

DEPÓSITOS FERROMANGANESÍFEROS DE OCEANO PROFUNDO

Jorge J. C. Palma & Ivo B. M. Pessanha

Received August 28, 2000 / Accepted July 11, 2001

Os depósitos ferromanganesíferos (nódulos polimetálicos e crostas cobaltíferas) são considerados recursos minerais muito promissores pelos altos conteúdos de metais importantes, como Ni, Co, Cu e Mn. Entretanto, apresentam extrema variabilidade de distribuição, morfologia, propriedades físicas, químicas e mineralógicas, o que interfere sobremaneira nos processos de mineração e de tratamento de minério. A investigação sistemática dos principais depósitos, no Pacífico e Índico, nos últimos 30 anos, permitiu identificar os fatores de controle da formação dos campos de nódulos e dos pavimentos de crostas polimetálicas. Uma revisão resumida desse conhecimento é apresentada neste trabalho. A condição inicial básica para a formação dos depósitos é a combinação de localização de fontes de metais com circulação oceânica superficial para prover Fe, Mn e elementos menores como Na, Ca, Sr, Ni, Cu, Co, Mo. Os processos de precipitação podem ser hidrogenéticos e/ou diagenéticos. No processo hidrogenético, formam-se oxi-hidróxidos coloidais complexos, enriquecidos em Fe e Co que precipitam diretamente sobre os topos de nódulos ou formam crostas sobre superfícies de afloramentos rochosos expostos por milhões de anos à ação de correntes, em encostas de montes, cristas e platôs submarinos. Nas baixas latitudes, zonas de produtividade primária superficial baixa a moderada favorecem processos biogênicos e diagenéticos de crescimento de nódulos enriquecidos em Mn, Ni e Cu. A profundidade do assoalho oceânico varia geralmente de 4.000 m a 5.500 m, na faixa ou abaixo da profundidade de compensação de carbonato. Topografia local irregular e sedimentação terrígena desprezível possibilitam o crescimento e o enriquecimento metálico de nódulos. As condições geológicas e oceanográficas do Atlântico Sul são mais favoráveis aos processos hidrogenéticos de formação de crostas cobaltíferas. Porém, somente com estudos sistemáticos será possível avaliar adequadamente o potencial de depósitos de Fe-Mn de mar profundo, nesta região.

Palavras-chave: Recursos Minerais Marinhos; Nódulos polimetálicos; Nódulos de manganês; Crostas polimetálicas.

DEEP-SEABED FERROMANGANESE DEPOSITS - *Deep-seabed Fe-Mn deposits are very promising mineral resources due to their high contents of important metals as Ni, Co, Cu, Mn, Pt, Tl, Te, and other metals. Nevertheless, they show so variable distribution, morphology, and physical, chemical, and mineralogical properties as to impact future mining operation and metallurgical processing. Systematic investigation of the main areas of occurrence in the Pacific Ocean and Central Indian Ocean Basin over the past 30 years allows one to identify main controls of formation and growth of nodule fields and polymetallic encrustations. In the present work this knowledge is summarily reviewed. The basic condition to form Fe-Mn deep-seabed deposits is a combination of sources of metals and circulation of superficial waters to provide a due flux of Fe, Mn, as well as minor elements like Na, Ca, Sr, Ni, Cu, Co, and Mo. Hydrogenetic and/or diagenetic processes may form Fe-Mn deposits. Hydrogenetic precipitation of colloidal Fe/Co-rich oxy-hydroxides may accrete the upper side of nodules or pave basaltic outcrops swept by bottom currents over million years. Low latitudes and weak to moderate primary productivity zones favor biogenetic and diagenetic growth of high-grade Mn, Ni, and Cu nodules. Diagenetic growth occurs mostly on seafloor 4000 m to 5500 m deep, in or below the range of calcite compensation depth. Moderate pelagic sedimentation and locally rough topography favor fast growth*

of Mn/Ni/Cu-rich nodules. South Atlantic geological and oceanographic settings apparently meet requirements for hydrogenetic formation of Co-rich crusts rather than Mn-rich nodules but only systematic studies will allow properly assess of potential deep-seabed Fe-Mn deposits in this region.

Key words: *Marine Mineral Resources; Polymetallic nodules; Manganese nodules; Polymetallic crusts.*

Universidade Federal Fluminense
Departamento de Geologia/Laboratório de Geologia Marinha – LAGEMAR
Av. Litorânea s.n., Gragoatá, Niterói, RJ, 24.210-340
Telefone e fax: (5521)2719-4241
Email: jorge@igeo.uff.br / ivo@igeo.uff.br

INTRODUÇÃO

Acumulações superficiais de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês são conhecidas desde a Antiguidade e ocorrem em todos os ambientes aquáticos do planeta. Entre essas ocorrências destacam-se, por sua importância científica e econômica, as concentrações em forma de crostas e campos de nódulos polimetálicos das regiões oceânicas profundas.

Descritos de modo sistemático pela primeira vez durante a famosa expedição científica da fragata inglesa H.M.S. Challenger (1873-1876), os nódulos demanganês ou polimetálicos foram objeto de investigação puramente científica até a primeira metade do século XX, em razão da excepcional variabilidade de suas características físicas, químicas e mineralógicas, bem como de sua ampla distribuição e elevada abundância. Este enfoque mudou com a expansão industrial após a Segunda Guerra Mundial e os nódulos polimetálicos, por conterem teores elevados de metais então considerados estratégicos, passaram a exercer forte atrativo econômico, e tornaram-se os precursores do interesse pela mineração em larga escala nos oceanos.

Dados os altos custos envolvidos com a exploração e o desenvolvimento tecnológico requerido para a exploração e aproveitamento econômico das enormes reservas minerais situadas em profundidades abissais, poderosos grupos empresariais e governos de países industrializados formaram vários consórcios nacionais e internacionais especialmente na 2ª metade da década de 1970.

Ainda em conseqüência desse interesse e da iminência do início da exploração dos depósitos de nódulos polimetálicos, conforme as previsões otimistas da época, adveio a necessidade de uma regulamentação internacional para a utilização dos recursos marinhos. A convocação da III Conferência das Nações Unidas sobre o Direito do Mar foi motivada em grande parte por esta necessidade. Em 1984 entrou em vigor a Convenção das Nações Unidas para o Direito do Mar (CNUDM)

Contudo, a retração da economia mundial que se seguiu e os encargos oriundos da CNUDM desestimularam os investidores privados, de modo que atualmente apenas governos de alguns países continuam subsidiando a exploração dos nódulos atendendo a interesses estratégicos nacionais.

Mais recentemente, incrustações ferromanganesíferas (crostas polimetálicas ou cobaltíferas) dos fundos rochosos marinhos, também têm atraído investimentos importantes em pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico devido aos teores elevados de metais e outros elementos de interesse comercial. Além dos aspectos econômicos deve-se considerar a importância científica das crostas polimetálicas uma vez que encerram registros valiosos da evolução paleoceanográfica e paleoclimática desde o Terciário.

Nesta revisão resumida do estado atual do conhecimento sobre os depósitos ferromanganesíferos de oceano profundo, discute-se a extrema variabilidade das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas desses jazimentos e as causas e implicações científicas e econômicas dessa diversidade. São abordadas as condições geológicas

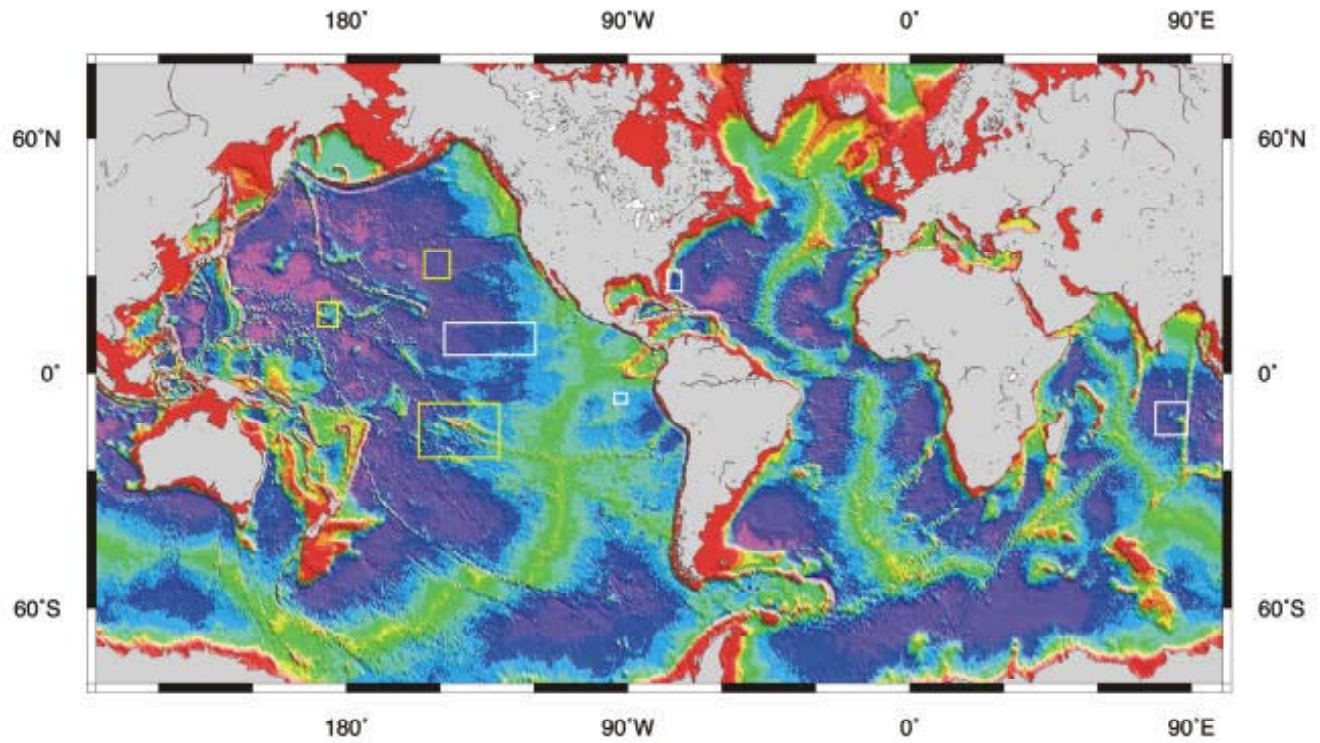


Figura 1 – Relevo do assoalho oceânico com a localização dos principais depósitos ferro-manganesíferos de oceano profundo. Nódulos – retângulos brancos; Crostas – retângulos amarelos. Topografia de Sandwell et al (1996)

