

MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL E RESPONSÁVEL EM AMBIENTE MARINHO PROFUNDO

SUSTAINABLE AND RESPONSIBLE MINING IN THE DEEP OCEANIC CRUST

Fernando J.A.S. Barriga

(Instituto Dom Luiz [Lab. Associado], Fac. Ciências Univ. Lisboa)

Resumo

Verifica-se presentemente um aumento acelerado da procura e consumo de recursos metálicos, muitos deles críticos, incluindo terras raras, cobalto, níquel, tungsténio, molibdénio, cobre, titânio, nióbio, platinídeos, índio, gálio, telúrio e muitos outros. A sociedade em geral mal se apercebe deste facto, alimentado pelo crescimento da população e sobretudo pelo aumento generalizado do poder de compra, e o concomitante crescimento do consumo de bens de alta tecnologia. A chamada economia circular terá de continuar a ser alimentada por mineração. A situação é particularmente grave para a UE, pois nela produzem-se apenas 5% dos recursos minerais utilizados pela indústria dessa mesma UE. Por este motivo, aumentou muito a procura de novas fontes de matérias-primas minerais, nomeadamente alvos a grande profundidade nos continentes, o Ártico, e os fundos marinhos, destacando-se estes últimos, onde são já conhecidas vastas quantidades de recursos. Mais que partir apressadamente para mineração sub-oceânica profunda em larga escala, precisamos de prontidão, o que implica, entre outras condicionantes, conhecer melhor o ecossistema. À ciência compete indicar o caminho, à indústria adoptar as descobertas científicas, à governança criar o quadro legal, e fazê-lo cumprir. A primeira regra terá de ser sempre “as operações ilegais ou não reguladas têm de ser encerradas”. Urge criar “mineração azul”, que respeite o ecossistema, da mesma forma que necessitamos de pescas e agricultura sustentáveis. Há bons exemplos a seguir, com relevo para o da Noruega. Sem prejuízo da necessária mudança de mentalidades (com menos consumismo), não queremos escolher entre indústria e ambiente, queremos ambos.

Palavras-chave: *Mineração submarina profunda; recursos críticos; terras raras; cobalto; nódulos e crostas polimetálicos; sulfuretos maciços submarinos.*

Abstract

There is currently an accelerated increase in the demand for metallic resources, many of which critical, including rare earths, cobalt, nickel, tungsten, molybdenum, copper, titanium, niobium, platinum, indium, gallium, tellurium and many others. Society at large is hardly aware of this fact, fueled by population growth and above all by the generalized increase in purchasing power and the concomitant growth of the consumption of high technology goods. The so-called circular economy will have to continue to be fueled by mining. The situation is particularly serious for the EU as it produces only 5% of the mineral resources used by its (EU) industry. For this reason, the search for new sources of mineral

raw materials, such as deep-seated targets in the continental crust, the Arctic, and the seabed, have been greatly increased, especially the latter (seabed), where vast amounts of resources are already known. Rather than hurrying offshore for deep sub-oceanic mining on a large scale, we need readiness, which implies, among other constraints, better knowledge of the ecosystem. Science should lead the way to industry, via incorporation of scientific discoveries in industrial practice. The role of governance should be to create the necessary legal framework, and to enforce it. The first rule must always be "illegal or unregulated operations have to be closed". It is urgent to create a "blue mining" set of rules that respects the ecosystem, just as we need sustainable fisheries and agriculture. There are good examples to follow, with emphasis on Norway. Without prejudice to the necessary change of mentalities (with less consumerism), we do not want to choose between industry and environment, we want both.

Keywords: *Deep seafloor mining; critical resources; rare earths; cobalt; polymetallic nodules and crusts; seafloor massive sulphides.*

Introdução: o cenário actual das matérias-primas críticas

O que não cresce (no sentido biológico) vem de uma exploração mineral. Apesar disso, há uma ignorância generalizada acerca da utilidade e formas de obtenção dos recursos minerais, da qual os geólogos nem sempre se apercebem cabalmente. Numa grande universidade dos EUA pede-se aos candidatos a estudantes o preenchimento de um questionário, que inclui a seguinte pergunta: usa materiais extraídos de minas? 80% dos inquiridos responderam negativamente. A generalidade dos nossos concidadãos fica surpreendida com o facto de a pasta de dentes conter minerais e até metais (incluindo titânio). Pode dizer-se que lavamos os dentes com minerais. Os cosméticos contêm igualmente vários metais e compostos minerais (Zn, Mg, Ti, Bi, óxidos de Fe, mica, sílica, caulino, nitreto de boro e lazurite, entre outros.

O combate a esta ignorância é uma das principais frentes que poderão favorecer a aceitação social da mineração em geral (**Figura 1**), e da mineração submarina em particular. Encontra-se muita informação através da Internet (Minerals Education Coalition, 2018; US Geological Survey, 2018), mas a sua difusão na sociedade é lenta e penosa. E se os cidadãos não têm percepção da importância dos recursos minerais, não será fácil fazer opções racionais quanto às alterações de comportamento que devemos e temos de fazer para maximizar benefícios e minimizar custos ambientais.

Ainda que em teoria a crosta continental contenha quantidades adequadas da maioria dos recursos críticos para o consumo global durante as próximas décadas, a distribuição destes é muito irregular, existindo com frequência factores geopolíticos que criam dificuldades no abastecimento. A Europa é altamente dependente do resto do mundo para o



Figura 1 Há alguns anos atrás a *New Scientist* dedicou a sua capa às preocupações de abastecimento das matérias-primas necessárias à sociedade da alta tecnologia.

seu abastecimento em metais críticos (European Commission, 2018); veja-se também a Figura 3).

Terras Raras e criticalidade

As chamadas Terras Raras (TR; REY ou REE em inglês) incluem geralmente 17 elementos: os 15 lantanídeos, o escândio e o ítrio. São metais, e muitos deles não são raros (o cério é tão ou mais abundante que o cobre na crosta terrestre). Ocorrem quase sempre juntos, e a sua separação é delicada, pelo que o conhecimento destes metais foi inicialmente dificultado. As TR são extraídas principalmente de argilas lateríticas adsorvas de íões, bastnaesite, loparite, monazite e xenotime. A procura é maior para HREY (terras raras pesadas), a ponto de se prever um excesso de produção de LREY (terras raras leves) à medida que aumenta o consumo de HREY.

O consumo global é, por ordem aproximadamente decrescente, catalisadores, ímanes, polimento, aplicações metalúrgicas, cerâmicas, vidro, fluorescentes para lâmpadas, incluindo LED, pigmentos e uma infinidade de usos menores (ver **Figura 2** e **Tabelas 1 e 2**). Atingiu $124.1 \cdot 10^3$ t em 2008, e $130 \cdot 10^3$ t em 2017



Figura 2 Neodímio metálico. A ampola tem cerca de 6 cm de comprimento. Foto e exemplar do autor

(Geological Society of London, 2011; Minerals USGS gov, 2018).

Aplicações	Ímanes	Catalisadores	Ligas	Vidro e electrónica	Vária
Consumo global 10 ³ ton	26.3	25.0	22.3	36.0	14.5
Terras Raras (principais a "bold")	Disprósio Gadolinio Neodímio Praseodímio Samário Térbio	Cério Lantânio	Cério Disprósio Lantânio Neodímio Praseodímio	Cério Európio Gadolinio Lantânio Neodímio Praseodímio Térbio Ítrio	Todos
Utilizações principais	Motores em autos híbridos e eléctricos; Turbinas eólicas; Discos rígidos; Leitores de CD e DVD; Imagiologia; Dispositivos electrónicos portáteis; Microfones e altifalantes; Refrigeração magnética.	Refinação de petróleo; Conversores catalíticos; Aditivos diesel.	Baterias recarregáveis; Células de combustível; Outras ligas (com Fe, Mg, Al) e aços especiais	Telas luminescentes em lâmpadas fluorescentes compactas, ecrans LCD e plasma; Tubos e monitores de emissão catódica; Imagiologia médica; Lasers; Fibras ópticas; Polimento e coloração de vidro.	Cerâmicas; Tratamento de água; Barras de combustível nuclear; Pigmentos; Fertilizantes; Traçadores médicos.

Tabela 1 Principais aplicações das terras raras (Geological Society of London, 2011).

Em 2011-12, a China resolveu criar medidas consideradas proteccionistas em relação a muitas das suas produções de matérias-primas, nomeadamente terras raras, volfrâmio (92% e molibdénio (35%). A China detinha o quase monopólio da produção de terras raras (97%), sendo estas essenciais na produção de bens como televisores de écran plano, "smartphones", baterias para automóveis híbridos e eléctricos, turbinas eólicas, lâmpadas de baixo consumo,

electrónica, automóveis e petróleo. Fruto em parte destas limitações às exportações por parte da China (CNN, 2012; WTO, 2012), a Europa decidiu investir na procura de novas fontes de recursos críticos, incluindo o fundo do mar.

