores das BIFs de Carajás, com os tipos Algoma e Superior do Canadá. B) Em escala logarítmica.

depósitos do Canadá (Gross 1990) e da Austrália (Dymek & Klein 1988) mostram sempre valores baixos, porém em Carajás esses teores são muito baixos (Tabela 1). Apenas 12 elementos-traço são apresentados, pois 7 elementos (Mo, Te, Sn, W, Ta, Nb, Y) ficaram abaixo dos limites de determinação do ICP-MS e outros 9 mostram valores mensuráveis em tão poucas amostras que não são apresentados (Au, Ag, Cd, As, V, Li, Sr, Th e U). Foram detec-

Figura 4 - Correlação Ga/Fe_2O_3T ($r = +0,95$) para 44 amostras, em rocha total.

tados em todas as amostras os 7 elementos: Pb, Zn, Co, Ba, Zr, Ga e Sc. Não foram notadas correlações importantes ($r > 0,75$) entre pares de elementos, exceto entre Fe_2O_3T e Ga, cuja razão mostrou correlação positiva (0,95) (Fig. 4) e entre Al_2O_3 e Ni, com correlação de +0,78. Os teores médios de Ba, Zr, Ni, Cr, Sc e Co em Carajás estão muito abaixo das médias dos depósitos do Canadá de fácies óxido, os teores de Zn estão na faixa do tipo Algoma e o Cu apresenta valores intermediários entre os tipos Algoma e Superior. Os teores de Ga (21 ppm), Bi (6 ppm) e Pb (18 ppm) são cerca de duas vezes superiores à média das BIFs de tipo Algoma ou Superior e o Sb (7 ppm) é sete vezes maior que nos depósitos conhecidos. Entre os elementos-traço observa-se que aqueles de afinidade com rochas ígneas félsicas tem teores tão baixos que não chegaram a ser detectados, já aqueles de afinidade com rochas máficas, apesar de baixos, foram detectados na maioria das amostras.

A comparação do padrão de distribuição dos elementos-traço ferromagnesianos dos jaspilitos da Formação Carajás (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu e Zn) com depósitos de fácies óxido dos tipos Algoma e Superior do Canadá (Fig. 5) revelou que, em Carajás, Cu e Zn estão na mesma ordem de grandeza, enquanto os demais elementos apresentam valores muito baixos.

Elementos Terras Raras Os ETR são baixos nas BIFs fácies óxido de todo o mundo, variando de 5-20 ppm (Appel 1987) a 5-50 ppm (Davy 1983). Os teores de ETR determinados em Carajás (Tabela 3) foram muito baixos, com média de 5,27 ppm (max.=11,40 e min.=3,17 ppm) concordando com Appel (1987) que diz que a distribuição das ETR parece estar relacionada com o tipo de fácies, sendo o óxido o que apresenta os valores mais baixos.

A análise do comportamento dos ETR em BIFs tem sido feita mais recentemente por muitos estudiosos, normalizando os resultados pelos padrões NASC (North American Shale Composite), ES (European Shale) ou PAAS (Pos-Archean Australian Shale). Vários autores sugerem valores para esses padrões. Na figura 6 encontram-se esses padrões, normalizados pelo condrito para comparação, mostrando a pouca diferença entre eles. Seguindo a recomendação de Kato *et al.* (1998) os resultados dos ETR da Formação Carajás foram normalizados pelo NASC obtido por Goldstein & Jacobsen (1988).

Figura 5 - Média dos elementos-traço ferromagnesianos das BIFs de Carajás comparados com os tipos Algoma e Superior do Canadá (Gross 1990; os dados para "V" são compilados de Gross & McLeod 1980), normalizados pela crosta continental superior de Taylor & McLennan (1985).

Figura 6 - Distribuição dos ETR em ES, PAAS, NASC-1 (Rollinson 1993) e NASC-2 (Goldstein & Jacobsen 1988), normalizados pelo condrito de Haskin *et al.* (1968).

Análises das bandas separadas As amostras foram então separadas em bandas claras (ricas em Si) e escuras (ricas em Fe) e analisadas para elementos maiores. O teor médio de SiO_2 nas bandas claras foi de 81,38%, cerca de 5 vezes superior ao de Fe_2O_3T (16,35%). Nas bandas escuras o Fe_2O_3T teve média de 73,85%, apenas 3 vezes maior que o SiO_2 (23,41%), o que mostra que há muito mais silício na banda clara do que ferro na banda escura, ou seja, a rocha é, de fato, chert (ou jaspé) intercalado com camadas de óxidos de ferro. Apesar disso, a presença de um elemento não exclui o outro, sendo o menor valor de SiO_2 na banda escura de 6% e de Fe_2O_3 na banda clara de 2%, ou seja, mesmo em termos de menor teor, há 3 vezes mais Si na banda de Fe do que Fe na banda rica em Si. Não apareceram tendências de aumento ou diminuição nos teores desses elementos para o topo ou para a base. Os resultados estão na Tabela 4, onde observa-se quais compostos acompanham preferencialmente o Fe (CaO e PF, que são duas vezes

Tabela 3 - Distribuição dos ETR (ppm) em rocha total de jaspilitos com as médias das amostras do topo e da base da Formação Carajás, e nas bandas ricas em Fe e em Si, separadas da amostra VW-6-D. NASC segundo Goldstein & Jacobsen (1988). (—) Abaixo do limite de detecção.