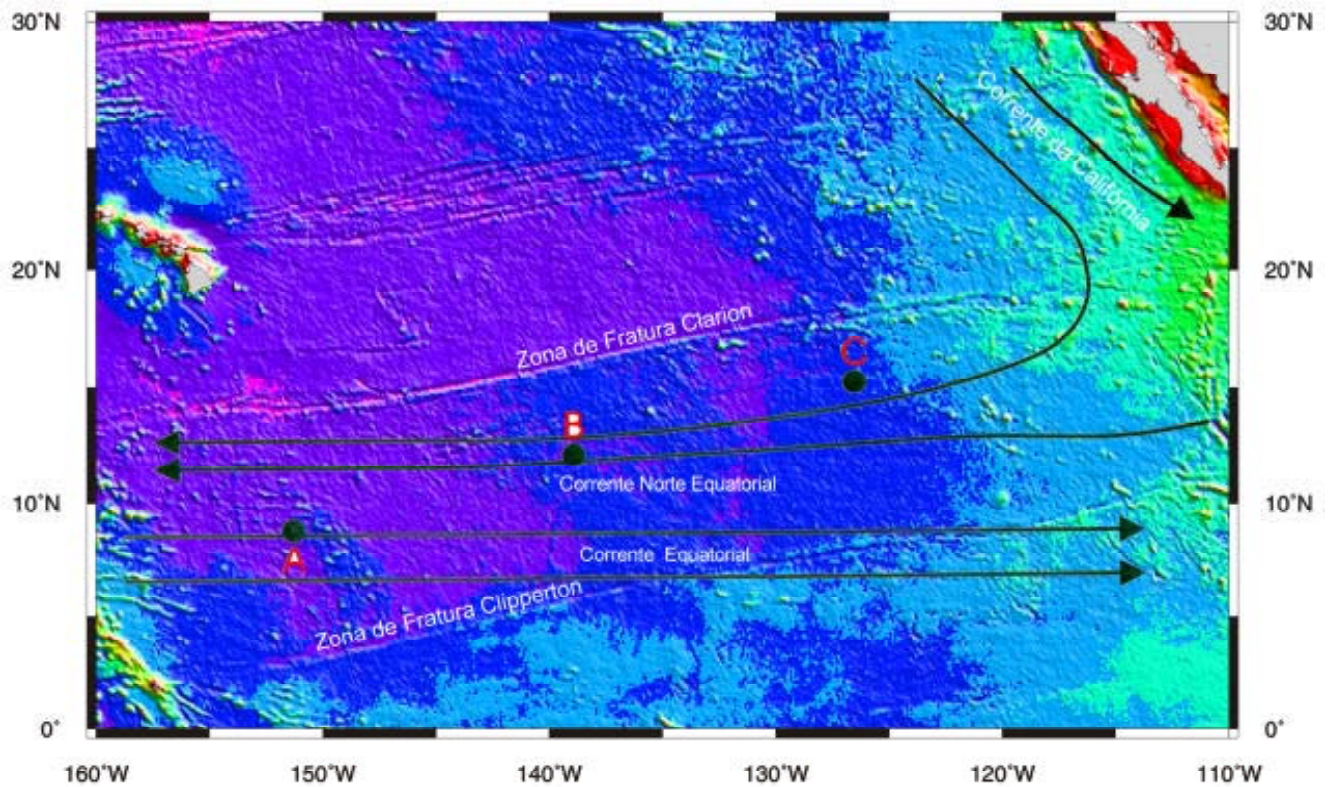


Figura 2 – Zona Clarion-Cliperton (ZCC), no Pacífico nordeste, tendo a oeste as do Ilhas do Havá e a leste a Baixa Califórnia, na margem continental norte da americana e a Cordilheira do Pacífico Leste. Com circulação oceânica segundo Morgan (2000). Topografia de Sandwell et al (1996)

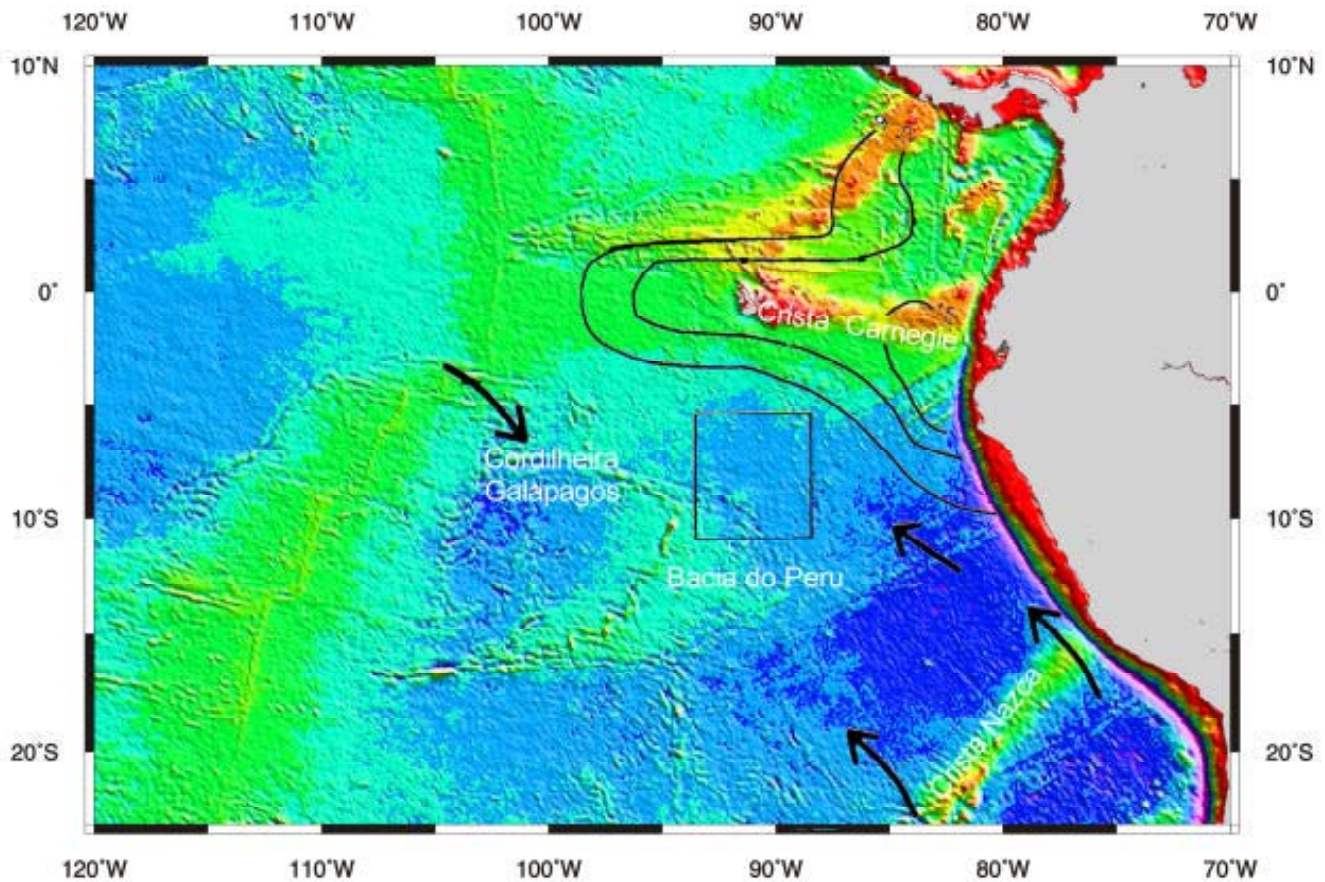


Figura 4 – Localização da província de nódulos da Bacia do Peru, no Pacífico sudeste, entre a elevação de Galápagos a leste, a fossa do Peru a oeste, as ilhas Galápagos, a norte e a Cadeia Carnegie a sul. Modificado de von Stackelberg et al. (2000).

e oceanográficas em que ocorrem os nódulos e crostas, a localização, o modo de formação das principais concentrações conhecidas e aspectos das atividades de exploração e lavra.