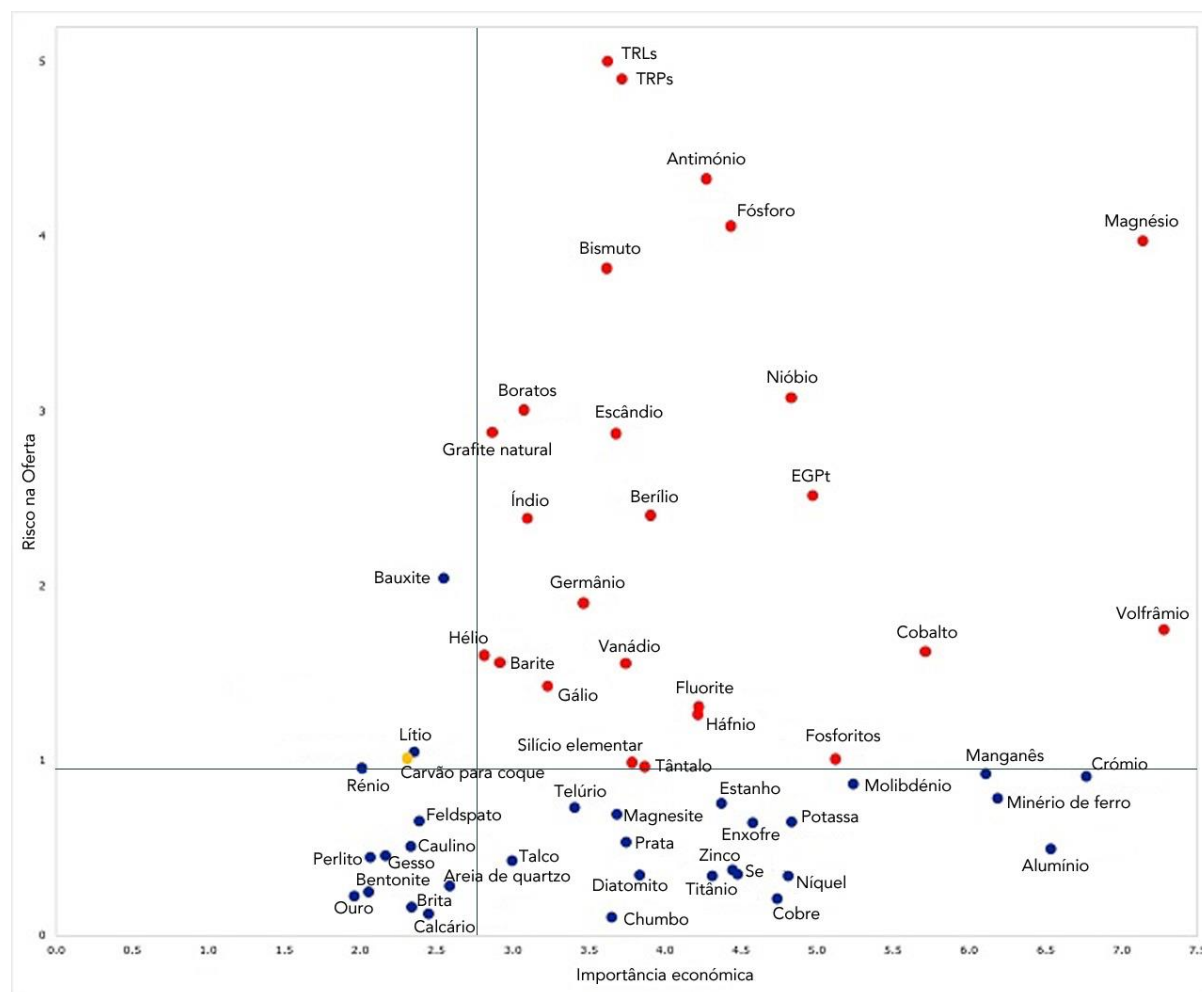


Figura 3 Diagrama da UE (versão de 2017) para a criticalidade das matérias-primas (MPs) naturais. Excluíram-se as não geológicas, que são apenas três (borracha natural, madeiras nobres de folhosas e cortiça natural). Círculos vermelhos, MPs críticas; círculos azuis, não críticas; o carvão para coque deixará em breve de figurar no diagrama.

A subida muito acentuada da procura de matérias-primas (principalmente críticas), está relacionada com o crescimento da população mundial e com o aumento do seu poder de compra, bem como com o facto de que uma infinidade de aplicações, incluindo as de alta tecnologia, “energias verdes” e muitas outras, dependem de recursos críticos (ver **Figura 3**). Configura-se um cenário de aumento da pressão sobre estes recursos nas próximas décadas. As cadeias de valor para as indústrias dependentes vão ser, seguramente, afectadas por vincadas alterações globais (transfronteiriças).

Por razões estratégicas e económicas, as grandes potências empenham-se em assegurar um lugar cimeiro na corrida aos recursos críticos da crosta profunda. Mencionando apenas duas, a União Europeia, após muitos anos de subalternização das questões mineiras, quer na crosta continental quer na oceânica, viu-se confrontada com a realidade preocupante de que apenas cerca de 5% das matérias-primas críticas utilizadas pela indústria europeia são

produzidas na EU. A dependência de um número muito restrito de fornecedores (**Figura 4**), alguns com situações políticas e sociais menos estáveis, levantam a possibilidade de que o fornecimento possa ser posto em causa. Por outro lado, como já foi mencionado, crescem as dúvidas quanto à capacidade da crosta continental de conseguir alimentar um consumo crescente, e que se espera continue a crescer até finais do século.

	Filmes Fotovoltaicos	Turbinas Eólicas	Veículos		
Metal	Películas	Ímanes	Ímanes	Baterias	Iluminação
Índio	✱				
Gálio	✱				
Telúrio	✱				
Disprósio		✱	✱		
Praseodímio		✱	✱	✱	
Neodímio		✱	✱	✱	
Lantânio				✱	✱
Cobalto				✱	
Manganês				✱	
Níquel				✱	
Lítio				✱	
Cério				✱	✱
Térbio					✱
Európio					✱
Ítrio					✱

Tabela 2 Matérias-primas críticas em aplicações e componentes para “energias verdes” (USDOE, 2011)

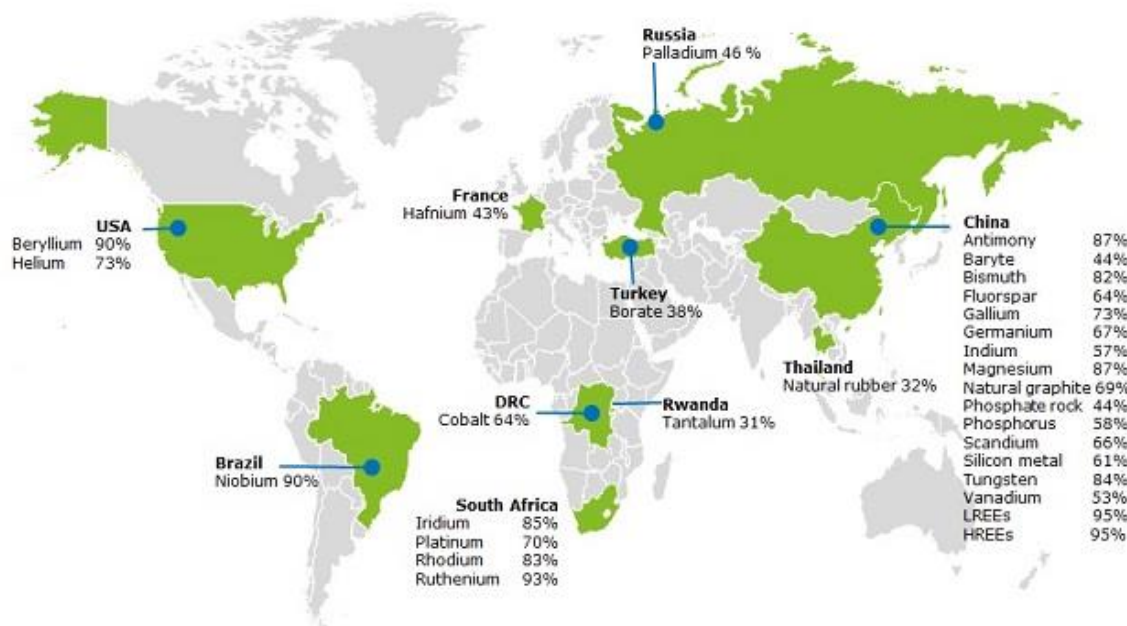


Figura 4 Principais países fornecedores de recursos críticos. O Háfnio atribuído a França é proveniente de jazigos localizados fora da Europa (Vulcan, 2011). LREE: terras raras leves; HREE: terras raras pesadas.

Platinídeos

São insubstituíveis nas aplicações catalíticas, e muito importantes em numerosas aplicações que tirem partido das suas propriedades de oxidação-redução, e extrema resistência à corrosão, como por exemplo monitores de écran plano, fibra de vidro, instrumentos médicos, discos rígidos informáticos, “nylon” e lâminas. À procura industrial acresce a procura para joalheria e investimento (34%). A África do Sul domina largamente o mercado (ver Figura 4), conferindo elevada criticalidade a este grupo de metais.

Cobalto (Slack et al., 2017)

Metal de enorme gama de aplicações, incluindo:

1. Ligas (incluindo carboneto de W) resistentes a altas temperaturas, desgaste e corrosão, apropriadas até para implantes ortopédicos e próteses; ímanes permanentes de Alnico e Sm-Co; ligas com Pt para joalheria. Incluem-se aqui as superligas, com 18% da procura global em 2016;

2. Baterias recarregáveis, para automóveis eléctricos e híbridos, computadores portáteis, “smartphones” e outros dispositivos informáticos portáteis. Esta é já a maior aplicação do cobalto (50% da procura global em 2016). A quantidade de cobalto nestas aplicações varia entre cerca de 15 g num smartphone e até 10 a 15 kg num automóvel eléctrico (Fortuneminerals.com, 2017). Cresce a convicção de que em breve não será possível satisfazer a procura, a partir das fontes convencionais (nos continentes) a menos que o cobalto seja substituído através de tecnologias por enquanto inexistentes;

3. Outras aplicações. O cobalto é também importantíssimo em aplicações que incluem dúzias de catalisadores, em processos vários; como pigmento e corante, aliás a primeira aplicação do cobalto, desde a Idade Média; os isótopos radioactivos de cobalto são úteis em numerosas outras aplicações, da radioterapia e exames radiológicos à pasteurização fria; e ainda em electro revestimento e esmaltagem de porcelana (Wikipedia, 2018).

São grandes as preocupações com a estabilidade do fornecimento de cobalto a médio e longo prazo, com frequente instabilidade política e uma grande parte da produção provindo de explorações artesanais, com relatos chocantes de uso de crianças na produção, e grandes problemas sociais e ambientais (Financial Times, 2017). Com efeito, o cobalto é uma das matérias-primas críticas que mais preocupações levantam, e que mais poderá justificar o recurso à mineração em mar profundo (ver **Figura 5**).



Figura 5 Evolução do preço do cobalto nos últimos cinco anos.

Lítio

Ainda que com utilização cada vez maior, sobretudo em baterias recarregáveis, o lítio não aparenta constituir um problema global quanto a disponibilidade. Existem reservas e recursos em terra suficientes para abastecer a indústria, e a água do mar contém enormes recursos (Minerals USGS gov, 2018). A Coreia do Sul trabalha já afincadamente no desenvolvimento de uma instalação para extracção de lítio da água do mar, para uso próprio e exportação em larga escala (<https://www.nextbigfuture.com/2011/01/south-korea-commercialization-lithium.html>).

Prospecção mineral

Como é sabido, a prospecção mineral transfere recursos minerais hipotéticos e especulativos para o grupo dos recursos conhecidos, por vezes engrossando as reservas, susceptíveis de exploração económica. Trata-se de uma actividade de geólogos e geofísicos por excelência, que inclui definição de objectivos e estratégias, selecção de áreas, reconhecimento, prospecção detalhada, pesquisa de alvos e definição de reservas e teores. Quando a procura aumenta, aumenta igualmente o investimento em prospecção, e podem definir-se novas estratégias, como é o caso da prospecção em ambiente marinho profundo.

É fácil concluir que as reservas não são estáticas, antes aumentando se a procura aumentar, através não só da prospecção e pesquisa, mas também da viabilização de recursos antes sub-económicos. Esta dinâmica aplica-se quer a situações nos continentes, quer a zonas costeiras, quer a fundos marinhos profundos.

Ciência e recursos em mar profundo

Apesar do muito que continua por explorar, as últimas décadas testemunharam avanços extraordinários no conhecimento dos fundos marinhos. Citando apenas aqueles relacionados com recursos da crosta oceânica profunda, há um enorme potencial, que importa caracterizar de um ponto de vista de futuras explorações minerais, com definição de reservas (no sentido rigoroso da palavra) e, portanto, de tecnologias capazes de explorar tais recursos, sem esquecer a preservação do ecossistema marinho profundo. Gonçalves et al. (2015) apresentaram recentemente o estado da arte acerca dos principais recursos, pelo que aqui apenas se apresenta o assunto resumidamente, e com ênfase nos avanços entretanto alcançados. Para uma análise dos recursos das plataformas continentais ver Hannington et al. (2017).