	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Yb	Lu	Σ	(La/Yb)N	Eu/Eu*
F-303 (23, 38-48)	1,24	1,52	-----	0,09	0,13	0,16	0,16	-----	3,3	0,61	4,79
F-304 (297, 75-80)	1,30	1,29	-----	0,17	0,11	0,18	0,12	-----	3,17	0,85	2,94
PSN-III-31	1,97	1,85	-----	0,26	0,18	0,32	0,25	-----	4,83	0,62	2,89
MR-9	1,38	1,80	-----	0,19	0,14	0,20	0,14	-----	3,85	0,77	3,36
JV-5	1,26	1,60	-----	0,53	0,20	0,45	0,22	0,03	4,29	0,45	1,92
Média do Topo	1,43	1,61	-----	0,25	0,15	0,26	0,18	0,03	3,89	0,66	3,18
PSN-I-20	1,30	1,05	-----	0,29	0,45	0,25	0,12	-----	3,46	0,85	7,85
TJ-6-C	2,3	3,7	-----	0,22	0,10	0,20	0,11	-----	6,63	1,64	2,24
JW-5-A	2,7	3,7	-----	0,22	0,10	0,20	0,11	-----	7,03	1,93	2,24
JW-3	3,3	5,0	1,90	0,43	0,20	0,37	0,18	0,02	11,4	1,44	2,36
VW-6-D (RT)	1,99	2,30	-----	0,14	0,09	0,14	0,09	0,02	4,77	1,74	3,01
Média da Base	2,32	3,15	1,90	0,26	0,19	0,23	0,12	0,02	6,66	1,52	3,54
VW-6-D (Si)	0,41	0,61	-----	0,04	0,04	0,07	0,07	-----	1,24	0,46	3,35
VW-6-D (Fe)	1,43	1,59	-----	0,14	0,13	0,19	0,16	0,02	3,66	0,70	3,66
Média de Carajás	1,87	2,38	1,9	0,25	0,17	0,25	0,15	0,02	5,27		
NASC	34,0	66,7	30,1	5,80	1,16	5,12	2,67	0,41	145,96		

Tabela 4 - Análises químicas de: A) bandas ricas em Fe_2O_3 (7 amostras) e B) bandas ricas em SiO_2 (10 amostras). (*) Valores inferiores aos limites de detecção pelo método de análise utilizado, excluídas do cálculo da média.

	Vw.6.c	Vw.6.d	Tj.6.b	F.211.b	PSN.III.33b	Tj.2.b	F.252.b	Média	(A)
SiO_2	18,60	19,73	27,89	6,83	27,83	20,85	42,16	23,41	
Al_2O_3	0,36	0,47	0,76	1,26	*	0,36	0,73	0,66	
Fe_2O_3 T	77,63	76,78	71,51	90,05	70,02	77,97	52,99	73,85	
FeO	0,35	0,26	1,07	0,72	0,33	1,04	0,50	0,61	
MgO	0,06	0,05	0,03	0,05	0,02	0,03	0,06	0,04	
CaO	0,11	0,21	0,18	0,21	0,05	0,15	0,20	0,16	
MnO	*	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	*	0,01	
K_2O	0,03	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,01	0,03	
Na_2O	0,60	0,03	0,06	0,07	0,04	0,19	0,02	0,14	
P.F	1,07	0,98	0,33	2,09	0,60	*	2,77	1,31	
Total	98,46	98,29	100,78	100,61	98,61	99,59	98,94	99,33	