Em conclusão, com base no conhecimento dos depósitos mais importantes, é avaliado o potencial de ocorrência de depósitos significativos no Atlântico Sul e, tendo em vista o desenvolvimento tecnológico alcançado neste campo, são considerados outros aspectos dos interesses brasileiros, em termos das possibilidades, conveniências de participação em tais empreendimentos e eventuais repercussões para o setor mineral brasileiro.

FORMAS E PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE DEPÓSITOS DE FE-MN DE OCEANO PROFUNDO

As concentrações de Fe e Mn em oceano profundo ocorrem mais comumente como revestimentos do assoalho oceânico em forma de

películas oxidadas finas, aglutinações de núcleos cobertos por óxidos, crostas de espessura variável ou concreções nodulares de dimensões também muito variável, condicionados pelo ambiente geológico-oceanográfico em que se formam e crescem.

Os depósitos de Fe-Mn de mar profundo distribuem-se por todos os oceanos, sendo mais abundantes e mais ricos em conteúdo metálico os seguintes (Fig. 1):

- Nódulos da zona Clarion-Clipperton (ZCC), no Pacífico nordeste, limitada a oeste e a leste pelas Ilhas do Havaí e Baixa Califórnia e a norte e sul pelas zonas de fraturas Clarion e Clipperton, respectivamente, (Fig. 2)

- Nódulos da Bacia Indiana Central (BIC), entre a Cordilheira Central Indiana, a Cadeia 90° Leste e limitada ao sul pela Cordilheira Indiana Sudoeste (Fig. 3);

- Nódulos da Bacia do Peru, no Pacífico sudeste, entre a elevação de Galápagos a leste, a fossa do

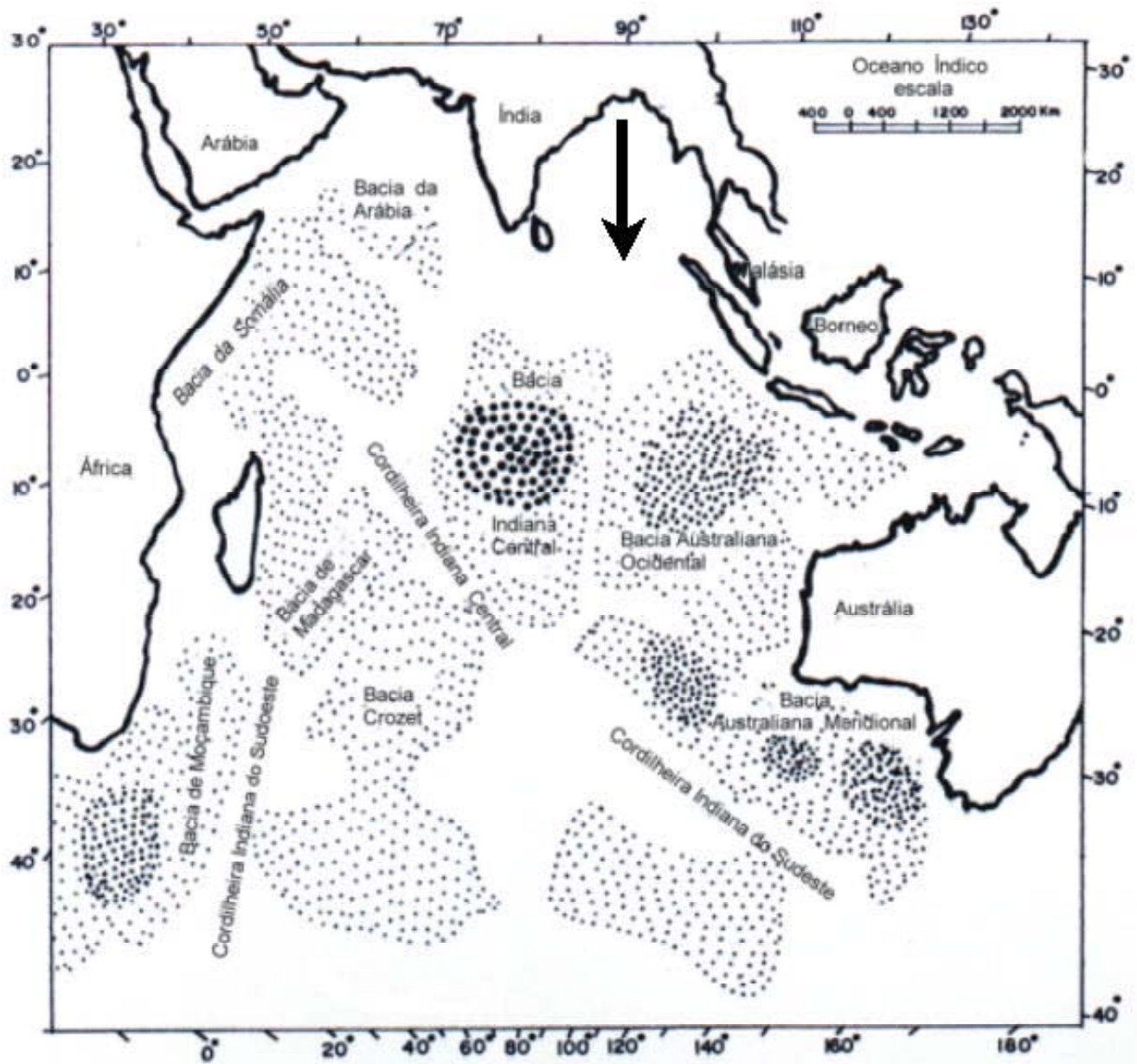


Figura 3 - Localização da província de nódulos da Bacia Indiana Central (BIC), entre a Cordilheira Central Indiana, a Cadeia 90° Leste e limitada ao sul pela Cordilheira Indiana Sudoeste. A seta indica o fluxo das correntes de turbidez oriundas da descarga dos rios Ganges e Bramahputra. Modificado de Jauhari e Pattan (2000).

Peru a oeste, as ilhas Galápagos, a norte e a Cadeia Carnegie a sul (Fig. 4)

· Crostas de Fe e Mn dos montes submarinos, abundantes no Oceano Pacífico (Fig. 1).

No oceano Atlântico, ocorrências importantes de nódulos e crostas são relatadas no Blake Plateau, margem continental leste norte-americana (Manheim, 1972).

CARACTERÍSTICAS REGIONAIS DOS DEPÓSITOS DE FE-MN DE OCEANO PROFUNDO

Nas três principais áreas de ocorrência dos nódulos polimetálicos, nos oceanos Pacífico (ZCC e Bacia do Peru) e Índico (BIC), identificam-se situações ambientais comuns quanto aos fatores que condicionam regionalmente a formação dos campos de nódulos, a saber: fontes de metais, circulação

oceânica, produtividade primária superficial, profundidade, relevo, cobertura sedimentar e geologia do embasamento oceânico.

A circulação oceânica nas 3 áreas consideradas favorece o transporte dos metais que provêm de fontes diversas para se concentrar nas áreas de ocorrência dos nódulos. Na Zona Clarion-Clipperton, por exemplo, segundo Morgan (2000), a corrente Norte Equatorial domina a circulação das águas superficiais de leste para oeste, até 10° S, enquanto a sul desta latitude as águas são transportadas no sentido inverso pela contra-corrente equatorial (Fig.2). Morgan (op. cit.) atribui à corrente Norte Equatorial o transporte de Mn adsorvido em pequenas partículas concentradas no topo da termoclina desde as fontes terrestres e vulcânicas do metal, situadas ao leste, no continente e na margem continental norte-americana, respectivamente.

As concentrações de nódulos mais importantes localizam-se em baixas latitudes, onde taxas reduzidas a moderadas de produtividade superficial, identificados junto às áreas dos depósitos (Fig. 5), dão origem à sedimentação biogênica que favorece os processos diagenéticos de crescimento e

concentração metálica dos nódulos, discutidos adiante.

Os campos de nódulos de maior significado econômico jazem em fundos marinhos a profundidades variáveis geralmente entre 4.000 m e 5.000-6.000 m, em áreas de topografia irregular, sendo o relevo local um importante fator de condicionamento de abundância, crescimento e composição das concreções polimetálicas (Morgan, 2000, Jauhari e Pattan, 2000; Stackelberg, 2000). Na área estudada com maior detalhe na Bacia do Peru, predomina a topografia suave de colinas abissais, com montes submarinos que se elevam até cerca de 2.000 m de lâmina d'água e relevo montanhoso na parte sul da área.