Hidrocarbonetos. São os únicos recursos gerados nos fundos marinhos que se encontram em exploração (petróleo e gás natural), cada vez mais em domínio profundo. Às reservas destes recursos acrescem, desde há cerca de duas décadas, vastas quantidades de hidratos de gás. Contudo, a tecnologia para extrair os hidratos de gás (um gelo que arde) está muito atrasada, por um lado, e, por outro, o seu enquadramento geológico levanta fortes possibilidades de que se gerem deslizamentos de sedimentos em grande escala, quer naturais quer relacionados com a eventual exploração, capazes de gerar sismos e tsunamis. É mais que nunca importante monitorizar as maiores concentrações de hidratos de gás, mesmo sem uma perspectiva de exploração.

É sabido que se ensaiam medidas para diminuir o mais possível a libertação de gases de estufa para a atmosfera, nomeadamente através da substituição do parque automóvel de

combustão interna por veículos eléctricos, mas esta transição será difícil, cara e lenta, principalmente limitada pela disponibilidade de recursos minerais como cobalto e terras raras, conforme já mencionado atrás. Cada vez mais se configura a necessidade de imobilizar a maior quantidade possível de CO₂, os fundos marinhos aparecem como um dos principais candidatos.

Sequestração de CO₂. Consiste na imobilização do CO₂ de forma permanente, ou pelo menos por largas centenas de anos. Têm sido aventadas várias alternativas, incluindo armazenamento de CO₂ líquido sob aquíferos salinos profundos nos continentes (Bachu, 2015) e “fertilização” dos oceanos com nanopartículas de Fe para estimular a produção de fitoplankton, para acelerar a produção de biomassa e concomitante fixação de CO₂ (Markels and Barber, 2001). Recentemente, a fixação de CO₂ em carbonatos, por reacção com rochas basálticas, ganhou novo ímpeto com a demonstração de que estas reacções são rápidas, ao contrário daquilo que se supunha (Matter et al., 2016). De resto, a fixação por carbonatação apresenta vantagens óbvias sobre a sequestração que mantenha o CO₂ no estado líquido. A principal razão para o retorno da sequestração é o fracasso das tentativas de controlar as emissões de CO₂, pois nem sequer se verifica diminuição significativa da quantidade de gases de estufa transferidos para a atmosfera, muito menos nos aproximamos da situação de emissões zero que seria necessária para estabilizar o clima. Apesar de todas as dificuldades, a sequestração afigura-se, segundo alguns, como a única alternativa capaz de produzir resultados na escala necessária (Nature Geo, 2009). A crosta oceânica profunda, não apenas basáltica mas também ultramáfica, tem um enorme potencial, devido à sua abundância de catiões divalentes disponíveis para reacções de carbonatação (Ca, Fe, Mg, Mn), e às grandes quantidades de rochas a temperaturas de várias dezenas de graus.

Biosfera Profunda. A massa da biosfera microbiana que vive na porosidade dos sedimentos e fracturas das rochas da crosta oceânica profunda tem vindo a ser estimada em baixa, admitindo-se actualmente que constitua um pouco menos de 1% da biosfera terrestre total (Colwell and D’Hondt, 2013), mesmo assim cerca de 6 Gigatoneladas de carbono contido (= $6 \cdot 10^{15}$ g). A biosfera profunda é constituída sobretudo por *Archea* e *Bacteria* extremófilas. São organismos quimiossintéticos que, juntamente com a fauna das fontes hidrotermais, recebem a quase totalidade da energia e nutrientes de que necessitam de fontes internas do planeta, em última análise da fissão nuclear, pouco ou nada dependendo da energia solar. Pode assim dizer-se que a vida na Terra depende de dois reactores nucleares, um de fusão (o Sol) e outro de fissão (a própria Terra).

Menciona-se aqui a biosfera profunda e os seus organismos extremófilos porque constitui uma fonte de recursos naturais intimamente associados aos materiais geológicos dos fundos marinhos, com já numerosas aplicações, em vários domínios, incluindo amplificação de ADN, detergentes, cozinhar e fermentar, branqueamento de papel, comutadores ópticos e geradores eléctricos fotónicos, lipossomas transportadores de drogas, cosméticos, protectores de proteínas, ADN e células, alimentos saudáveis, suplementos dietéticos, corantes alimentares, rações para animais, biologia molecular e neve artificial. Ver Gonçalves et al.

(2015). O aproveitamento dos organismos da biosfera profunda não depende de extracção de grandes quantidades de micro-organismos, pois estes podem ser cultivados *in vitro*.

Recursos metálicos

Nódulos e crostas polimetálicos (Hein and Koschinsky, 2014; Kuhn et al., 2017; Petersen et al., 2016). Os nódulos polimetálicos (também designados por nódulos de manganês) são concreções tipicamente com alguns centímetros de diâmetro e forma esferoidal (forma de batatas), ainda que possam apresentar formas discóides, irregulares, e outras ainda, e dimensões não raramente até cerca de 15 cm, podendo atingir mais de 20 cm de diâmetro. Foram descobertos ainda no século XIX, pela expedição Challenger (Murray and Irvine, 1895). Consistem em camadas concêntricas de óxidos de manganês e de ferro, contendo quantidades menores de níquel, cobre e cobalto, e traços, potencialmente recuperáveis, de molibdénio, titânio, lítio e terras raras. Constituem acumulações metálicas bidimensionais, que ocorrem principalmente atapetando planícies abissais sedimentadas, entre os 4000 e os 6000 metros de profundidade, onde a taxa de sedimentação não ultrapasse 20 mm por milhar de anos. Os principais processos geradores de nódulos são (1) hidrogenéticos, com precipitação a partir da água do mar; (2) diagenéticos, a partir de fluidos intersticiais dos sedimentos; e (3) hidrotermais, a partir de fluidos de campos hidrotermais submarinos. Os nódulos hidrogenéticos crescem muito devagar (1-10 mm por milhão de anos, enquanto os diagenéticos atingem velocidades de crescimento de 250 mm/Ma (na Bacia do Peru, ver (von Stackelberg, 2000)). Contudo, não se conhecem nódulos com mais de 21 cm de diâmetro. Existem ocorrências de nódulos até 5,5 metros abaixo do fundo, na Bacia Central do Oceano Índico. Nesta região 80% dos nódulos recolhidos no interior dos sedimentos são pequenos (<2 cm) e tanto menores quanto mais profundamente localizados, enquanto no Atlântico e no Pacífico (BP) atingem 8 e >6 cm, respectivamente (Pattan and Parthiban, 2007). Os nódulos resultam quase sempre da acção de processos sobrepostos, e apresentam taxas de crescimento médias de várias dezenas de mm/Ma, três ordens de grandeza abaixo das dos sedimentos pelágicos que os rodeiam.

A contribuição diagenética parece ser responsável pelo enriquecimento em cobre, níquel, molibdénio e lítio, entre outros. Crê-se que cobalto e terras raras estão mais relacionados com os processos hidrogenéticos. Estes exigem altas permeabilidades nos sedimentos, com circulação de água do mar oxigenada nos centímetros superficiais dos sedimentos. Nalguns casos esta camada óxica atinge 2-3 metros de espessura.

O mapa (Figura 6) mostra as principais áreas ricas em nódulos, actualmente já razoavelmente caracterizadas. Estas áreas, e as áreas favoráveis insuficientemente estudadas, totalizam mais de $50 \cdot 10^6$ km². A abundância de nódulos é geralmente inferior a 15 kg/m², mas pode atingir 75 kg/m².

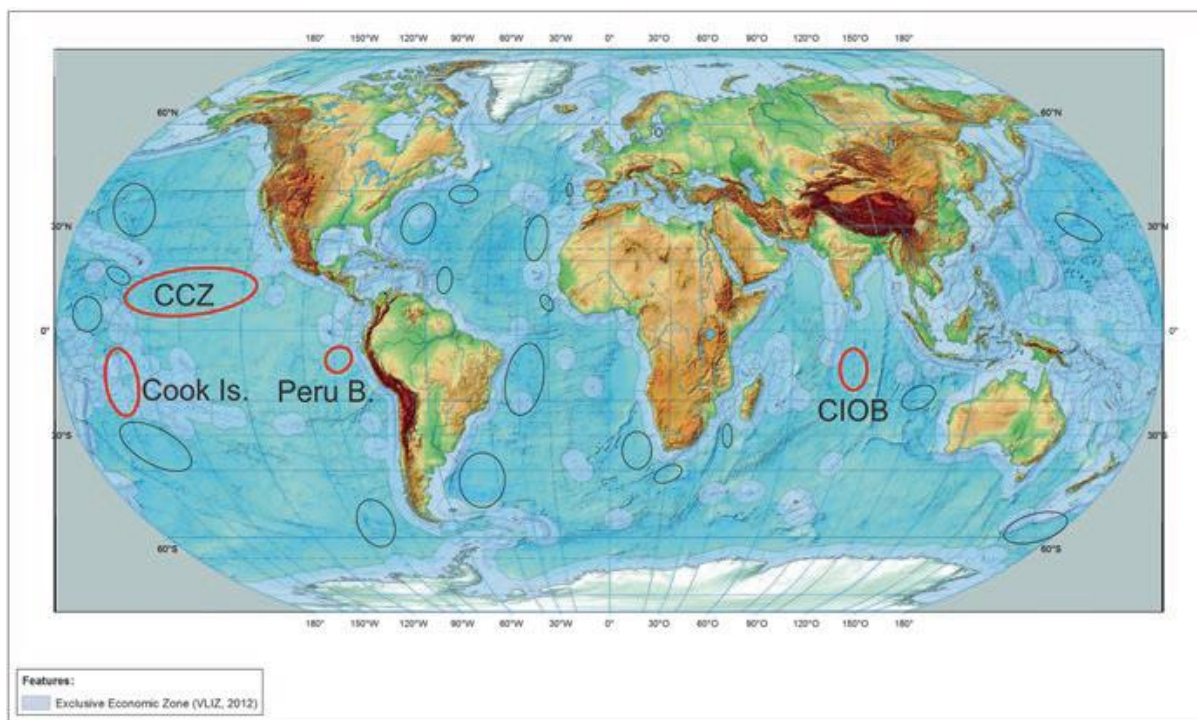


Figura 6 Localização dos principais campos de nódulos polimetálicos em planícies abissais oceânicas. A vermelho os de maior relevância económica. CCZ: Clarion Clipperton Zone; Cook Is.: Ilhas Cook; Peru B: Bacia do Peru; CIOB: Bacia Central do Oceano Índico; In Kuhn et al. (2017); ver também Hein et al. (2013).

Os nódulos polimetálicos têm um enorme potencial económico (**Tabela 3**). A Lei do Mar (UNCLOS, United Nations Convention of the Law of the Sea) foi criada originalmente com o objectivo de regulamentar o acesso aos nódulos. Expostos em fundos aplanados, e desligados do sedimento subjacente (ou circundante) os nódulos pareciam relativamente fáceis de extrair, o que só é verdade por comparação com outros recursos da crosta oceânica profunda. Recentemente têm-se produzido grandes avanços tecnológicos, estamos perto de atingir a prontidão tecnológica necessária (ver Wijk (2018)).