	Vw.6.a	Vw.6.d.a	Tj.6.B.a	F.211.a	PSN.III.33a	Tj.2.a	F.252. a	F.252.c	F.303	Jw.5.b	Média	(B)
SiO_2	69,29	86,85	94,04	97,81	61,27	78,95	84,63	85,81	68,13	87,03	81,38	
Al_2O_3	1,02	1,01	2,02	*	3,03	0,76	2,53	0,37	0,50	2,03	1,47	
Fe_2O_3 T	29,98	10,52	3,97	2,13	35,95	18,07	9,48	12,99	29,45	10,97	16,35	
FeO	0,29	0,29	0,72	0,14	0,50	1,03	0,77	0,29	1,07	0,36	0,55	
MgO	0,04	0,06	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,05	0,04	
CaO	0,07	0,07	0,05	0,04	0,09	0,23	0,11	0,02	0,04	0,07	0,08	
MnO	*	0,04	0,03	0,02	0,02	*	*	0,02	0,02	0,01	0,02	
K_2O	0,04	0,03	0,44	0,06	0,05	0,02	0,10	0,03	0,04	0,05	0,09	
Na_2O	0,02	0,02	0,07	0,02	0,08	0,05	0,14	0,08	0,06	0,72	0,13	
P.F	0,40	0,42	0,18	0,69	0,38	0,79	1,50	1,04	0,52	0,18	0,61	
Total	100,86	99,02	100,83	100,79	100,89	98,90	98,52	100,39	98,82	101,11	100,01	

mais elevados que na banda silicosa) e o Si (Al_2O_3 e K_2O , 2 e 3 vezes maiores, respectivamente, que na banda ferrífera). Nota-se também que mesmo com as bandas separadas, o teor de Fe + Si na mesma amostra permanece maior que 97%.

O estudo qualitativo, por espectrografia óptica de emissão, das bandas de minerais opacos (hematita/magnetita), de jaspe e de chert revelou a presença de cinco elementos (Si, Fe, Al, Mn e Mg)

em todas as bandas. Foi verificada a tendência de os elementos-traço (Pb, Ti, Mo, Co, Ni, Cr, V, Ga, Ag, Zn e Y) ocorrerem quase exclusivamente na banda de opacos, comparados com as bandas de chert de cinco amostras. Em uma amostra, que apresentava as três bandas (opacos, jaspe e chert), a separação foi completa. Todas possuíam os cinco elementos Si, Fe, Al, Mn e Mg, porém não foram detectados traços na banda de chert, a banda de jaspe

continha apenas Cr e V e a banda de opacos apresentava todos os demais traços.

Não é comum separar as bandas para análise, apenas Davy (1983) apresenta alguns resultados com amostras de diversos tipos da Austrália e da Finlândia e Khan *et al.* (1996) que analisaram amostras da Índia, destacam as diferenças entre as bandas. A separação, entretanto, foi útil no estudo dos ETR, como veremos adiante.

Khan *et al.* (1996), com base no raio iônico e valência, destacaram a tendência dos ETR se concentrarem preferencialmente na banda rica em Fe, nas BIFs de fácies óxido, o que foi comprovado pela amostra VW-6-D, da qual foram separadas as bandas ricas em Fe e em Si (Fig. 7). Os ETR mostraram teores cerca de 3 vezes mais elevados na fase rica em Fe (3,66 ppm) do que na fase rica em Si (1,24 ppm), enquanto a anomalia de Eu* é cerca de 10% maior. Na figura 7 foi lançada também, para comparação, a amostra de rocha total com as faixas de erros de leitura para as três frações. O grau de enriquecimento de ETRL é de 1,74 para rocha total, ao contrário, para as bandas separadas é de 0,70 para a camada de ferro e de 0,46 para a camada de silício. Nota-se ainda que, embora para La e Ce a soma dos teores das bandas seja igual ao teor da rocha total, isso não acontece a partir do Sm até o Yb. Tal comportamento seria explicado por heterogeneidades na amostra da ordem de 10-15 cm de distância, pois os erros de leitura não são suficientes para justificar essas diferenças.

Químio-estratigrafia Foram selecionadas amostras posicionadas na base (18) e no topo (6) da Formação Carajás, distribuídas na área toda, para verificar se o comportamento dos teores dos óxidos maiores mostrava alguma diferença entre essas porções, constatando-se um leve enriquecimento de Si da base (média = 40,36%) para o topo (44,52%), acompanhado pelo CaO e MgO e o inverso para o Fe (acompanhado pelo Na₂O), que varia de 57,15% na base para 53,39% no topo. Esse comportamento é mostrado também pelo coeficiente de correlação negativa (-0,99) entre Fe e Si. O FeO e a PF não mostraram variações importantes. As pequenas variações entre topo e base indicam que o ambiente deposicional praticamente não variou quimicamente para os elementos maiores.

Amostras selecionadas (13) da mina N4E, onde o controle do empilhamento estratigráfico é mais seguro, mostraram o comportamento observado na figura 8. Fe e Si são nitidamente antitéticos e mostram maior variação na parte inferior da seção (da base até a amostra JW-5-A) enquanto na metade superior (da amostra MR-4-A ao topo) esses elementos exibem menores variações. O Al tem padrão mais semelhante ao do Fe, enquanto Mg e Ca se assemelham ao Si. O Mn e o K têm comportamento errático, algo semelhante ao Si, pelo menos na porção basal. A menor variação de teores na porção superior indicaria maior homogeneidade geoquímica do ambiente e do processo deposicional comparado com a porção inferior, onde (e quando) teria havido maior irregularidade na disponibilidade dos elementos maiores.