A relação entre a batimetria, a lisoclina e a profundidade de compensação de calcita (calcite compensation depth – CCD) controla a natureza, a taxa de sedimentação e conseqüentemente a espessura de sedimentos inconsolidados que recobrem o fundo oceânico. Na província de nódulos da Bacia do Peru, a profundidade está compreendida na faixa de compensação de carbonato. A lâmina d'água varia de 3.500 m a 4.500 m, enquanto a

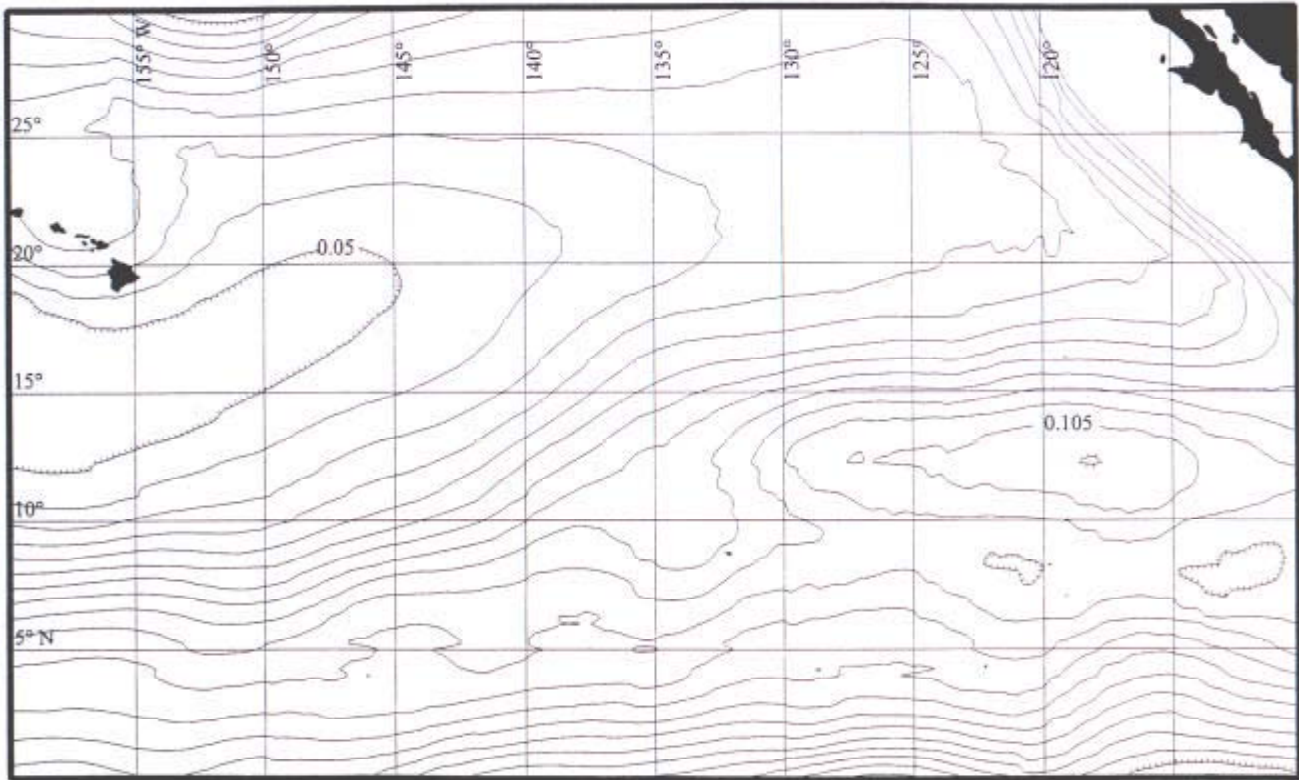


Figura 5 – Concentração de clorofila nas águas superficiais na ZCC, indicando o crescimento a produtividade primária de oeste para leste. Modificado de Morgan (2000).

lisoclina situa-se a cerca de 3.700 m e a CCD entre 4.200 m e 4.250 m (Stackelberg, 2000), o que causa uma variação acentuada dos teores de carbonato nos sedimentos em função da profundidade local. Na ZCC, por outro lado, o fundo oceânico situa-se a profundidades maiores que a CCD, implicando numa sedimentação predominante de vazas silicosas. As espessuras dos sedimentos superficiais, essencialmente pelágicos, variam de poucas dezenas a centenas de metros.

O embasamento oceânico nas regiões de acumulação preferencial de nódulos tem idades que variam de 20 Ma. a cerca de 80 Ma., o que constitui um fator importante dada a necessidade de tempo suficiente para o crescimento dos nódulos.

NÓDULOS POLIMETÁLICOS

Características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas

A extrema variabilidade das propriedades dos nódulos polimetálicos é explicada pela diversidade de fatores que influenciam sua formação. Entre estes fatores destacam-se a localização e abundância das fontes dos metais constituintes, a natureza e idade dos nódulos e do substrato, bem como o ambiente de transporte, deposição e diagênese em que se formou o nódulo.

O hábito externo mais comum dos nódulos polimetálicos é de pequenas pelotas levemente achatadas, porém são também encontrados em

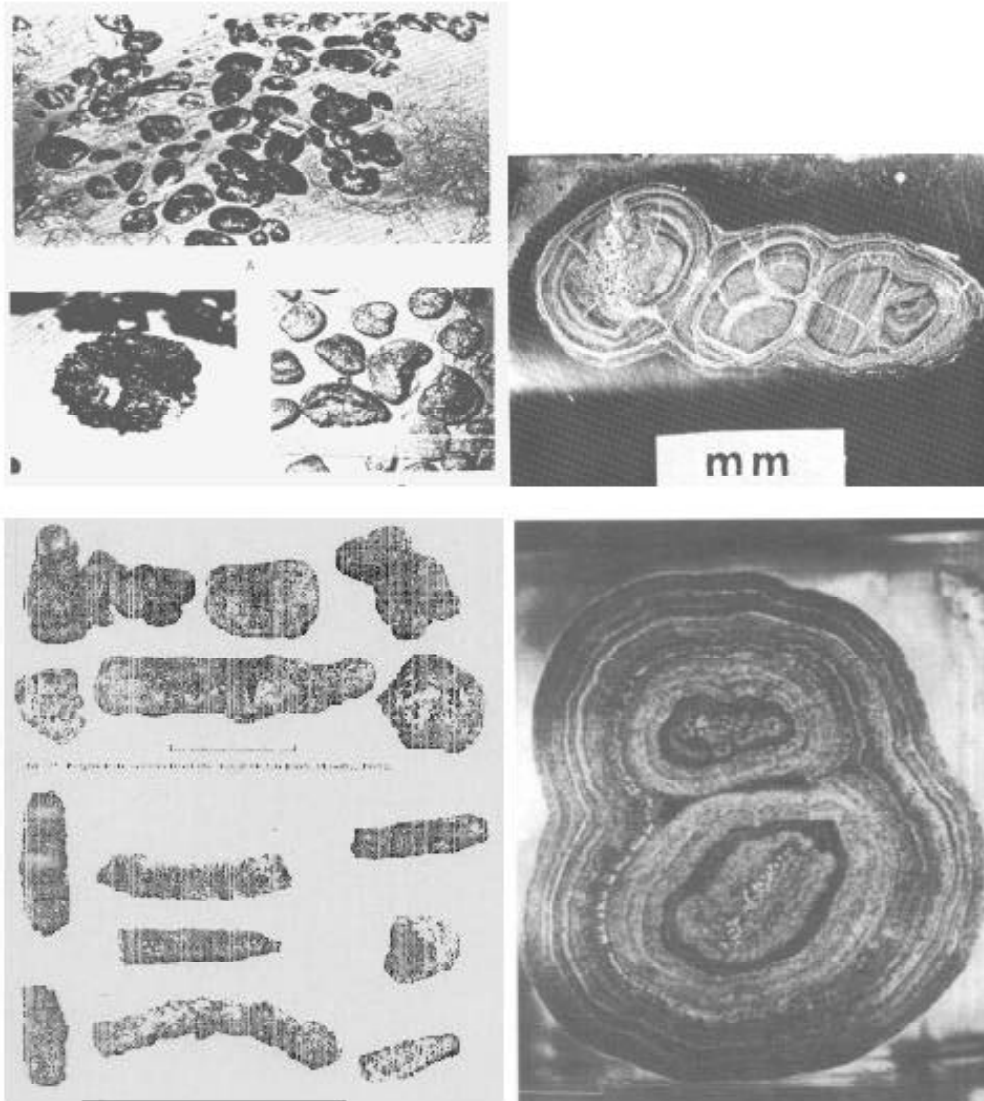


Figura 6 - Diversas formas e estrutura interna de nódulo, camadas concêntricas ao redor de um núcleo vulcanoclástico de nódulos mononucleados e polinucleados. Reproduzido de Cronan (1980), von Stackelberg et al. (2000) e IFREMER, (2000).

formas irregulares, alongadas, tabulares, elipsoidais e poligonais (Fig. 6). Nos depósitos do Índico foram encontradas 13 formas distintas, em uma área de cerca de 71.000 km² (Jauhari & Pattan, 2000).

A superfície dos nódulos pode apresentar textura mamilar (botrióide), lisa ou fissurada, bem como pode ser perfurada ou revestida de incrustações orgânicas. A estrutura interna indica crescimento em camadas concêntricas, visíveis (Fig. 6) a microscópicas, em torno de um ou mais núcleos (nódulos mono ou polinucleados) de fragmentos de basaltos, grãos de areia, fosfatos, carbonatos, bioclastos, ou até mesmo em torno de objetos artificiais.

Os nódulos polimetálicos apresentam uma coloração geralmente castanha, quando predominantemente ferríferos, ou preto-azulada, se manganésíferos, com dimensões médias de 3 cm, porém podem atingir até 25 cm. Os nódulos na Bacia Indiana Central ocorrem em tamanhos menores que 2 cm até 10 cm ou mais e na Bacia do Peru a maioria tem diâmetro na classe de 2-4 cm até um máximo de 18 cm.