Recursos	Zona Clarion-Clipperton (CCZ)	Reservas e outros recursos em terra	Reservas em terra	Pacífico PCZ
Manganês (Mn)	5992	5200	630	1714
Cobre (Cu)	226	>1000	690	7.4
Titânio (Ti)	67	899	414	88
Óxidos de terras raras	15	150	110	16
Níquel (Ni)	274	150	80	32
Vanádio (V)	9.4	38	14	4.8

Molibdénio (Mo)	12	19	10	3.5
Lítio (Li)	2.8	14	13	0.02
Cobalto (Co)	44	13	7.5	50
Wolfrâmio (W)	1.3	6.3	3.1	0.67
Nióbio (Nb)	0.46	3	3	0.4
Arsénio (As)	1.4	1.6	1	2.9
Tório (Th)	0.32	1.2	1.2	0.09
Bismuto (Bi)	0.18	0.7	0.3	0.32
Ítrio (Y)	2	0.5	0.5	1.7
Platinídeos (Pt, Pd, Ir, Rh, Os, Ru)	0.003	0.08	0.07	0.004
Telúrio (Te)	0.08	0.05	0.02	0.45
Tálio (TI)	4.2	0.0007	0.0004	1.2

Tabela 3. Comparação de reservas e recursos em terra com as estimativas para a Zona Clarion-Clipperton e Prime Crust Zone, Pacífico) (106 t). Segundo (Hein et al., 2013).

As zonas com maior potencial económico são (1) a Zona de Clarion-Clipperton (CCZ), onde se localizam a larga maioria das concessões (de prospecção e pesquisa) já outorgadas (pela ISA), e também (2) a ZEE das Ilhas Cook. Os principais recursos que poderão vir a ter valor económico são os seguintes (Tabela 4) (Hein et al., 2015). Ver também (Kuhn et al., 2017; Petersen et al., 2016).

Metais(s)	Produção anual <i>onshore</i> , (t)**	Produção anual de um projecto nódulos (t)	% da produção anual em terra	Produção anual de 5 projectos nódulos (t)	% da produção anual em terra ²	Teor médio nos nódulos da CCZ
Cobalto	110,000	3,400	3.10	17,000	15.5	0.17
Manganês	17,284,210	600,000	3.50	3,000,000	17.5	30.00
Cobre	15,997,172	23,600	0.15	118,000	0.8	1.18
Níquel	1,786,300	27,800	1.60	139,000	8.0	1.39
Titânio*	3,530,077	5,600	0.16	28,000	0.8	0.28

Molibdénio	250,314	1,200	0.48	6,000	2.4	0.06
Lítio	62,231	280	0.45	1,400	2.2	0.01
TR (metais)	115,850	1,626	1.40	8,130	7.0	0.08
* USGS 2015 Minerals Yearbook, Titanium (advance release)						
** EU 2014 Report on Critical Raw Materials						

Tabela 4 Significado económico da mineração de nódulos polimetálicos na CCZ.
Um projecto equivale a 2 Mt de nódulos por ano. Modificado de (Kuhn et al., 2017).

De entre as restantes áreas de nódulos polimetálicos (Figura 6), salienta-se a ZEE das Ilhas Cook, com cerca de dois milhões de km², (para uma área emersa de apenas 240 km²). Os nódulos ocorrem principalmente na bacia de South Penrhyn (profundidade ~5000 m), frequentemente com densidades superiores a 30 kg/m² (o dobro das abundâncias elevadas na CCZ). A composição dos nódulos das Ilhas Cook (CI) é diferente da maioria das restantes, com valores muito altos de Fe, Co, Ti e TR+Y (Tabela 5). As razões destas peculiaridades são a baixa velocidade de sedimentação, abundância de fragmentos sólidos propícios à nucleação dos nódulos e modo de formação sobretudo hidrogenético.

	Nódulos CI (total) (1,133,075km ²)	Nódulos CI (>25 kg/m ²) (123,844 km ²)	Nódulos CCZ (3,830,000 km ²)	Reservas em terra
Nódulos (ton)	8.86 · 10 ⁹	2.63 · 10 ⁹	21.1 · 10 ⁹	--
Manganês	1.38 · 10 ⁹	0.411 · 10 ⁹	5.99 · 10 ⁹	0.630 · 10 ⁹
Titânio	108 · 10 ⁶	32.0 · 10 ⁶	67 · 10 ⁶	420 · 10 ⁶
Níquel	37.4 · 10 ⁶	11.1 · 10 ⁶	274 · 10 ⁶	75 · 10 ⁶
Cobalto	35.3 · 10 ⁶	10.5 · 10 ⁶	44 · 10 ⁶	7.5 · 10 ⁶
Cobre	22.7 · 10 ⁶	6.74 · 10 ⁶	226 · 10 ⁶	680 · 10 ⁶
REY total	15 · 10 ⁶	4.45 · 10 ⁶	1.72 · 10 ⁶	93.5 · 10 ⁶
Zircónio	5.23 · 10 ⁶	1.55 · 10 ⁶	6.00 · 10 ⁶	0.036 · 10 ⁶
Vanádio	4.44 · 10 ⁶	1.13 · 10 ⁶	9.40 · 10 ⁶	14 · 10 ⁶
Molibdénio	2.34 · 10 ⁶	0.694 · 10 ⁶	12.0 · 10 ⁶	11 · 10 ⁶
Nióbio	0.85 · 10 ⁶	0.253 · 10 ⁶	0.46 · 10 ⁶	4 · 10 ⁶
Volfrâmio	0.494 · 10 ⁶	0.147 · 10 ⁶	1.30 · 10 ⁶	3.2 · 10 ⁶
Telúrio	21.3 · 10 ⁴	6.32 · 10 ⁴	0.76 · 10 ⁴	2.4 · 10 ⁴

Tabela 5. Estimativas da abundância de nódulos nos fundos marinhos das Ilhas Cook (CI) e da Zona de Clarion-Clipperton (CCZ) (Hein et al., 2015).

A extracção de recursos minerais nas ZEEs é regulada por legislação do estado costeiro respectivo, e não da ISA.

Crostras ferromanganesíferas

Onde as correntes impedem a sedimentação, a profundidades muito variáveis (dos 400 aos 7000 metros, mas principalmente dos 800 aos 2500m), as rochas aparecem cobertas por crostas com muitas afinidades com os nódulos, especialmente os hidrogenéticos, mas sob a forma de uma camada firmemente aderente à rocha. Estas crostas ocorrem tipicamente nos flancos de montes submarinos (incluindo *guyots*), cristas e *plateaux*. A Tabela 6 mostra as composições das crostas quanto aos principais metais, incluindo também metais em traços que poderão vir a ser objecto de recuperação como subprodutos. Salienta-se a relativa abundância de cobalto, que poderá justificar mineração (Hein and Koschinsky, 2014; Hein et al., 2013; Petersen et al., 2016).

	Pacífico PCZ	Pacífico S	Atlântico	Índico
Fe (%p)	16.90	18.10	20.90	22.30
Mn (%p)	22.80	21.70	14.50	17.00
Ni (%p)	0.42	0.46	0.26	0.26
Cu (%p)	0.10	0.11	0.09	0.11
Co (%p)	0.67	0.62	0.36	0.33
Ti (%p)	1.16	1.12	0.92	0.88
TR+Y (%p)	0.24	0.16	0.24	0.25
Bi (ppm)	43	22	19	30
Mo (ppm)	461	418	409	392
Nb (ppm)	52	59	51	61
Pt (ppm)	0.5	0.5	0.6	0.2
Te (ppm)	60	38	43	31
Zr (ppm)	548	754	362	535

Tabela 6 Composição média das crostas ferromanganesíferas em regiões seleccionadas dos fundos marinhos. In: (Hein and Koschinsky, 2014). PCZ, Prime Crust Zone

Merece ainda menção a presença de concentrações importantes de terras raras pesadas e ítrio (HREY) em fosforitos marinhos (além de urânio), de montes submarinos e margens continentais (ver Figura 7). Encontram-se presentemente numa fase precoce do respectivo conhecimento, mas poderão ajudar a resolver o problema do excesso de oferta de terras raras leves (LREY) ver Hein et al. (2016).

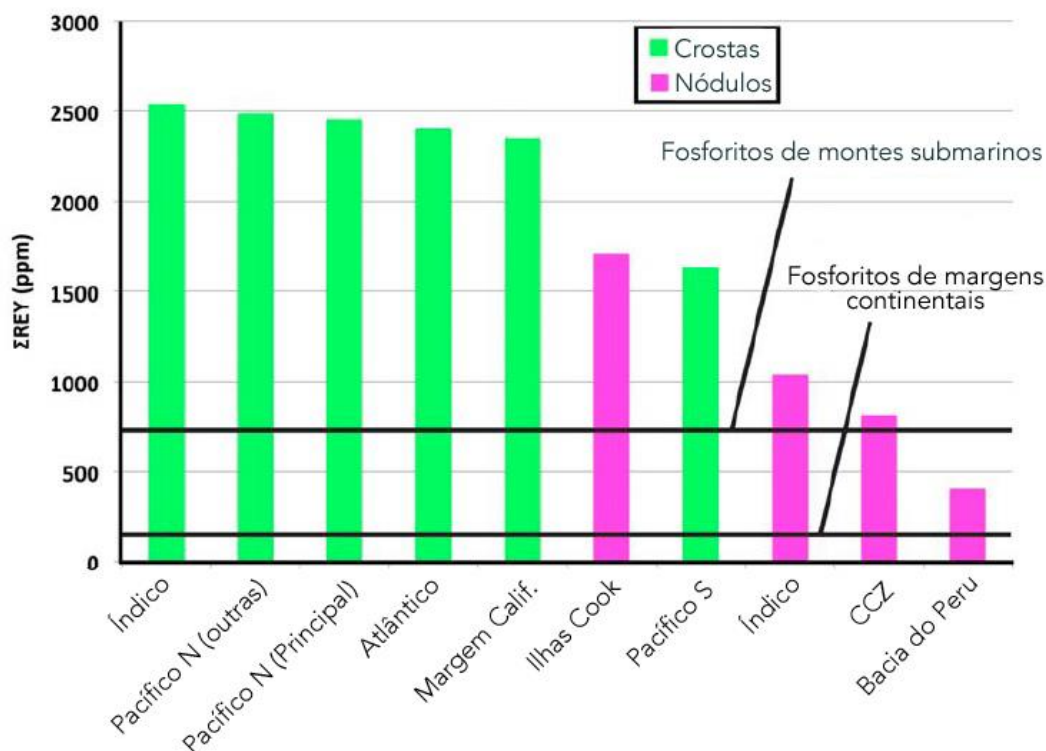


Figura 7. Teores totais médios de REY nos fosforitos de montes submarinos e de margens continentais (Hein et al., 2016)

A área de fundos marinhos (**Figura 8**) favorável à formação de crostas ferromanganesíferas potencialmente recuperáveis está estimada em mais de $23 \cdot 10^6$ km² (Hein and Koschinsky, 2014), dos quais cerca de $3.1 \cdot 10^6$ km² apresentam a conjugação positiva de ocorrência de montes submarinos, *guyots* e *plateaux* com topos entre 800 e 3000m de profundidade, localizados em regiões com idades superiores a 10 Ma, e taxas de sedimentação inferiores a 2cm por 10³ anos (Petersen et al., 2016).