Considerando que os elementos-traço tendem a concentrar na banda ferrífera, procurou-se verificar se eles acompanhavam o enriquecimento em ferro para a base do pacote, observando o comportamento dos teores dos traços nas amostras com controle do empilhamento estratigráfico (amostras dos gráficos da Fig. 8). Sete elementos (Ba, Ga, Ni, Sc, Co, Bi e Sb) não apresentaram diferenças suficientes (> 2 ppm) entre topo (média de 6 amostras) e base (média de 7 amostras) para caracterizar qualquer tendência. O Zr e o Cu apresentaram teores muito elevados em uma amostra

Figura 7 - Distribuição dos ETR, com as faixas de erro, das bandas ricas em Fe e em Si da amostra VW-6-D, normalizados pelo NASC de Goldstein & Jacobsen (1988).

cada (143 ppm e 166 ppm, respectivamente), distorcendo a média e impedindo comparações. O Pb, Zn e Cr mostraram teores médios um pouco mais elevados na base que no topo, o que poderia indicar que esses elementos tendem a acompanhar o enriquecimento em Fe para a base.

Em função da tendência observada, dos ETR concentrarem nas bandas ferríferas, e para evitar a influência do enriquecimento em Fe para a base, foram selecionadas 10 amostras, cujos teores de Fe₂O₃T estavam entre 50 e 60% e com controle da posição estratigráfica, para verificar o comportamento dos ETR ao longo do perfil (Tabela 3).

O grau de enriquecimento $(La/Yb)_N$ foi calculado pela equação (1) de Kato *et al.* (1998), revelando, para a base uma variação de 0,85-1,93 (com média 1,52) e um decréscimo para o topo, que apresentou variação de 0,45-0,85 e média de 0,66.

$$(La/Yb)_N = (La/Yb)_{amostra} / (La/Yb)_{NASC} \quad (1)$$

Esse decréscimo indicaria, segundo Derry & Jacobsen (1990) maior distância da fonte hidrotermal para o topo. Os valores da anomalia de Eu (Eu/Eu^*) foram determinados através da equação (2) de Kato *et al.* (1998) e mostraram um decréscimo dessa anomalia da base (3,54) para o topo (3,18).

$$Eu/Eu^* = (2 \cdot Eu/Eu_{NASC}) / [(Sm/Sm_{NASC}) + (Gd/Gd_{NASC})] \quad (2)$$

Todas as amostras apresentaram anomalia positiva de Eu ($Eu/Eu^* > 1$), o que, segundo Davy (1983) e Kato *et al.* (1998) indicaria origem hidrotermal. A diminuição da anomalia para o topo indicaria diminuição da influência hidrotermal. As amostras da base são mais ricas em ETRL do que as do topo, ocorrendo o inverso com os ETRP. Esse comportamento é melhor visualizado pelas médias das amostras do topo e da base da Formação Carajás (Fig. 9), que mostra as anomalias de Eu na base e no topo e o padrão de enriquecimento de ETRP para o topo, semelhante ao observado em sedimentos metalíferos recentes da Cadeia Leste do Pacífico (Kato *et al.* 1998). Em Carajás o ΣETR diminui da base (6,66 ppm) para o topo (3,89 ppm). Menor teor de ETR no topo indicaria diminuição da influência da fonte hidrotermal, o que é compatível com a diminuição concomitante de Fe e do grau de enriquecimento ETRL/ETRP para o topo e com a evolução da bacia para condições

Figura 8 - Químio-estratigrafia dos elementos maiores da Formação Carajás na Jazida N4E

Figura 9 - Distribuição dos ETR com as médias de 5 amostras do topo e 5 da base da Formação Carajás (jazidas N4 e N1), juntamente com a média total (10 amostras), para comparação. x = média.

menos confinantes. Ou poderia significar a redução do aporte de soluções hidrotermais para a água do mar e a consequente diminuição do fornecimento de elementos para os jaspilitos.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES As BIFs da Formação Carajás representam um dos maiores depósitos do mundo e tem equivalentes em quase todos os continentes. É importante caracterizar-se quimicamente essas rochas não apenas para comparar com outros depósitos, como também para tentar estabelecer restrições aos modelos para a sua gênese.