Os nódulos polimetálicos são leves, porosos e muito friáveis. A densidade e a dureza variam em faixas bem definidas de 2,1-3,19 g/cm³ e 2 (gesso) – 4 (fluorita), respectivamente. Cerca de 50-60% do volume dos poros, cujo diâmetro varia de 0,1 a 0,01 cm, é preenchido por água. A friabilidade, a

porosidade e a dureza variam com o teor de CaCO₃ (Cronan, 1980).

Os nódulos são constituídos por uma variedade notável de elementos químicos. A composição química é heterogênea em nódulos individuais e em pequenas distâncias. O grau de enriquecimento de alguns elementos de elevado valor econômico pode ser bastante expressivo em relação à abundância na crosta terrestre (Tab. 1).

A composição mineralógica dos nódulos polimetálicos é complexa. Predominam as fases mineralógicas autigênicas, principalmente oxihidróxidos de Mn e de Fe. Os óxidos de Mn, todoroquita (MnO₂ hidratado), birnessita, vernadita (δMnO₂), manganita (7/10 A°) e psilomelano, na ordem, apresentam graus de cristalinidade decrescente e razão O:Mn crescente (1,74 - 1,99). O óxido de ferro mais comum é a goetita. Podem ocorrer substituições iônicas do Mn e do Fe por outros elementos (Na, Ca, Sr, Cu, Co, Ni, Mo).

Minerais detríticos (argila, quartzo, rutilo, barita) também são encontrados.

A vernadita associa-se a ambientes mais oxidantes, proporcionados por uma circulação aberta. Nestas regiões é comum a substituição de Mn⁺⁴ e Fe⁺³ por Co⁺² e Co⁺³. Já a todoroquita predomina em ambientes pouco oxidantes, enriquecidos em matéria orgânica, com circulação bastante restrita,

Elementos Químicos	Enriquecimento
Mn, Co, Mo, Tl	100x
Ni, Ag, Ir, Pb	50-100x
B, Cu, Zn, Cd, Yb, W, Bi	10-50x
P, V, Fe, Sr, Y, Zr, Ba, La, Hg	10x

Tabela 1 – Enriquecimento dos principais constituintes químicos dos nódulos polimetálicos em relação à abundância terrestre.

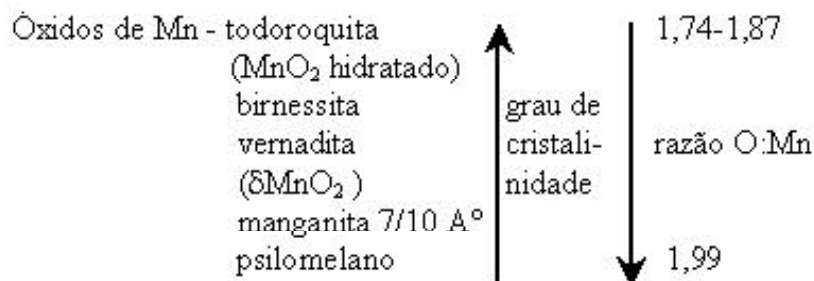


Tabela 2 – Principais óxidos de Mn que constituem os nódulos polimetálicos e variações da cristalinidade e razão Mn:O das estruturas minerais.

característica de depressões locais em águas mais profundas. Nestas condições, os cátions divalentes de Cu, Ni e Zn substituem Mn^{+2} na estrutura cristalina da todoroquita.

Fatores relevantes no controle da formação e crescimento dos nódulos

A formação dos nódulos, seu crescimento e enriquecimento em metais são condicionados localmente por combinações complexas de fatores geológicos, físico-químicos, oceanográficos, biológicos e geoquímicos reveladas pelos estudos realizados nas áreas de maior interesse econômico. Morgan (2000), Jauhari e Pattan (2000) e Stackelberg (2000) sintetizaram as revisões mais completas (U.N., 1982; Glasby, 1977) e resultados de numerosas pesquisas sobre esses fatores e mecanismos genéticos associados. O resumo a seguir baseia-se nas sínteses produzidas, respectivamente, pelos referidos autores.

As condições iniciais básicas para a formação dos depósitos ferro-manganesíferos em geral são a existência de fontes de metais próximas e obviamente de ambiente oxidante para a precipitação de óxidos de Mn e Fe.

As fontes de metais podem ser, principalmente, descarga fluvial de sedimentos terrígenos ou exalações hidrotermais submarinas. Como descrito anteriormente, no Pacífico Norte, a entrada de metais no ambiente marinho ocorre a leste da província de nódulos de Clarion-Clipperton. O Fe e o Mn em solução no material descarregado pela drenagem da costa oeste norte americana, bem como pelas emanções vulcânicas da Cordilheira do Pacífico Oriental, são transportados lateralmente pela corrente Norte Equatorial. Na Bacia Central Indiana, aparentemente a fonte é única. O aporte metálico provém da enorme descarga sedimentar dos rios Ganges e Brahmaputra, distribuída pelas correntes de turbidez até cerca do limite norte bacia oceânica central (Fig. 3).

As condições de oxidação também existem em todos os oceanos. O ambiente de alto potencial de oxi-redução prevalece nas águas oceânicas de circulação franca e somente restrições como as existentes no Mar Vermelho, p. ex., podem impedir o fluxo e a precipitação desses metais.

Em presença dessas condições iniciais, para o desenvolvimento de depósitos de Fe-Mn a atividade biológica tem papel relevante, pois a natureza e o enriquecimento metálico das fases mineralógicas que constituem os nódulos relacionam-se claramente com a produtividade primária superficial, a profundidade do assoalho oceânico, da lisoclina e da CCD. Em zonas de alta produtividade, os organismos planctônicos que proliferam nas águas superficiais concentram os metais dissolvidos e possibilitam seu transporte vertical até o assoalho marinho. A abundância máxima de nódulos na região Bacia do Peru, p. ex., encontra-se onde a concentração de carbono orgânico na superfície dos sedimentos é responsável pela alta taxa de crescimento dos nódulos. Nesta área, a elevada bioprodutividade se deve à influência das águas enriquecidas em nutrientes provenientes da ressurgência da costa do Peru.

Nas áreas onde o assoalho oceânico situa-se a profundidades entre a lisoclina e a CCD, há cristalização preferencial de todoroquita nas porções soterradas dos nódulos, com enriquecimento em Ni, Cu e Zn. Neste caso as faces superiores dos nódulos terão vernadita como óxido de manganês predominante, com enriquecimento em Fe e Co, principalmente.

Na BIC a profundidade da lâmina d'água na bacia varia entre 4500 e 5600 m. Devido à influência da massa d'água profunda do Índico norte, a lisoclina do carbonato fica em torno de 4000 m enquanto que a CCD situa-se a cerca de 5000 m. Nestas condições a abundância varia de esparsos nódulos isolados a mais de 20 Kg/m².

A taxa de sedimentação pelágica controla a formação e o crescimento dos nódulos. A taxa deve ser suficiente para a deposição de uma camada pouco espessa de sedimentos (da ordem de dezenas a poucas centenas de metros), de modo a permitir o crescimento diagenético das partes inferiores dos nódulos, mas limitada, a ponto de não haver o soterramento total dos mesmos e a diluição excessiva dos metais pelos sedimentos em suspensão.

Na BIC, as dimensões dos nódulos são claramente influenciadas pela taxa de acreção, por sua vez controlada pelo gradiente geoquímico, o qual, neste caso, é determinado primordialmente pela

profundidade de imersão do nódulo nos sedimentos. Aparentemente o revolvimento da superfície, bem como dos primeiros centímetros do sedimento marinho, propiciam um aumento na taxa de crescimento dos nódulos polimetálicos.

A variação na taxa de crescimento é causada também por oscilações climáticas, entretanto a atividade biológica e a bioturbação dos sedimentos são processos muito mais freqüentes. Muitos nódulos dos depósitos do oceano Índico apresentam taxas de crescimento assimétricas, o que pode ser consequência da atividade biológica, cuja variação de intensidade gera diferentes microambientes ao longo da coluna sedimentar. Em função do gradiente geoquímico entre a superfície do sedimento e o limite da camada redox, aproximadamente 5-10 cm de profundidade, os nódulos podem medir mais que 21 cm de diâmetro.

Outro fator destacado no condicionamento dos nódulos é o relevo local. Assim, a notável heterogeneidade da distribuição dos nódulos relaciona-se diretamente com variações topográficas em pequenas distâncias. Mesmo em áreas de grande abundância, bolsões com elevada concentração de nódulos intercalam-se com áreas com poucos ou até mesmo nenhum nódulo. Em regra, os nódulos tendem a ser mais abundantes em áreas de topografia irregular, com altos, vales e encostas e são mais esparsos em planícies abissais. Em contrapartida, os nódulos de planícies abissais tendem a ser mais ricos em Mn, Cu e Ni, evidenciando uma clara correlação negativa entre abundância e os teores destes metais. Ao contrário, o máximo de abundância tem uma correlação muito boa com a concentração máxima de carbono orgânico nos sedimentos superficiais

O mapeamento batimétrico detalhado da bacia central do Oceano Índico, com multifeixe revelou muitas depressões locais, de significativa influência no movimento e distribuição das massas d'água, transporte de sedimentos, atividade química, enriquecimento dos nódulos e na sua distribuição na região. A taxa de crescimento pode ser superior a 250 mm/Ma. nas depressões, enquanto que nos pontos topográficos mais elevados o crescimento hidrogênico chega a ser 50 vezes menor.