Os guias de prospecção para crostas são, portanto, variados (batimetria, geomorfologia, sedimentação, correntes junto ao fundo). Recentemente, um grupo português explora a prospecção baseada em informação de satélite (incluindo nódulos e sulfuretos maciços submarinos), com resultados iniciais muito animadores, tendo já interessado a Nautilus Minerals no assunto (Carvalho et al., 2018).

A caracterização das crostas, *in situ*, é difícil, pois a simples observação visual não permite calcular a sua espessura, parâmetro crucial na estimação do seu valor (Hein and Koschinsky, 2014). Mas o grande problema da futura extracção das crostas ferromanganesíferas (para além da questão ambiental) relaciona-se com o seu modo de ocorrência, firmemente fixadas ao substrato rochoso (Yamazaki et al., 2002).

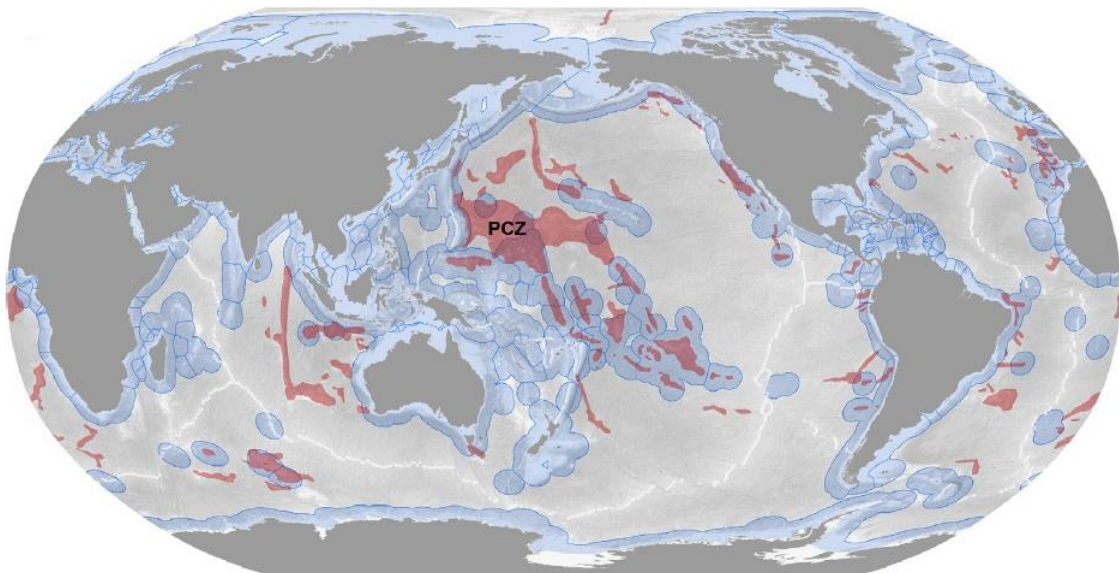


Figura 8. Áreas favoráveis à ocorrência de crostas ferromanganesíferas. Notar que uma grande parte se encontra em ZEE's ou ZEPC's (a azul). Segundo (Petersen et al., 2016). PCZ, Prime Crustal Zone.

Jazigos de sulfuretos maciços submarinos (sms)

São bem conhecidos em terra, onde são objecto de importantes explorações desde a Antiguidade. A estes jazigos foi atribuída origem nos fundos marinhos muito antes das primeiras descobertas nos fundos oceânicos actuais (ver Oftedahl, 1958). As descobertas de centenas de campos hidrotermais submarinos (Beaulieu, 2015), contendo quantidades variáveis de sulfuretos (por vezes estimadas em mais de um milhão de toneladas), com teores elevados, suscitou grande interesse nestas mineralizações, e a primeira operação comercial de extracção de minérios metálicos nos fundos marinhos profundos poderá ser Solwara 1, em águas da Papuásia, conduzida pela empresa australiana/canadiana Nautilus Minerals. No Japão realizaram-se já testes de mineração, na Depressão de Okinawa, com algum sucesso (Yamazaki, 2018).

Mas importa compreender que os jazigos de sulfuretos maciços do passado geológico são muito maiores que os dos fundos marinhos actuais (Barriga et al., 2015); (Galley et al., 2007; Petersen et al., 2016) As ocorrências de sms com quantidades significativas de sulfuretos, e cobre com interesse económico, são relativamente modestas, totalizando cerca de 8 Mt deste metal, enquanto as reservas em terra ultrapassam 650 Mt. Petersen et al. (2015); ver também (Beaulieu, 2015) actualizaram recentemente o inventário de jazigos sms e suas tonelagens, incluindo para metais contidos, não só para 218 depósitos com mineralização significativa, em zonas neo-vulcânicas, mas também estimando os jazigos semelhantes ainda por descobrir, totalizando 750 a 1500 depósitos (incluindo os dos arcos). Os metais base contidos (Cu+Zn) totalizam cerca de 30 Mt (aproximadamente 8 Mt de Cu e 22 Mt de Zn). Exceptuando o jazigo de Atlantis II no Mar Vermelho, os maiores depósitos de sms atingem cerca de 10 Mt de minério, com tamanho mediano de 50.000 a 100.000 toneladas de minério. Estas conclusões derivam de mais de 35 anos de investigação dos fundos marinhos e a sua importância não deve ser minimizada.

A produção anual mundial primária (de mina) de Cu e Zn foi de (2017) 19.700 Mt para Cu e 13.200 para Zn (Minerals USGS gov, 2018) o que significa que o recurso total contido em jazigos sms, descoberto e ainda por descobrir, em zonas neovulcânicas, é equivalente, às taxas actuais, a cerca de 5 meses (Cu) e 20 meses (Zn) de consumo mundial. Mesmo as estimativas mais optimistas sugerem que os depósitos de sms não podem contribuir substancialmente para a produção mundial de metais (Singer, 2014). A comparação com depósitos de sulfuretos maciços vulcanogénicos (VMS), em terra, mostra um contraste impressionante entre o tamanho dos depósitos de sulfuretos maciços do fundo do mar (muito menor) e os depósitos VMS, para os quais a divisão “pequena” é geralmente tomada como 5-10 Mt. De facto, como apontado por (Galley et al., 2007) grande parte do minério VMS, em terra, está contido em depósitos que variam entre grandes e supergigantes (de 25 a 1200 Mt). Estas dimensões são, por enquanto, desconhecidas nos sms.

A principal razão para a discrepância assinalada acima pode resultar do facto de que a exploração do fundo do mar tem sido sobretudo focada em sistemas activos expostos nos fundos marinhos, enquanto um grande número de depósitos no registo geológico foram originados abaixo do fundo do mar, protegidos da dispersão e oxidação (ver (Barriga and Fyfe, 1988); (Doyle and Allen, 2003); (Marques et al., 2007); (Dias et al., 2011); (Relvas et al., 2014). Outra linha de raciocínio (Cathles, 2011); (Hannington, 2013) baseada no equilíbrio da actividade hidrotermal na crosta oceânica profunda, sugere que a quase totalidade dos metais base lixiviados das rochas, bem como eventuais contribuições magmáticas, irão reprecipitar como sulfuretos no interior da crosta, possivelmente concentrados em jazigos, mas também como disseminações, uns e outros abaixo do fundo, e não em depósitos sms (superficiais).

A maior parte da prospecção em águas profundas não foi dirigida para depósitos minerais submarinos, mas sim para campos hidrotermais submarinos, activos. O potencial é muito grande, mas encontrar esses depósitos de sulfuretos maciços no fundo do mar exigirá estratégias de prospecção muito diferentes das que detectam dispersão activa em edifícios hidrotermais, produzindo copiosas quantidades de “fumo negro”. Temos basicamente duas possibilidades: (a) actualmente não se formam ssms (sub-seafloor massive sulphide) gigantes (não há evidências para esta hipótese negativista); ou (b) os ssms gigantes formam-se actualmente, mas ainda não os encontramos. Trata-se de procurar grandes massas de sulfuretos cobertas por não mais de alguns metros de sedimentos ou rochas vulcânicas, em áreas de prospecção muito grandes. Serão necessárias frotas de AUVs trabalhando em cooperação (Abreu et al., 2016), e geofísica, geologia, mineralogia e geoquímica. Um passo importante foi dado através do projecto europeu Blue Mining (Wijk, 2018) que elevou a prontidão dos métodos de prospecção vários graus.

Mesmo formando-se nos eixos das cristas médias oceânicas, e nas regiões axiais dos arcos, os sms, e os seus parentes ssms, acabarão por ser transportados para fora das regiões axiais, pelos processos de alastramento dos fundos oceânicos. Fora das regiões axiais poderemos ainda encontrar alguns jazigos em pleno processo de formação. A quantidade de jazigos que se poderão encontrar é enorme. Cathles (2011) estima que “a crosta oceânica profunda é uma província gigante de jazigos sms e ssms com recursos metalíferos 600 vezes superiores à totalidade das reservas de sulfuretos maciços vulcanogénicos conhecidos em terra, e cobre contido suficiente para >6000 anos à taxa de consumo actual”.

Em conclusão, devemos encontrar os grandes depósitos de ssms e aprender a explorá-los, porque os depósitos de sms por si só não produzirão uma contribuição significativa para a questão da oferta global de metal.

REY (terras raras e ítrio)

Já vimos que nódulos, e especialmente crostas, contêm grandes quantidades de terras raras. Contudo, a sua recuperação poderá ser complicada, por razões de tecnologia mineira e metalurgia. Recentemente descobriram-se novas fontes de terras raras em mar profundo, em sedimentos nos fundos marinhos, inicialmente no oceano Pacífico (Kato et al., 2011), mas já existem alguns estudos referentes ao oceano Índico (Yasukawa et al., 2014; Zhang et al., 2017) e ao Atlântico (Menendez et al., 2017). Os ainda poucos elementos existentes sugerem que a extracção de REY a partir de sedimentos abissais poderá ser substancialmente mais simples que de nódulos ou crostas.

O Japão tem dedicado amplos recursos aos estudos de REY em sedimentos abissais. O estudo original de Kato et al. (2011) incluía já estudos preliminares mostrando a elevada solubilidade das terras raras dos sedimentos do oceano Pacífico em ácidos fracos. Mais recentemente, Takaya et al. (2018) reforçaram o conceito, definindo reservas mineiras em águas japonesas, junto à ilha de Minamitorishima. Contudo, faltam ainda estudos das consequências da extracção de grandes quantidades de sedimentos a profundidades de cerca de 5000 metros.