O número expressivo de amostras analisadas distribuídas na Serra Norte, a ausência de sedimentos clásticos associados e de sinais de metamorfismo permitem considerar os resultados como representativos da composição dos jaspilitos. O padrão de comportamento dos óxidos maiores (Fig. 3) de Carajás mostra mais semelhança com o tipo Superior que com o tipo Algoma. Apesar

disso, a comparação com os dois grandes tipos de BIFs de fácies óxido mostra, tanto nos elementos essenciais (Fe e Si) como nos demais óxidos maiores, algumas diferenças entre as quais o alto grau de pureza dos jaspilitos de Carajás ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{T} + \text{SiO}_2 > 97\%$), os teores muito baixos dos demais óxidos, ausência de correlação entre Fe ou Si e demais óxidos, ausência da correlação entre Al_2O_3 e K_2O e elevada (+0,77) correlação entre CaO e Na_2O . Além disso, a razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ (53,96) em Carajás, é mais de dez vezes maior que para os tipos Algoma ou Superior. Lindenmayer *et al.* (2001) já haviam destacado que, na Serra Sul, essa razão era menor (entre 5 e 8), confirmada pela maior porcentagem de magnetita, enquanto que na Serra Norte predomina a hematita. Concluíram que esse comportamento refletiria um grau de recrystalização mais avançado na Serra Sul, devido a metamorfismo de contato.

Os elementos-traço mostraram-se bem diferentes das demais BIFs do mundo. Seus teores, muito baixos, dificultam qualquer comparação com os depósitos mais conhecidos. Destaca-se, em Carajás, o teor de Ga (21 ppm), de Bi (6 ppm) e de Pb (18 ppm) que são cerca de duas vezes superiores aos descritos na literatura e o Sb (7 ppm) cerca de sete vezes maior. Além disso, os elementos-traço de afinidade máfica tem teores claramente superiores aos de afinidade félsica, indicando uma possível relação genética com os basaltos subjacentes da Formação Parauapebas.

O padrão dos elementos-traço ferromagnesianos é intermediário entre os tipos Algoma e Superior, mas é nítida a tendência de concentração desses elementos na banda de óxidos de ferro. Os teores mais elevados de Ga, Bi, Pb e Sb parecem ser uma feição particular de Carajás. O Ga tem correlação positiva com o $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{T}$ enquanto o Al, apesar do comportamento geoquímico semelhante ao do Ga, tem afinidade pelo Si e é antitético com o Fe.

As amostras com controle estratigráfico revelaram que o sedimento depositado tornou-se gradualmente mais rico em Si e pobre em Fe da base para o topo, o que é compatível com a diminuição da influência hidrotermal para o fornecimento de elementos metálicos para os jaspilitos.

Os jaspilitos da Formação Carajás são pobres em ETR, porém revelaram a tendência desses elementos se concentrarem na banda rica em Fe e em diminuir o teor em direção ao topo do pacote.

A diminuição da anomalia de Eu e o enriquecimento em ETRP para o topo são indicativos de maior influência da água do mar, (por analogia com o mar moderno) e da diminuição do aporte de soluções hidrotermais para o ambiente de deposição dos jaspilitos.

Até os anos 70 o debate sobre a provável fonte do ferro e do silício para as BIFs pré-cambrianas focalizava duas possibilidades principais: soluções intempéricas oriundas do continente ou soluções associadas ao vulcanismo submarino. Segundo Lepp (1987) o ambiente físico não afeta os processos de precipitação e é de importância secundária nas hipóteses de origem. A uniformidade da composição química das BIFs pré-cambrianas de variados tipos e idades significa que Fe e Si tiveram como fonte o oceano. Tal uniformidade não teria sido atingida se cada bacia dependesse do aporte continental local para o fornecimento dos seus compostos.

Com a evolução dos métodos analíticos, numerosas análises de elementos-traço, ETR e isótopos de Nd, O e C tornaram-se disponíveis na literatura. Praticamente todos os pesquisadores concordam com a importância da fonte hidrotermal no fornecimento de Fe e Si para as BIFs. A comparação com ambientes modernos também tem indicado esse tipo de fonte. Dymek & Klein (1988) observaram que uma mistura de pequenas quantidades de fluídos hidrotermais da Cadeia do Leste do Pacífico com águas do Norte do Oceano Atlântico, apresenta ΣETR , anomalia negativa de Ce e positiva de Eu* semelhantes às observadas em várias BIFs. As amostras de Carajás apresentam o mesmo padrão de mistura dessas soluções na proporção de 1:10 (Fig. 10).

Um argumento contrário aos fluídos vulcânicos como fonte do Fe era a sua baixa concentração nas exalações vulcânicas (Holland 1973; Jacobsen & Pimentel-Klose 1988), no entanto a concentração de Fe em fluídos hidrotermais é sensível à temperatura. Em fluídos experimentais o teor de Fe é $\cong 100$ vezes maior a 425°C do que a 350°C, segundo Gnaneshwar Rao & Naqvi (1995), e a faixa de temperatura dos fluídos hidrotermais nas cadeias oceânicas modernas seria de 350°–375°C. Alibert & McCulloch (1993) sugeriram que a atividade hidrotermal nas cadeias meso-oceânicas do Arqueano era muito maior devido a maior temperatura da crosta e/

ou ao maior volume de cadeias oceânicas.