Em locais com relevo acidentado, os nódulos são mais abundantes nos altos topográficos, onde,

porém são menos ricos em Mn, Cu e Ni que os nódulos das porções mais aplainadas. Os nódulos esferóides e elipsóides são comumente pequenos, e os discóides e alongados tendem a serem maiores. Nódulos da mesma faixa de tamanho possuem semelhante morfologia, mineralogia e química, demonstrando a possibilidade de um mesmo processo genético, enquanto nódulos de diferentes faixas de tamanho, refletem diferentes condições ambientais e conseqüentemente processos de formação diversificados.

A distribuição, a forma e o tamanho dos nódulos são influenciados pela existência, morfologia e natureza de fragmentos de rocha (principalmente vulcanoclastos), bioclastos, grãos minerais e outros corpos necessários à nucleação das concreções nodulares. Locais em que não há materiais que possam servir como núcleos, observa-se a ocorrência de micro-nódulos disseminados nos sedimentos.

CROSTAS COBALTÍFERAS

As crostas polimetálicas ocorrem em montes submarinos, cadeias de montanhas e platôs marginais espalhadas por todo o oceano Pacífico, desde as Ilhas Aleutas, no norte, até o setor Pacífico da cordilheira circum-Antártica. As elevações submarinas onde se desenvolvem crostas são aquelas em que correntes oceânicas mantiveram as rochas livres de aporte sedimentar durante milhões de anos (Hein et al., 2000). Os referidos autores descrevem as principais características das crostas cobaltíferas que são resumidas nesta seção.

As crostas se formam em regiões de substrato de rochas duras, em ambientes de massas d'água frias resultando em pavimentos de até 250 mm de espessura. A principal importância destas crostas é a presença de Co, Ni, Pt, Mn, Tl, Te e outros metais, mas também são feições estratigráficas muito relevantes, indicadoras de paleoclima.

As profundidades de ocorrência de crostas variam de 400 m a 4000 m, porém as mais enriquecidas em cobalto encontram-se geralmente entre 800 m e 2200 m na zona de mínimo de oxigênio. Os processos de sedimentação e as correntes controlam a distribuição e a espessura das crostas.

As crostas cobaltíferas apresentam densidade total média seca de 1.3g/cm^3 , porosidade da ordem 60% e área superficial de $300\text{ m}^2/\text{g}$. A taxa de crescimento é variável entre 1 e 10 mm/Ma. A superfície das crostas é geralmente botrióide, porém a ação erosiva das correntes dá origem a uma grande variedade de formas. Numa secção transversal pode-se ver que a crosta é formada por camadas que podem ser maciças, botrióides, laminadas, colunares ou apresentarem um aspecto rugoso mosqueado (Fig. 7).

A mineralogia das crostas é relativamente simples se comparada à dos depósitos ferromanganesíferos hidrotermais e diagenéticos. As crostas que ocorrem no Pacífico são compostas por vernaditas ferruginosas e oxihidroxidos de Fe, com moderada contribuição de fluorapatitas carbonáticas nas crostas mais

espessas e menores quantidades de quartzo e feldspato que na maioria das crostas.

Os elementos mais comumente associados à fase da vernadita incluem Mn, Co, Ni, Cd e Mo, enquanto aqueles mais comumente associados com o oxihidroxido de Fe são Fe e As.

As crostas contêm aproximadamente 2,3% de Co, 1% Ni e 3 ppm de Pt, com razões médias de Fe/Mn de 0,6 a 1,3.

A vernadita e a fluorapatita carbonática diminuem, onde existe um aumento de Fe, Cu e elementos detríticos que são transportados pelas águas de fundo. O Co, Ce, Tl, e é possível que também Ti, Pb e Pt sejam fortemente concentrados sobre outros metais devido às reações de oxidação. As camadas mais antigas, presentes nas crostas mais espessas, foram formadas durante os dois últimos eventos

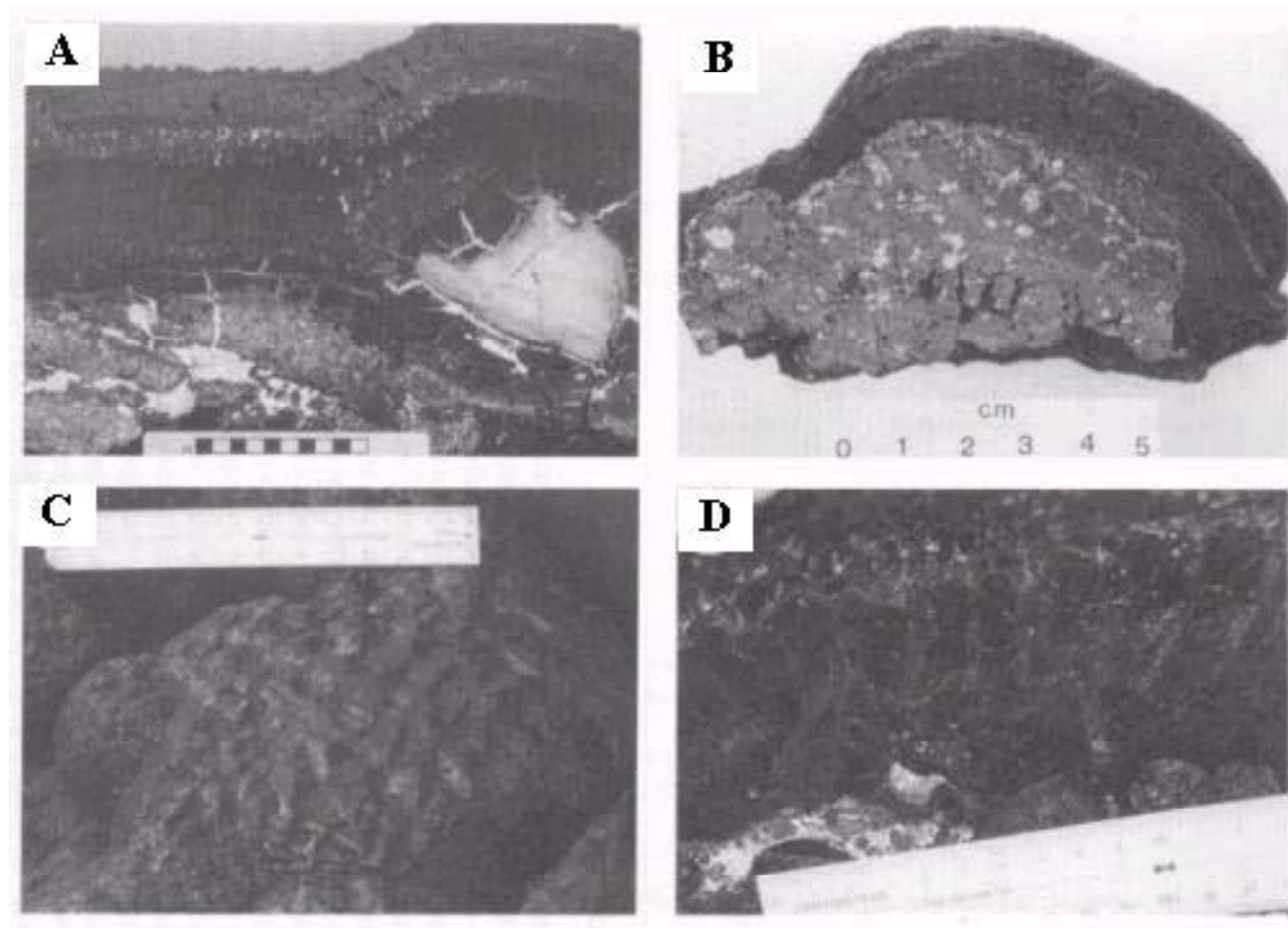


Figura 7 – A) Crosta de Fe-Mn hidrogenética com 18 cm sobre substrato hialoclástico fosfatizado. B) Crosta de Fe-Mn mista hidrotermal-hidrogenética sobre substrato de basalto amigdalóide; C) Crosta com superfície botrióide polida e corroída por corrente; D) Estrutura interna colunar da mesma crosta de C). Escalas em centímetros. Adaptado de von Stackelberg et al. (2000).

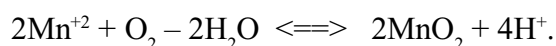
globais de fosforização ocorridos no Terciário, com a mobilização e redistribuição dos elementos. A utilização das taxas isotópicas do Be, Nd, Pb, Hf, Os e da série do U, na determinação de traços paleogeográficos e nas condições paleoclimáticas, são especialmente úteis na delimitação temporal das mudanças de condições da circulação de oceano profundo.

METALOGÊNESE DOS DEPÓSITOS MARINHOS FE-MN

A origem ou formação dos depósitos ferromanganesíferos de oceano profundo está fundamentalmente ligada a processos biogênicos, hidrogênicos e diagenéticos. O enriquecimento metálico resulta de uma combinação da disponibilidade e comportamento dos metais no ambiente marinho, das propriedades adsorptivas e cristal químicas das fases autigênicas das concreções (e dos suspensatos), das razões de acumulação destas fases e do tempo disponível para incorporação dos elementos nos nódulos.