Áreas submarinas, ZEEs e extensões da plataforma continental

O estudo científico dos fundos marinhos profundos começou no último quartel do séc. XIX, com a expedição Challenger, justamente considerada, na altura, “The greatest advance in the knowledge of our planet since the celebrated discoveries of the fifteenth and sixteenth centuries”, ou seja, as Descobertas (Murray, 1895) in <https://www.quora.com/What-was-the-grand-tour-of-the-HMS-Challenger>. Foi a expedição Challenger que detectou pela primeira vez a presença de nódulos polimetálicos atapetando as planícies abissais. Desde então adquiriu-se uma noção razoável da dimensão gigantesca dos campos de nódulos, e também das crostas ferromanganesíferas. A Lei dos Mar foi redigida, negociada e aprovada em grande parte para regulamentar a exploração dos nódulos.

Existe alguma confusão entre Zona Económica Exclusiva (ZEE) e Zona de Extensão da Plataforma Continental (ZEPC). Diferem sobretudo quanto aos recursos naturais sob jurisdição do estado costeiro. Importa sublinhar que na UE não existe o conceito de “Mar Europeu”, a jurisdição marítima é pertença de cada estado.

A ZEE estende-se até 200 milhas náuticas (mn) da linha de base costeira do estado, e inclui o mar territorial (12 mn) e a respectiva zona contígua (das 12 às 24 mn). Na ZEE os recursos da massa de água e dos fundos são pertença do estado costeiro. Os estados costeiros não realizaram quaisquer estudos ou demonstrações para definição das respectivas ZEEs. Pelo contrário, na ZEPC a atribuição de extensões da Plataforma Continental está dependente de uma candidatura do estado costeiro apresentada junto da ISA (International Seabed Authority) devidamente fundamentada, o que implica um grande esforço para conhecimento dos fundos marinhos. Na ZEPC (que se pode estender até 350 mn da linha de base, ou até mais), o estado costeiro tem os direitos de exploração sobre os recursos do solo e subsolo

marinho, não vivos e vivos, estes desde que sempre em contacto com o solo (ou subsolo) marinho. O estado costeiro tem jurisdição exclusiva sobre os recursos da ZEE (incluindo o direito de manter recursos por explorar) mas após cinco anos de actividade extractiva terá de pagar “royalties” à ISA (o que não acontece na ZEE). Estas “royalties” serão de 1% dos proventos líquidos no 6º ano de produção, crescente 1% por ano até 7%, taxa que se manterá durante a restante duração da mineração. Esta taxa será transferida pela ISA para países em vias de desenvolvimento, principalmente países sem litoral (Artigo 82 da Lei do Mar).

Para além das ZEEs e ZEPCs existe a “Área”, sob jurisdição da International Seabed Authority (ISA, das Nações Unidas). A ISA negocia directamente com os interessados (empresas e/ou países) os direitos e deveres dos concessionários para prospecção e pesquisa e, mais tarde, os contratos de mineração, para benefício de toda a Humanidade.

O Mar Português

A ZEE portuguesa comporta 1 727 408 km², e a proposta portuguesa para ZEPC 2 400 000 km². O total (4 127 408 km²) é 44,8 vezes maior que a área emersa do país. Este domínio de fundos marinhos corresponde actualmente ao 11.º lugar mundial (**Figura 9**). A proposta para a ZEPC inclui critérios batimétricos, geomorfológicos e geológicos, incluindo petrologia e geoquímica. Estes, pela sua originalidade, merecem uma menção mais detalhada. A equipa liderada pela EMEPC demonstrou, com base em geoquímica elementar e isotópica, a consanguinidade entre as lavas dos Açores e os basaltos dos montes submarinos a Sul do arquipélago. Os montes submarinos da cadeia Sul-Açoriana são geneticamente idênticos às ilhas, apenas com menor elevação (Ribeiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2017).

O conceito de ZEPC está intimamente associado aos recursos minerais que nela possam existir, que é indispensável conhecer. Devido à extensão da área da ZEPC portuguesa, este trabalho está na sua infância, apenas se conhecendo ocorrências dos vários tipos de recursos, sem definição de blocos que se possam considerar reservas mineiras. Há um longo caminho a percorrer. Entre os poucos estudos já divulgados contam-se os de Muíños et al. (2013) e de Conceição (2013), acerca de crostas ferromanganesíferas. As conclusões, ainda que baseadas em amostragem muito esparsa, são promissoras, pois mostram valores de metais menores (especialmente Co) e em traços comparáveis aos das crostas do Pacífico Central, em concordância com a sua origem hidrogenética.

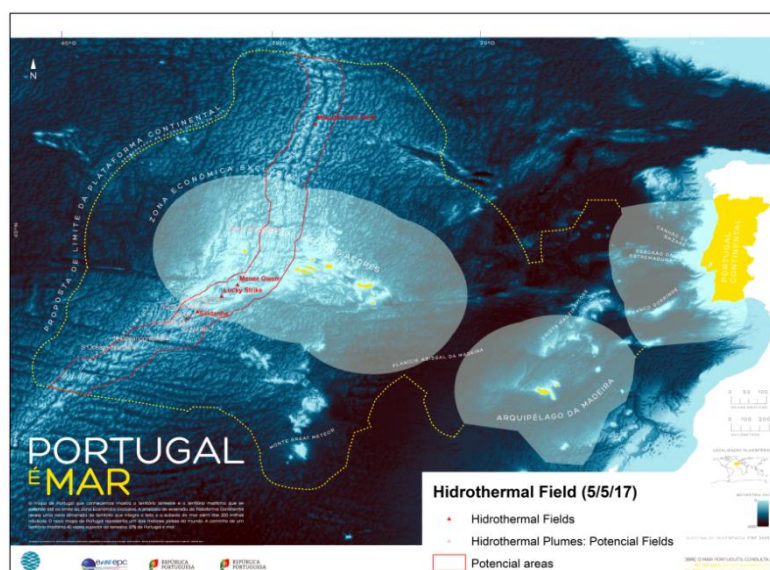


Figura 9. Mapa das áreas da ZEE e proposta de Portugal para ZEPC. Está assinalada (a vermelho) a faixa que acompanha a Crista Média Atlântica onde, segundo tudo indica, poderão vir a ser descobertos numerosos jazigos sms e ssms (ver texto). (Cortesia EMEPC, 2017)

Mas as ocorrências mais notáveis no Mar Português são sem dúvida as de campos hidrotermais submarinos. A primeira descoberta foi a do campo Lucky Strike (Golpe de Sorte) em 1992, por uma missão dos EUA que colhia basaltos ao longo da Crista dos 33°N a 42°N, para identificar segmentos da crista potencialmente activos para hidrotermalismo (Langmuir et al., 1993). Uma draga recuperou chaminés hidrotermais com fauna viva, o que lhe mereceu o nome de Lucky Strike. No ano seguinte a missão Diva-1 descobriu, por inferência geológica, o campo Menez Gwen (Fouquet et al., 1994). Seguiu-se o campo Rainbow (Fouquet et al., 1997) e o campo Saldanha (Barriga et al., 1998), respectivamente em 1997 e 1998. A região onde estes campos hidrotermais se localizam (região MOMAR, Monitoring the Mid-Atlantic Ridge) tem sido uma das mais estudadas, à escala global.

Mais recentemente, uma missão de irlandeses e britânicos descobriu um campo hidrotermal entre os Açores e a Islândia, o primeiro nestas condições, tendo sido denominado Moytirra (Wheeler et al., 2013). Esta descoberta alarga a área de prospecção no Mar Português à totalidade da Crista Média Atlântica sob jurisdição portuguesa, e regiões “off-axis” adjacentes, a leste e oeste, o que lhe confere uma importância particular no contexto do Mar Português.

A mais recente descoberta deve-se à expedição “Açores Azul”, financiada pela Fundação Oceano Azul. Localiza-se a cerca de 100 km a NW do Faial, a 570 metros de profundidade no monte submarino Gigante, junto à Crista Média Atlântica (<https://www.interridge.org/node/17788>).

Mineração submarina profunda e ecossistema

A recuperação dos recursos minerais que são objecto do presente artigo levanta questões ambientais, sobretudo de preservação do ecossistema, a que todos devemos ser sensíveis. A situação não é exclusiva da mineração. Basta recordar os danos das pescas nos ecossistemas oceânicos, ou da agricultura nos continentes. Há muitos anos, o WorldWatch Institute publicou um estudo (Brown and Wolf, 1984) intitulado “Soil Erosion: the Quiet Crisis in the World Economy”. Todos os anos perdemos cerca de 50000 km² de solo arável. Recentemente, uma vice-Presidente da FAO avisou “podemos ter apenas 60 anos de agricultura se a degradação dos solos continuar” (Arsenault, 2013). Evidentemente, nada disto significa que podemos passar sem pescas ou sem agricultura. Mas significa, sem sombra de dúvida, que necessitamos de melhores pescas e melhor agricultura. A mineração faz-nos tanta falta como as pescas ou a agricultura, mas terá de ser bem-feita, em terra ou nos fundos marinhos.

A enorme extensão dos oceanos e as dificuldades económicas e tecnológicas para o seu estudo explicam que o conhecimento seja ainda muito limitado. Cada expedição traz novas surpresas. As considerações mais relevantes são (segundo Ana Colaço, em entrevista na exposição Mar Mineral, Museu Nacional de História Natural e da Ciência, in (Barriga, 2017b):

1. Os ecossistemas em mar profundo são predominantemente compostos por espécies de vida longa e baixas descendências. O ambiente pode não recuperar do impacte da mineração, à escala humana;

2. É necessário definir a dinâmica de dispersão das plumas de estéreis. Os estéreis terão de ser devolvidos aos fundos marinhos da forma menos invasiva para os ecossistemas;
3. Terão de ser criadas zonas de protecção, isentas de mineração, adjacentes às áreas a minerar;
4. A mineração tem de envolver cientistas, indústria e governança. A investigação tem de incidir no ecossistema e em avanços tecnológicos; esta informação tem de ser transferida para a indústria e incorporada no processo produtivo, e a governança tem de criar regras adequadas, e fazê-las cumprir;
5. Temos de adoptar novos hábitos de consumo;
6. Será necessário investimento adequado (elevado) para as tarefas enumeradas: os cientistas têm de ir para o mar, e ter acesso aos melhores equipamentos.

A estas considerações gerais juntam-se mais algumas das recomendações do projecto europeu MIDAS (Gjerde et al., 2016). É claro que serão necessários estudos detalhados de monitorização. Quanto maior for a área afectada pela mineração, maiores são os riscos de distúrbios ecológicos. Deste ponto de vista, a mineração para nódulos é considerada de grande perigosidade. Sem prejuízo da precaução recomendada por Vanreusel et al. (2016) para a necessidade de cautela na definição de áreas de protecção, particularmente para nódulos (Zona Clarion-Clipperton), é importante ter em conta que a área potencial para mineração na CCZ é de $12.5 \cdot 10^6$ km², e que a área afectada em cada concessão, por mineração durante 20 anos, corresponde a 4000 km². Assumindo que 15 contratos cheguem à fase de mineração, a área minerada, ao fim de 20 anos, será de cerca de 0,5% da área potencial (Barriga, 2017a). Segundo este critério, os jazigos sms, com apenas alguns quilómetros quadrados cada, apresentam menor risco.