As BIFs da Formação Carajás foram depositadas sobre espessos derrames de basaltos que devem ter extravasado a partir de cadeias meso-oceânicas. A elevada pureza em Fe e Si, e os baixos teores dos demais óxidos maiores indicam uma fonte hidrotermal para estes compostos.

Foi fundamental para o presente estudo, a análise do comportamento dos elementos maiores, traços e ETR ao longo do empilhamento estratigráfico, pois mostrou que o pacote não é geoquimicamente homogêneo. Há maior variação dos teores de elementos maiores na porção inferior, acompanhada por maior teor de alguns elementos-traço (Pb, Zn e Cr) e de ΣETR , maior anomalia de Eu* e maior razão $(La/Yb)_N$. Essas feições são compatíveis com ambiente de fluxos hidrotermais irregulares, talvez por diferenças de volume e temperatura no início da deposição do jaspilito. Por outro lado, na porção superior, o ambiente seria mais estável, com fluxos e temperaturas mais constantes, resultando em menor variabilidade nos teores dos elementos, maior diluição das soluções hidrotermais com diminuição da sua assinatura geoquímica (registrada pela diminuição da anomalia de Eu*), maior enriquecimento em ETRP e pela diminuição nos teores de Pb, Zn e Cr e de ΣETR da base para o topo do pacote. Tal comportamento é semelhante ao descrito por Derry & Jacobsen (1990) em sedimentos metalíferos da Cadeia Leste do Pacífico, onde há um claro padrão de diminuição dos ETRL com o aumento da distância entre o sítio de deposição dos sedimentos e a cadeia. O valor de $(La/Yb)_N$ é de aproximadamente 0,95 próximo das fontes hidrotermais e de cerca de 0,55 a 1.100 km de distância. No caso de Carajás este comportamento estaria registrado no empilhamento estratigráfico, sendo a porção basal (com $(La/Yb)_N = 1,52$) mais influenciada pelo volume de soluções providas de fontes hidrotermais relativamente próximas. Já a porção do topo (com $(La/Yb)_N = 0,66$), teria sido progressivamente menos afetada, talvez pela diminuição do volume de soluções hidrotermais, possivelmente porque as fontes ativas ficaram mais distantes. Ou seja, o comportamento dos teores de elementos maiores, traços e ETR, da anomalia de Eu* e do grau de enriquecimento $(La/Yb)_N$ ao longo do empilhamento estratigráfico apontam para uma origem das BIFs da Formação Carajás a partir de soluções hidrotermais associadas ao vulcanismo máfico que originou os basaltos da Formação Parauapebas. Com a diminuição da atividade vulcânica diminuiria também a influência hidrotermal no fornecimento de elementos para os jaspilitos.

A maioria dos pesquisadores de BIFs interpretam o comportamento dos ETR considerando um empilhamento estratigráfico que envolve rochas clásticas, pelíticas e químicas além de BIFs de fácies carbonato, sulfeto e silicato, associados ou intercalados às BIFs fácies óxido, pois essa é a situação geológica mais comum na maioria dos grandes depósitos. No caso de Carajás o empilhamento tem mais de 200 m de espessura de jaspilitos, sem clásticos ou BIFs de outras fácies. Isso descarta a possibilidade de que o comportamento dos ETR tenha sido influenciado pelo aporte de ETR de outras fontes que não soluções (hidrotermais, fluviais ou marinhas), o que reforça a interpretação de que as variações observadas ao longo do empilhamento estratigráfico refletem mudanças no meio aquoso a partir do qual as BIFs se depositaram.

A deposição de grandes corpos de BIFs no Arqueano, semelhantes à Formação Carajás, exige não só a disponibilidade de grandes quantidades de Fe e Si como também que sejam levados até uma plataforma continental. Fenômenos de ressurgência poderiam desempenhar esse papel de agente de transporte. A água do mar, enriquecida em Fe e Si pelas soluções hidrotermais seria

Figura 10 - Padrão de ETR dos fluídos hidrotermais da Cadeia Leste do Pacífico (FHCLP), da água do Atlântico Norte (AAN) e de mistura dessas soluções (1:10) (MIST) segundo Dymek e Klein 1988, juntamente com ETR de BIFs da Formação Carajás (BIFsFC) para comparação.