As fontes hidrotermais de vulcanismo submarino e a descarga fluvial de fontes terrestres no oceano disponibilizam Fe e Mn. O Fe^{+2} , por ser mais sensível a variações de Eh e pH, é o primeiro a precipitar, enriquecendo-se em águas relativamente rasas e deixando o Mn^{+2} livre para oxidar-se e precipitar como Mn^{+4} em águas mais profundas nas áreas de formação dos depósitos de nódulos.

É necessário que haja um fluxo de Fe e Mn dissolvido ou quimicamente adsorvido num gradiente entre condições aproximadamente redutoras, em que o Mn^{+2} é estável em solução, e condições oxidantes, para a oxi-redução de Mn com precipitação de Mn^{+4} :



A composição dos nódulos pode ser explicada por um modelo simplificado com três processos de precipitação: precipitação hidrogênica, diagênese óxica e diagênese subóxica.

Na precipitação hidrogênica a acumulação de metais nos nódulos e nas crostas polimetálicas ocorre diretamente da água do mar. Os metais em solução ou adsorvidos em pequenas partículas, quando em

contato com a superfície dos nódulos ou das rochas, são incorporados a estes sem participação dos sedimentos do fundo oceânico. Os topos dos nódulos e as crostas cobaltíferas são formados por camadas de partículas coloidais de óxidos e hidróxidos de Fe e Mn que se aglomeram na coluna d'água e precipitam por este processo.

Nos processos diagenéticos é fundamental o papel da atividade biológica. Nas regiões que apresentam uma grande produtividade primária, os organismos planctônicos se encarregam de extrair minerais da água do mar, concentrando os metais adsorvidos e particulados e liberando-os, sob forma de pelotas fecais ou organismos mortos, ambos pesados o suficiente para vencer a barreira físico-química do topo da termoclina e descer por toda coluna d'água até o fundo oceânico.

Os organismos planctônicos afundam gradualmente e, neste processo, as partes moles vão sendo parcialmente degradadas. Porém, nem toda a parte mole dos organismos decompõe-se na coluna d'água. A porção não degradada é oxidada nos sedimentos e com a decomposição do material orgânico há redução local do potencial redox e mobilização do Mn, gerando um ambiente adequado à formação da todoroquita.

Outros metais (Ni, Cu, Zn) são extraídos da água do mar por cátions orgânicos complexos durante a passagem dos restos orgânicos pela coluna d'água e conseqüentemente são incorporados à todoroquita nas porções soterradas dos nódulos.

Na diagênese óxica os metais são inicialmente depositados sobre o fundo oceânico na forma cátions adsorvidos, posteriormente o material das pelotas fecais é ingerido pelos organismos bentônicos que ao final do processo liberam os metais na forma de cátions divalentes, que serão incorporados aos nódulos pela oxidação/adsorção.

A diagênese subóxica é bastante similar ao processo que foi descrito anteriormente, sendo que neste caso é necessário que os nódulos sejam superficialmente cobertos pelos sedimentos, implicando na redução e remobilização do Mn.

A importância das oscilações climáticas na variação da taxa de crescimento dos nódulos é incontestável, porém é muito provável que a participação dos organismos bentônicos na alteração

do sedimento gerando microambientes atue superposta àquela causada pelas oscilações climáticas.

ASPECTOS DA MINERAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE FE-MN DE OCEANO PROFUNDO

A exploração dos nódulos e crostas polimetálicos consiste em extrair estes recursos, cujas propriedades físicas são muito heterogêneas, de fundos oceânicos, a profundidades de até 4-5 km, nos caso dos nódulos. Em vista disso, na concepção de sistemas de mineração são especialmente consideradas as condições ambientais adversas de pressão, baixas temperaturas, alto grau de oxidação para a especificação dos materiais a serem empregados nos equipamentos, bem como as características extremamente variáveis dos depósitos em termos de irregularidade do relevo, natureza e propriedades mecânicas do solo e subsolo raso e compactação das crostas polimetálicas.

Para atender a viabilidade econômica da mineração de nódulos polimetálicos, estima-se a coleta de 240 toneladas métricas por ano (t/a), que corresponde a cerca de 10 kg/s ou 800 nódulos/s (ISA, 1999). Assumindo a existência de abundância suficiente de nódulos no sítio mineiro, o projeto de um sistema de mineração tem que ser dotado de velocidade do coletor compatível com tal taxa de recuperação.

Por cerca de 15 anos entre o final do 60's até meados dos 80's, vários consórcios e empresas, estatais e privadas, dedicaram-se ao desenvolvimento da mineração em oceano profundo e provaram sua viabilidade tecnológica e econômica (Feng et al., 1996).

Numerosas concepções de técnicas de mineração de nódulos têm sido propostas, existindo pelo menos cem patentes de sistemas de mineração de mar profundo registradas mundialmente (Welling, 1996). Os métodos incluem-se em 3 classes:

- linha contínua de caçambas, espaçadas regularmente ao longo de um cabo de extensão adequada à profundidade e dimensões do navio (Fig. 8a);

- hidráulicos que coletam os nódulos com veículo semelhante a uma colheitadeira rebocada ou com autopropulsão e então transportam o minério para um navio na superfície, por meio de elevação hidráulica simples ou a ar-comprimido (Fig. 8b);

- sistemas híbridos com coletor mecânico e sistema de elevação hidráulico (Fig. 8c);

Os resultados dos estudos de eficiência dos diversos sistemas, incluindo testes em escala de modelo reduzido mostram uma tendência de serem descartadas soluções simples, do tipo linha contínua de caçambas, e de considerar como mais apropriados para lavra de nódulos os sistemas constituídos por um coletor e elevação hidráulica.

As pesquisas para visando a lavra de nódulos atualmente voltam-se para o desenvolvimento de um coletor eficiente que reduza o tempo de trânsito, que seja menor, mais leve e com maior capacidade de manobra para evitar obstáculos e escolher e selecionar áreas de extração de nódulos. Outros objetivos importantes dessas pesquisas são a melhoria do posicionamento dinâmico, para controlar a lavra e o carregamento das plataformas e a automatização, tanto do coletor como do navio ou plataforma semi-submersível de apoio e controle. Somente com esta máxima otimização, a mineração em oceano profundo poderá ser competitiva com a mineração em terra.

A mineração de crostas cobaltíferas assemelha-se em alguns aspectos à mineração de nódulos, mas difere fundamentalmente pela dificuldade em separar a camada de minério do substrato rochoso estéril. Assim, a lavra requer um sistema com capacidade para o desmonte eficiente das camadas incrustadas, ou seja, capaz de recuperação máxima das crostas coletando o mínimo de rejeito de substrato rochoso.

O sistema proposto consiste de um veículo escavador do assoalho marinho e tubulação para transporte dos nódulos até o navio ou plataforma semi-submersível, na superfície. O veículo, com autopropulsão, é provido de cortadores articulados para a fragmentação seletiva das crostas e dragas de sucção hidráulica para recolhimento dos fragmentos (Fig. 8).

Um aspecto determinante no desenho de sistemas de mineração em oceano profundo é compromisso entre a eficiência do sistema em termos de recuperação máxima de nódulos/crostas com