As plumas de dispersão de nanopartículas provenientes da mineração (estéreis) podem causar danos, particularmente se a respectiva dispersão for grande. A natureza das partículas nas plumas é também potencialmente nefasta, mas as descargas podem ser feitas o mais perto possível dos fundos, minimizando a dispersão.

A mineração moderna é perfeitamente capaz, do ponto de vista técnico, de respeitar o ecossistema. Os exemplos multiplicam-se, nos continentes. O quadro geral é o descrito por Colaço dois parágrafos acima: a ciência indica o caminho, a indústria adopta as descobertas científicas, a governança cria o quadro legal, e encarrega-se de o fazer cumprir. A primeira regra terá de ser sempre “as operações ilegais ou não reguladas têm de ser encerradas”. Ver (Barriga, 2017a, b).

Vem a propósito lembrar que o preço ambiental da atitude NIMBY (Not In My Back Yard) é geralmente muito elevado, pois implica transferir operações que exigem alta competência técnica, e vigilância adequada, para países ou executantes muitas vezes impreparados.

A UE financiou um grande projecto (para além do projecto MIDAS) destinado a elevar o grau de prontidão da mineração em ambiente marinho profundo (Wijk, 2018); ver igualmente a Figura. No âmbito deste projecto, denominado Blue Mining, criou-se uma exposição (já mencionada, Mar Mineral, Ciência e Recursos Minerais no Fundo do Mar) destinada a informar o público em geral acerca deste assunto (Barriga et al., 2018).

A exposição, em exibição no Museu Nacional de História Natural e da Ciência, tem tido um assinalável sucesso, existindo interesse, em Portugal e no estrangeiro, para itinerância.

Por fim, saliente-se que não há pressa para iniciar intempestivamente a mineração em ambiente marinho profundo (excepto operações experimentais). Importa sim que estejamos prontos para o fazer. Esta moratória deverá ser aproveitada para realizar os estudos ambientais necessários. A este respeito gostaria de citar Larry Cathles (2013), um geocientista de invulgar estatura, que conheci através de Bill Fyfe, com quem fiz trabalho de campo nos EUA, e que diz: *Humanity's Greatest Risk is Risk Avoidance*.

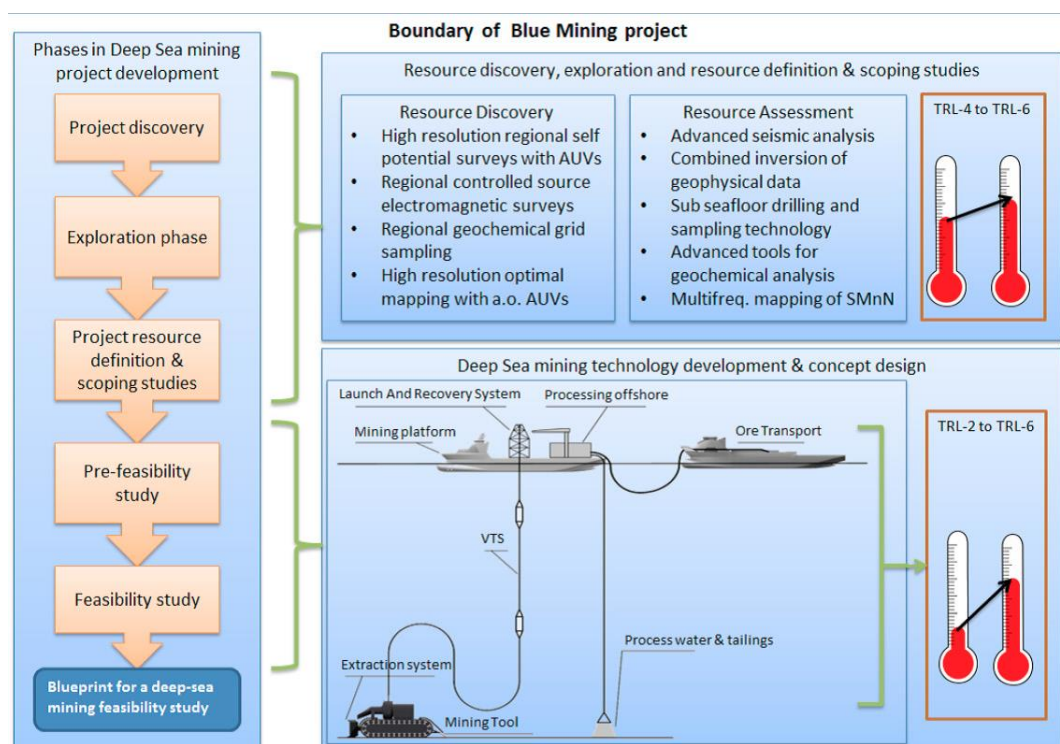


Figura 10 Síntese conceptual do projecto Blue Mining (Wijk, 2018) TRL, Technology Readiness Level.

Conclusões

A transição energética está a ser acompanhada, e a contribuir poderosamente, para o aumento acelerado da procura de metais, muitos deles críticos, incluindo terras raras, cobalto, níquel, tungsténio, molibdénio, cobre, titânio, nióbio, platinídeos, índio, gálio, telúrio e outros. Esta “transição metálica” processa-se de forma mais subtil. É urgente que os cidadãos em geral tomem consciência dos usos crescentes dos metais. Uma das mais importantes é a necessidade de aumentar a produção primária, causada pelo crescimento generalizado do poder de compra, do consumo de produtos de alta tecnologia, e pelo aumento da população. A chamada economia circular terá de continuar a ser, em grande parte, alimentada por mineração.

Tudo indica que num futuro não muito longínquo serão necessárias novas fontes de metais. Os fundos marinhos apresentam-se como o principal candidato a novo fornecedor, mas existem problemas de prospecção mineral, tecnológicos e ambientais ainda por resolver. (1) Em termos de prospecção, salientam-se os jazigos de sulfuretos maciços formados abaixo do fundo do mar, sem os quais a quantidade destes minérios exposta nos fundos não permitirá

resolver o abastecimento à escala global; (2) têm-se dado passos importantíssimos nas tecnologias de mineração em ambientes marinhos profundos, mas principalmente para nódulos polimetálicos e sulfuretos maciços. As tecnologias para crostas ferromanganesíferas e sedimentos ricos em REY (terras raras e ítrio) estão francamente mais atrasadas; (3) é necessário preservar o ambiente e os ecossistemas marinhos profundos.

Mais que partir apressadamente para mineração suboceânica profunda em larga escala, precisamos de prontidão, o que implica, entre outras condicionantes, conhecer melhor o ecossistema. À ciência compete indicar o caminho, à indústria adoptar as descobertas científicas, à governança criar o quadro legal, e fazê-lo cumprir. A primeira regra terá de ser sempre “as operações ilegais ou não reguladas têm de ser encerradas”. Urge criar “mineração azul”, que respeite o ecossistema, da mesma forma que necessitamos de pescas e agricultura sustentáveis. Há bons exemplos a seguir, com relevo para o da Noruega. Sem prejuízo da necessária mudança de mentalidades (com menos consumismo), não queremos escolher entre indústria e ambiente, queremos ambos.

Agradecimentos

O autor agradece a Ágata SCA Dias, Isabel MS Ribeiro da Costa, Jorge MRS Relvas, Álvaro MM Pinto, Sofia Martins, Jelena Milinovic, Pedro Madureira, Patrícia Conceição, Luísa Ribeiro, António Pascoal e Luís Sebastião por várias formas de cooperação; a Thomas Khun, James Hein, Sven Petersen e Georgy Cherkashov por anuência na reprodução de figuras e tabelas; e apoio financeiro do projecto Blue Mining (UE – GA 604500), e da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Esta publicação foi apoiada financeiramente pela FCT — projecto UID/GEO/50019/2013 — IDL.

BIBLIOGRAFIA

- Abreu, P., Antonelli, G., Arrichiello, F., Caffaz, A., Caiti, A., Casalino, G., Volpi, N.C., de Jong, I.B., De Palma, D., Duarte, H., Gomes, J.P., Grimsdale, J., Indiveri, G., Jesus, S., Kebkal, K., Kelholt, E., Pascoal, A., Polani, D., Pollini, L., Simetti, E., Turetta, A., 2016. Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology: An Overview of the H2020 WiMUST Project. *Marine Technology Society Journal* 50, 42-53.
- Arsenault, C., 2013. Only 60 Years of Farming Left If Soil Degradation Continues, *Scientific American*. Thompson-Reuters.
- Bachu, S., 2015. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, 188-202.
- Barriga, F.J.A.S., 2017a. Can recycling and the circular economy render seafloor mining unnecessary?, *Underwater Mining Conference UMC 2017*. International Marine Minerals Society (IMMS), Berlin, Germany.
- Barriga, F.J.A.S., 2017b. Deep-Sea Mining: a manageable necessity or a curse?, *Desenvolvimento Sustentável dos Oceanos: uma utopia útil*. University of Algarve, Faro, Portugal, pp. 227-235.
- Barriga, F.J.A.S., Costa, I.M.A., Costa, I.M.S.R., Cruz, I., Dias, Á.S.C.M.A., Janeiro, A.I., A., M.A.F., Pinto, A.M., M., Relvas, J.M.R.S., 2015. Sub-seafloor massive sulfide deposits: a resource for the near future?, *Third InterRidge Theoretical Hangzhou, China*.
- Barriga, F.J.A.S., Cruz, M.I., Póvoas, L., Lopes, C., Pinto, Á.M.M., Relvas, J.M.R.S., 2018. Mar Mineral: Uma exposição do fundo do mar, no museu; *Mar Mineral, a museum exhibition on the seafloor Vulcânica II*, 367-368.