levada para regiões mais rasas, mais oxigenadas onde a precipitação do Si ocorreria por supersaturação de forma quase ininterrupta, que é demonstrada pelos teores de Si, de pelo menos 6%, na banda ferruginosa. A deposição do Si não impediria a precipitação do Fe, que ocorreria por oxidação. O oxigênio necessário para essa oxidação poderia ser produzido por organismos, num processo semelhante ao descrito por LaBerge *et al.* (1987) para BIFs do Arqueano e do Proterozóico Inferior. Nesse modelo deposicional o Fe e o Si em solução seriam precipitados pela ação de bactérias e oxidação fotossintética do Fe, junto com outros materiais orgânicos, tais como filamentos, algas, etc. Variações no fornecimento de nutrientes seriam responsáveis pela variação na espessura do bandamento das BIFs. A produção biológica local de oxigênio nos oceanos arqueanos pode ter provocado a precipitação de hematita mesmo que a atmosfera e o oceano tenham sido deficientes em oxigênio, como é aceito geralmente. Esses autores sugerem que no Arqueano *jaspilite iron-formations* com hematita e/ou magnetita formaram-se em condições sem excesso de matéria orgânica. A presença, nos jaspilitos de Carajás, de esferulitos de possível origem orgânica foi assinalada por Meirelles (1986) e Macambira (1992) e poderia apoiar essa hipótese.

Muito trabalho ainda pode aperfeiçoar o conhecimento sobre o quimismo dos jaspilitos da Formação Carajás, no entanto, consi-

dera-se que uma contribuição importante foi dada com a caracterização litogeoquímica, a assinatura geoquímica dos elementos-traço, o padrão de distribuição dos ETR, a determinação das anomalias de Eu, do grau de enriquecimento de ETRL/ETRP e, principalmente, do comportamento desses elementos ao longo do empilhamento estratigráfico. Essas informações podem contribuir para o esclarecimento dos processos que atuaram durante a deposição da Formação Carajás.

Agradecimentos À Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) pelo apoio no campo, cessão de amostras de testemunhos, mapas e discussões com técnicos e geólogos, em particular ao geólogo-chefe da Mina de Ferro, Sérgio Guedes. Ao Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará (CG/UFPA) pelo apoio laboratorial e de infra-estrutura, em particular ao prof. Dr. Basile Kotschoubey. À CAPES pela bolsa de doutorado de Joel Buenano Macambira. Ao CNPQ e à FINEP pelo apoio na forma de projetos de pesquisa, que financiaram parte do trabalho. À UNICAMP/IPEN pelas análises de terras raras. Aos bolsistas de Iniciação Científica do Curso de Geologia da UFPA, orientados por Joel Buenano Macambira, pela colaboração. À geóloga Gilvana Marques pela elaboração dos diagramas. Aos dois revisores anônimos da RBG, pelas sugestões ao texto inicial.

Referências

- Alibert C. & McCulloch M.T. 1993. Rare earth element and neodymium isotopic compositions of the banded iron-formations and associated shales from Hamersley, western Australia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **57**:187-204.
- Appel P.W.U. 1987. Geochemistry of the Early Archean Isua Iron-Formation, West Greenland. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens. Theophrastus Publications, 31-69.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., João X.S.J., Costa J.B.S. 1988. A megaestrutura Arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia, 7, Belém, *Anais*, 324-338.
- Bau M. & Möller P. 1993. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron formations and the evolution of the terrestrial atmosphere-hydrosphere-lithosphere system. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **57**:2239-2249.
- Beisiegel V.R. 1982. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: SBG-NO, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, *Anais*, Anexo, 21-46.
- Davy R. 1983. A contribution on the chemical composition of Precambrian Iron-Formations. In: A.F. Trendall & R.C. Morris (eds.) *Iron Formation Facts and Problems*. Amsterdam, Elsevier, 325-343.
- Derry L.A. & Jacobsen S.B. 1990. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **54**: 2965-2977.
- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 35, Belém, *Anais*, Anexo, 10-54.
- Dymek R.F. & Klein C. 1988. Chemistry, petrology and origin of banded iron-formation lithologies from the 3800 Ma Isua supracrustal belt, West Greenland. *Prec. Res.*, **39**: 247-302.
- Gnaneshwar Rao T. & Naqvi S.M. 1995. Geochemistry, depositional environment and tectonic setting of the BIFs of the Late Archean Chitradurga Schist Belt, India. *Chem. Geol.*, **121**: 217-243.
- Goldstein S.J. & Jacobsen S.B. 1988. Rare earth elements in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **89**:35-47.
- Gross G.A. 1990. Geochemistry of Iron-Formation in Canada. In: J-J. Chauvel *et al.* (ed.) *Ancient Banded Iron Formations (Regional Presentations)*. Athens, Theophrastus Publications, 3-26.
- Gross G.A. & McLeod C.R. 1980. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formations in Canada. *Can. Mineral.*, **18**: 223-229.
- Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A., Wildeman T.R. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: L.H. Ahrens (Ed.) *Origin and distribution of the elements*. Oxford, Pergamon, p. 889-912.
- Holland H.D. 1973. The oceans: A possible source of iron in iron-formations. *Econ. Geol.*, **68**:1169-1172.
- Jacobsen S.B. & Pimentel-Klose M.R. 1988. A Nd isotopic study of the Hamersley and Michipicoten banded iron formations: the source of REE and Fe in Archean oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **87**: 29-44.
- James H.L. 1983. Distribution of banded iron-formation in space and time. In: A.F. Trendall & R.C. Morris (eds.) *Iron-formations Facts and Problems*. Amsterdam, Elsevier, 471-490.
- Kato Y., Ohta I., Tsunematsu T., Watanabe Y., Isozaki Y., Maruyama S., Imai N. 1998. Rare earth element variations in mid-Archean banded iron formations: Implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **62**:3475-3498.
- Khan R.M.K., Das Sharma S., Patil D.J., Naqvi S.M. 1996. Trace, rare-earth element and oxygen isotopic systematics for the genesis of banded iron-formations: Evidence from Kushtagi schist belt, Archaean Dharwar Craton, India. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **60**:3285-3294.