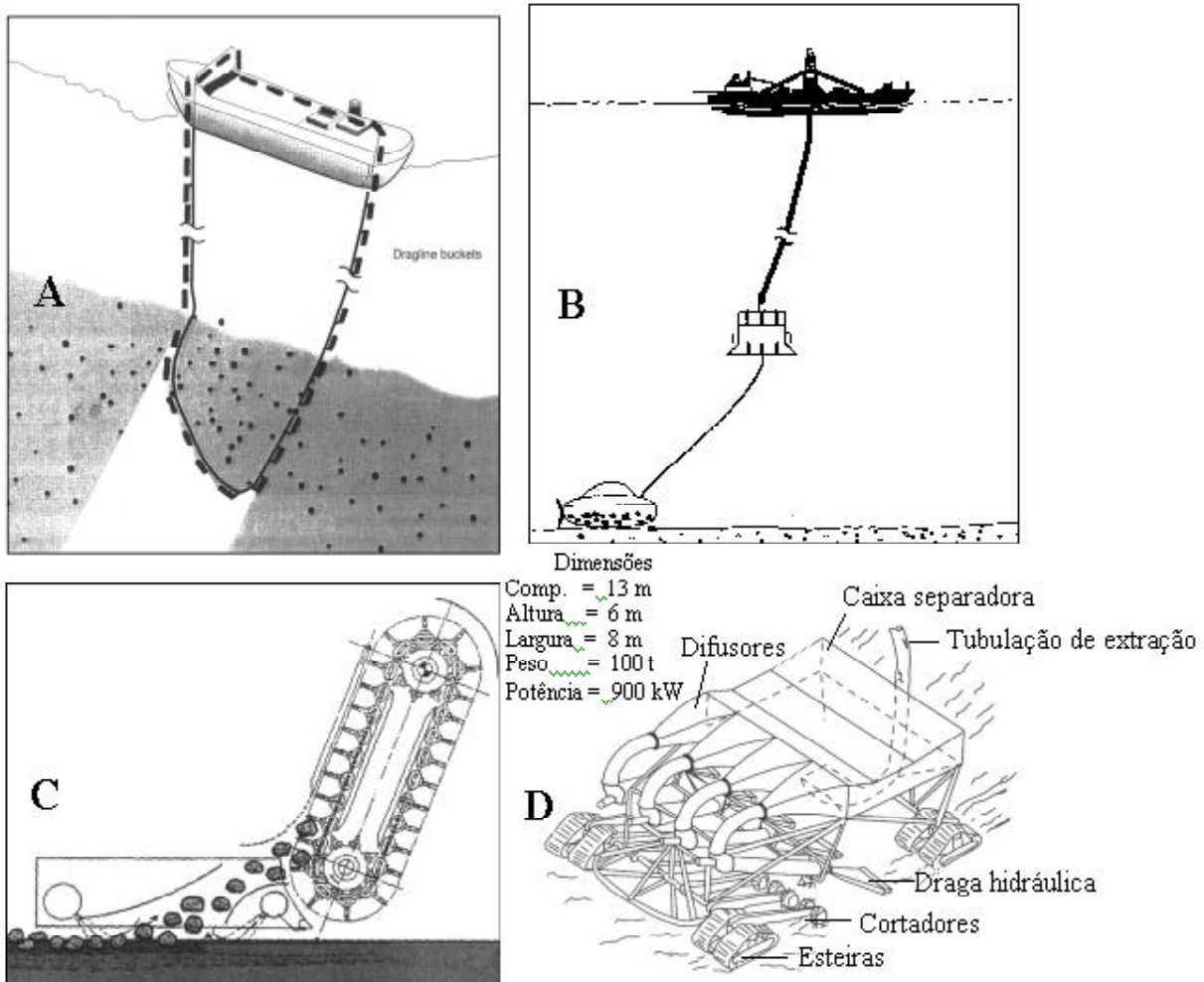


Figura 8 – Esquemas dos principais tipos de sistemas de mineração em mar profundo. **A)** Linha contínua de caçambas; **B)** sistema hidráulico; **C)** sistema híbrido com coletor mecânico elevação hidráulica, reproduzidos de ISA (2000); **D)** Veículo de mineração de crostas de Fe-Mn em oceano profundo. Adaptado de von Stackelberg et al. (2000).

impacto ambiental mínimo. Os efeitos danosos da intervenção em larga escala nas grandes profundidades marinhas é abordado por Soares-Gomes et al. (neste volume).

CONCLUSÕES

Como resultado das investigações e levantamentos realizados desde o final da década de 1960, dispõe-se atualmente de uma considerável base de conhecimento dos depósitos ferromanganesíferos de mar profundo mais importantes, localizados nos oceanos Pacífico e Índico. Paralelamente, o desenvolvimento de tecnologias de exploração e de metalurgia demonstrou a viabilidade técnica e econômica de empreendimentos mineração de mar profundo, cujo início tem sido previsto para os próximos 20-25 anos.

As características dessas províncias minerais, as condições de formação, crescimento e enriquecimento metálico fornecem elementos para avaliar o potencial de ocorrência de depósitos significativos em outras regiões oceânicas.

No Atlântico as condições oceanográficas são menos favoráveis à ocorrência de campos de nódulos comparáveis aos do Pacífico e Índico, principalmente pela influência da sedimentação de origem terrígena. Na província de depósitos ferromanganesíferos sul-americana (Horn et al., 1972), os esparsos dados disponíveis sugerem que predominam os depósitos de crostas ferromanganesíferas e de nódulos de formação hidrogênica, enriquecidos em Fe e Co. Entretanto há necessidade de se conhecer melhor o suprimento de metais formadores de minério, a oceanografia, os padrões de bioprodutividade superficial e deposição de sedimentos pelágicos para

um diagnóstico adequado do potencial desses depósitos no Atlântico Sul e Equatorial.

A par de um eventual interesse direto na descoberta e exploração de um sítio nas proximidades do território brasileiro, com as implicações econômicas e geopolíticas inerentes, as atividades em andamento podem ser de interesse ao setor mineral brasileiro, tendo em vista o desenvolvimento tecnológico alcançado neste campo e as várias formas de cooperação internacional que vêm sendo praticadas. Além desses aspectos, é importante atentar para as possíveis repercussões que o início da exploração comercial de mar profundo, inevitavelmente de larga escala, pode causar no mercado internacional de metais e no meio-ambiente marinho.

AGRADECIMENTOS

À Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), ao Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM/RJ) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio na realização do Seminário de Recursos Minerais Marinhos e a Anderson Lopes pela ajuda na edição do trabalho.

REFERÊNCIAS

- CRONAN, D.S., 1980.** Under water Minerals. Academic Press, London.
- FENG, L., DIANYUN, Q. & YUNLONG, W., 1996.** Impacts of Metal Substitutes and Technology Progress on Prospects for Deep-Seabed Mineral Commercial Mining, In: COMRA, International Seminar on Deep Seabed Mining Technology, Beijing, A.82-A.95.
- GLASBY, G. P., (Ed.), 1977.** Marine Manganese Deposits, Elsevier, Amsterdam.
- HEIN, J. R., KOSCHINSKY, A., BAU, M., MANHEIM, F. T., KANG, J. K. & ROBERTS, L., 2000.** Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts in the Pacific, In CRONAN, D. S., (Ed), Handbook of Marine Mineral Deposits. CRC Press: 239-279.
- HORN, D. R., HORN, B. M. & DELACH, M. N., 1972.** Distribution of the Ferromanganese Deposits in the World Ocean, In HORN, D. R.,

(Ed.), Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. National Science Foundation, Washington, D. C.: 9-17.

- ISA - INTERNACIONAL SEABED AUTHORITY, 1999.** Deep-Seabed Polymetallic Nodule Exploration: Development of Environmental Guidelines, Kingston: 289 p.
- JAUHARI, P. & PATTAN, J. N., 2000.** Ferromanganese Nodules from the Central Indian Ocean Basin, In CRONAN, D. S., (Ed), Handbook of Marine Mineral Deposits. CRC Press: 171-195.
- MANHEIM, F. T., 1972.** Composition and Origin of Manganese-Iron Nodules and Pavements on the Blake Plateau, In HORN, D. R., (Ed.), Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. National Science Foundation, Washington, D.C.: 105-116.
- MORGAN, C. L., 2000.** Resource Estimates of the Clarion-Clipperton Manganese Nodule Deposits, In CRONAN, D. S., (Ed.), Handbook of Marine Mineral Deposits. CRC Press: 145-170.
- SANDWELL, D. T., SMITH, W. H. F. & YALE, M. M., 1996.** Marine Gravity from Satellite Altimetry. Disponível na INTERNET via // topex.ucsd.edu/marine_grav/mar_grav.html. Arquivo consultado em fevereiro de 2000.
- SOARES-GOMES, A., SILVA, C. G. & PALMA, J. J. C., 2000.** Causas e conseqüências do impacto ambiental da exploração dos recursos minerais marinhos. Rev. Bras. Geof., neste volume.
- U. N. OCEAN ECONOMICS AND TECHNOLOGY BRANCH, 1982.** Assessment of Manganese Nodule Resources : The data and Methodologies, Graham and Trotman, LTD. , London
- von STACKELBERG, U., 2000.** Manganese Nodules of the Peru Basin. In CRONAN, D. S., (Ed), Handbook of Marine Mineral Deposits. CRC Press: 197-238
- WELLING, C. L., 1996.** Manganese nodule design concepts. In: COMRA, International Seminar on Deep Sea-bed Mining Technology, Beijing, B1-B15.
- www.ifremer.fr/drogm/realisation/miner/nod

NOTE ABOUT THE AUTHORS

Jorge J. C. Palma

Received his B.Sc. in Geology in 1967 from the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil), M.Sc. in Geology in 1989 from the Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brazil), and D.Sc. in Geophysics in 1998 from the Universidade de São Paulo. From 1967 to 2000, he worked for the Departamento Nacional da Produção Mineral and since 1984 he is a lecturer/researcher at the Laboratório de Geologia Marinha of the Universidade Federal Fluminense (Brazil). His main research interests are tectonic evolution and crustal structure of oceanic fracture zones and continental margins, mid-ocean ridges, marine geological mapping, and marine mineral resources, and geological and geophysical aspects of the U. N. Convention on the Law of the Sea. He participated

in numerous cruises of Brazilian and other country ships as well as in several working groups for the Brazilian Government.

Ivo B. M. Pessanha

Received his B.Sc. in Oceanography in 1999 from the Universidade do Estado do Rio de Janeiro. He is currently working towards his M.Sc. in Marine Geology and Geophysics at the Departamento de Geologia-LAGEMAR of the Universidade Federal Fluminense (Brazil) on the structure eastern Brazilian continental margin (South Atlantic). His main research interests are tectonic evolution and crustal structure of continental margins, gravity modeling and marine geological mapping. Ivo Pessanha is a fellow of the Brazilian Agência Nacional do Petróleo (ANP).

UFC - Federal University of Ceará **CENTER OF SCIENCE OF THE GEOLOGY DEPARTMENT** **LGPSR Geophysical Prospecting and Remote Sensing Lab**

The LGPSR's main concern is education, research and extension courses. Undergraduate courses in geology and Graduate courses leading to Master's degrees with areas of interest in Geophysics such as Hydrogeology, Groundwater Geophysics, Geophysical Prospecting and Remote Sensing. Visit <http://ufc.br>

UFPA - Federal University of Pará

Offers a Graduate Course in Geophysics leading to Master's and Doctorate's degrees. The main research areas are *Electric and Eletromagnetics, Potential (gravity and magnetics), Seismics and Well-log*, applied to petroleum, mining, ground water and environmental problems. Contact cpgf@ufpa.br