- Krymsky R.Sh., Macambira J.B., Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. In: SBG-NO, Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 2, Belém, *Resumos*, p.41.
- LaBerge G.L., Robbins I.E., Han T.M. 1987. A model for the biological precipitation of Precambrian Iron-Formations – A: Geological Evidence. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens, Theophrastus Publications, 69-96.
- Lepp H. 1987. Chemistry and origin of Precambrian iron-formations. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens, Theophrastus Publications, 3-30.
- Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Teixeira J.B.G. 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, **31**:21-28
- Macambira J.B. 1992. Os possíveis microfósseis da Formação Carajás - Pará. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 37. São Paulo, *Anais*, **2**:483-484.
- Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca. Convênios Seplan/DOCEGEO/UFPa e DNPM/DOCEGEO/UFPa. Relatório Final. 150p. Inédito.
- Macambira J.B. & Silva V.F. 1995. Estudo petrológico, mineralógico e caracterização das estruturas sedimentares e diagenéticas preservadas na Formação Carajás, Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, **7**: 363-387.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Prec. Res.*, **49**:329-354.
- Manikyamba C., Balaran V., Naqvi S.M. 1993. Geochemical signatures of polygenetic origin of a banded iron formation (BIF) of the Archaean Sandur greenstone belt (schist belt) Karnataka nucleus, India. *Prec. Res.*, **61**:137-164.
- Meirelles M.R. 1986. *Geoquímica e Petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás-Pa*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Mestrado, 150 p.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro, R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescritção e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Museu Par. Emílio Goeldi*, **7**:177-197.
- Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chem. Geol.*, **166**:159-171.
- Rai K.L. & Paul P.R. 1990. Geochemistry of banded iron formation, iron ores and associated lithologies from Jamda Koiria Valley of Bihar, India. In J-J. Chauvel *et al.* (ed.) *Ancient Banded Iron Formation (Regional Presentations)*. Athens, Theophrastus Publications, 311-326.
- Rollinson H.R. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Singapore. Longman. 352 p.
- Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. *Geologia da Folha SB.22 Araguaia e parte da SC.22 Tocantins*. Rio de Janeiro. Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. DNPM-MME. v. 4, p. 1-143.
- Tallarico F.H.B., Oliveira C.G., Figueiredo B.R. 2000. The Igarapé Bahia Cu-Au mineralization, Carajás Province. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:230-233.
- Taylor S.R. & McLennan S.M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell, 312 p.
- Tolbert G.E., Santos B.A., Almeida E.B. Rither J.E. 1968. Recente descoberta de ocorrência de minério de ferro no estado do Pará. *Min. Met.*, XLVIII (288):253-256.
- Tolbert G.E., Tremaine J.W., Melcher C.G., Gomes C.B. 1971. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits Northern Brazil. *Econ. Geol.*, **66**:985-994.
- Trendall A.F., Basei M.A.S., DeLaeter J.R., Nelson D.R. 1998. SHRIMP zircon U-P constraints on the age of the Carajás Formation, Grão Pará group, Amazon Craton. *J. Sou. Am. Ear. Sci.*, **11**:265-277.
- Vasconcelos P.M. 1996. Paleoclimas e evolução geomorfológica da região de Carajás: evidência geoquímica e geocronológica. In: SBG/NO, Simp. Geol. Amaz., 5. Belém, *Anais*, 26-30.
- Wirth K.R., Gibbs A.K., Olszewski Jr., W.J. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **16**:195-200.

Manuscrito A-1343

Recebido em 22 de abril de 2002

Revisão dos autores em 15 de outubro de 2002

Revisão aceita em 25 de outubro de 2002