- Barriga, F.J.A.S., Fouquet, Y., Almeida, A., Biscoito, M., Charlou, J.-L., Costa, R., Dias, Á.S., Marques, A., Miranda, J.M., Olu, K., Porteiro, F., Queiroz, M.G., 1998. Discovery of the Saldanha Hydrothermal Field on the FAMOUS Segment of the MAR (36° 30' N), in: Union, A.G. (Ed.), Oral Communication ed. Eos Transactions, p. 67.
- Barriga, F.J.A.S., Fyfe, W.S., 1988. Giant pyritic base-metal deposits: the example of Feitais (Aljustrel, Portugal). *Chemical Geology* 69, 331-343.
- Beaulieu, S.E., 2015. InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields: prepared for InterRidge, Version 3.4.
- Brown, L.R., Wolf, E.C., 1984. Soil Erosion: Quiet Crisis in the World Economy. *WorldWatch Paper* 60, September 1884.
- Carvalho, J.R.S., Rato, R., Chaves, P., Luna, T., Gonçalves, M., Carolo, E., Bento, A., Barriga, F.J.A.S., 2018. An innovative solution to a common problem: SAGRES decision support for deep-sea mining and maritime spatial planning activities, 47th Underwater Mining Conference · 10-14 September 2018, Grieghallen · Bergen, Norway.
- Cathles, L., 2011. What processes at mid-ocean ridges tell us about volcanogenic massive sulfide deposits. *Mineralium Deposita* 46, 639-657.
- Cathles, L.M., 2013. Future Rx: optimism, preparation, acceptance of risk, in: Jenkin, G.R.T., Lusty, P.A.J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A.J., Wilkinson, J.J. (Eds.), *Ore Deposits in an Evolving Earth*. Geological Society, London.
- CNN, 2012. Obama announces WTO case against China over rare earths.
- Colwell, F.S., D'Hondt, S., 2013. Nature and Extent of the Deep Biosphere. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75, 547-574.
- Conceição, P.I.S.T., 2013. Crostas Ferromanganíferas do Atlântico Central, *Geociências*. Évora, p. 102.
- Dias, Á.S., Früh-Green, G.L., Bernasconi, S.M., Barriga, F.J.A.S., Seahma cruise team, Charles Darwin 167 cruise team, 2011. Geochemistry and stable isotope constraints on high-temperature activity from sediment cores of the Saldanha hydrothermal field. *Marine Geology* 279, 128-140 Doyle, M.G., Allen, R.L., 2003. Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews* 23, 183-222.
- European Commission, 2018. *Critical Raw Materials*.
- Financial Times, 2017. Amnesty warns companies on child labour in DRC cobalt mining.
- Fortuneminerals.com, 2017. Cobalt and rechargeable batteries.
- Fouquet, Y., Charlou, J.-L., Costa, I., Donval, J.-P., Radford-Knoery, J., Pelle, H., Ondreas, H., Lourenco, N., Segonzac, M., Tivey, M.K., 1994. A detailed study of the Lucky Strike hydrothermal site and discovery of a new hydrothermal site: Menez Gwen; preliminary results of the DIVA1 Cruise (5 –29 May, 1994). *InterRidge News* 3, 14–19.
- Fouquet, Y., Charlou, J.-L., Ondreas, H., Radford-Knoery, J., Donval, J.-P., Douville, E., Apprioual, R., Cambon, P., Pellé, H., Landuré, J.Y., Normand, A., Poncevera, E., German, C., Parson, L., Barriga, F.J.A.S., Costa, I.M.A., Relvas, J.M.R., Ribeiro, A., 1997. Discovery and first submersible investigations on the Rainbow hydrothermal field on the MAR (36° 14N). *Eos Transactions American Geophysical Union* 78.
- Galley, A.G., Hannington, M., Jonasson, I.R., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits, in: Goodfellow, W.D. (Ed.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Ottawa, Canada, pp. 141-161.
- Geological Society of London, 2011. *Rare Earth Elements: A briefing note by the Geological Society of London*.

Gjerde, K.M., Weaver, P., Billett, D., Paterson, G., Colaco, A., Dale, A., Greinert, J., Hauton, C., Jansen, F., Jones, D., Martinez Arbizu, P., Murphy, K., Sweetman, A., 2016. Managing Impacts of Deep Sea Resource Exploitation: Implications of MIDAS results for policy makers: recommendations for future regulations, in: European Union (Ed.).

Gonçalves, E.J., Barriga, F.J.A.S., Gonçalves, M.E., 2015. Um Património Comum Para o Futuro/A Common Heritage For the Future, in: Ruivo, M. (Ed.), Do Mar Oceano ao Mar Português/From the Mar Oceano to the Portuguese Sea, pp 28-83. . CTT/Centro Nacional de Cultura, p. 252.

Hannington, M., Petersen, S., Krättschell, A., 2017. Subsea mining moves closer to shore. *Nature Geoscience* 10, 158.

Hannington, M.D., 2013. The role of black smokers in the Cu mass balance of the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 374, 215-226.

Hein, J.R., Koschinsky, A., 2014. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules, *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, pp. 273-291.

Hein, J.R., Koschinsky, A., Mikesell, M., Mizell, K., Glenn, R.C., Wood, R., 2016. Marine Phosphorites as Potential Resources for Heavy Rare Earth Elements and Yttrium. *Minerals* 6.

Hein, J.R., Mizell, K., Koschinsky, A., Conrad, T.A., 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews* 51, 1-14.

Hein, J.R., Spinardi, F., Okamoto, N., Mizell, K., Thorburn, D., Tawake, A., 2015. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions. *Ore Geology Reviews* 68, 97-116.

Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T., Iwamori, H., 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience* 4, 535-539.

Kuhn, T., Wegorzewski, A., Rühlemann, C., Vink, A., 2017. Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules, in: Sharma, R. (Ed.), *Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer International Publishing, Cham, pp. 23-63.

Langmuir, C., Chorion, J.L., Colodner, D., Corey, S., Costa, I., Desbruyeres, D., Desonie, D., Emerson, T., Fornari, D., Fouquet, Y., Humphris, S., Fiala-Medioni, A., Saldanha, L., Sours-Page, R., Thatcher, M., Tivey, M.K., Van Dover, C., Von Damm, K., Wiese, K., Wilson, C., 1993. Lucky Strike — A Newly Discovered Hydrothermal Site on the Azores Platform. *RIDGE events* November 1993, 3-4.

Markels, M., Barber, R.T., 2001. Sequestration of CO₂ by Ocean Fertilization, 1st National Conference on Carbon Sequestration, Washington, D.C.

Marques, A.F.A., Barriga, F.J.A.S., Scott, S.D., 2007. Sulfide mineralization in an ultramafic-rock hosted seafloor hydrothermal system: From serpentinization to the formation of Cu-Zn-(Co)-rich massive sulfides. *Mar Geol* 245, 20-39.

Matter, J.M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E.H., Gislason, S.R., Aradóttir, E.S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H.A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Taya, D.F.d.I.R., Hall, J., Dideriksen, K., Broecker, W.S., 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352, 1312.

Menendez, A., James, R.H., Roberts, S., Peel, K., Connelly, D., 2017. Controls on the distribution of rare earth elements in deep-sea sediments in the North Atlantic Ocean. *Ore Geology Reviews* 87, 100-113.

Minerals Education Coalition, 2018.

Minerals USGS gov, 2018. Commodity Statistics and Information.

- Muiños, S.B., Hein, J.R., Frank, M., Monteiro, J.H., Gaspar, L., Conrad, T., Pereira, H.G., Abrantes, F., 2013. Deep-sea Fe-Mn Crusts from the Northeast Atlantic Ocean: Composition and Resource Considerations. *Marine Georesources & Geotechnology* 31, 40-70.
- Murray, J., 1895. A summary of the scientific results obtained at the sounding, dredging and trawling stations of HMS Challenger. HM Stationery Office.
- Murray, J., Irvine, R., 1895. XXXII.—On the Manganese Oxides and Manganese Nodules in Marine Deposits. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 37, 721-742.
- Nature Geo, 2009. Editorial: Saved by sequestration? *Nature Geoscience* 2, 809.
- Oftedahl, C., 1958. A Theory of Exhalative-Sedimentary Ores. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 80, 1-19.
- Pattan, J.N., Parthiban, G., 2007. Do manganese nodules grow or dissolve after burial? Results from the Central Indian Ocean Basin. *Journal of Asian Earth Sciences* 30, 696-705.
- Petersen, S., Hannington, M., Monecke, T., Jamieson, J., 2015. Seafloor massive sulfides as a potential future metal resource: should we care?, From "Seafloor Hydrothermal Systems to the Sustainable Exploitation of Massive Sulfide Deposits". Centre for Geobiology, Bergen, Norway.
- Petersen, S., Krätschell, A., Augustin, N., Jamieson, J., Hein, J.R., Hannington, M.D., 2016. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy* 70, 175-187.
- Relvas, J.M.R.S., Pinto, A., Carvalho, J.R.S., Rosa, C.J.P., Barriga, F.J.A.S., Pacheco, N., Noiva, P.C., 2014. Shallow sub-seafloor replacement at the Neves Corvo deposit. *Comunicações Geológicas* 101, 841-843.
- Ribeiro, L.P., Madureira, P., Martins, S., Hildenbrand, A., Mata, J., 2018. The Importance of Geochemistry in the Project for the Extension of the Continental Shelf of Portugal: The Case of the Southern Azores Seamount Chain.
- Ribeiro, L.P., Martins, S., Hildenbrand, A., Madureira, P., Mata, J., 2017. The genetic link between the Azores Archipelago and the Southern Azores Seamount Chain (SASC): The elemental, isotopic and chronological evidences. *Lithos* 294-295, 133-146.
- Singer, D.A., 2014. Base and precious metal resources in seafloor massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews* 59, 66-72.
- Slack, J.F., Kimball, B.E., Shedd, K.B., 2017. Cobalt, in: Schulz, K.J., DeYoung, J.J.H., Seal, R.R., Bradley, D.C. (Eds.), *Professional Paper*, Reston, VA, p. 52.
- Takaya, Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., Nakamura, K., Kimura, J.-I., Chang, Q., Hamada, M., Dodbiba, G., Nozaki, T., Iijima, K., Morisawa, T., Kuwahara, T., Ishida, Y., Ichimura, T., Kitazume, M., Fujita, T., Kato, Y., 2018. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Scientific Reports* 8, 5763.
- US Geological Survey, 2018. US Geological Survey.
- USDOE, 2011. US Department of Energy 2011 Critical Materials Strategy Report.
- Vanreusel, A., Hilario, A., Ribeiro, P.A., Menot, L., Arbizu, P.M., 2016. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Scientific Reports* 6, 26808.
- von Stackelberg, U., 2000. Manganese nodules of the Peru basin, in: Cronan, D.S. (Ed.), *Handbook of marine mineral deposits*. CRC Press, Boca Raton, pp. 197-238.
- Vulcan, T., 2011. Hafnium: Small Supply, Big Applications.
- Wheeler, A.J., Murton, B.J., Copley, J., Lim, A., Carlsson, J., Collins, P., Dorschel, B., Green, D., Judge, M., Nye, V., Benzie, J., Antoniacomi, A., Coughlan, M., Morris, K., 2013. Moytirra: Discovery of the first known

deep-sea hydrothermal vent field on the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge north of the Azores. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14, 4170-4184.

Wijk, J.M., 2018. Public Report Blue Mining Breathrough Solutions for Mineral Extraction and Processing in extreme Environments 2014-2018, p. 30.

Wikipedia, 2018. Cobalt.

WTO, 2012. World Trade Organisation Dispute Settlement Mechanism 435.

Yamazaki, T., 2018. Sulfide Mining Test, Japan.

Yamazaki, T., Park, S.H., Shimada, S., Yamamoto, T., 2002. Development of Technical and Economical Examination Method for Cobalt-Rich Manganese Crusts, in: *The International Society for Offshore and and Polar Engineers (Ed.), The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan.

Yasukawa, K., Liu, H., Fujinaga, K., Machida, S., Haraguchi, S., Ishii, T., Nakamura, K., Kato, Y., 2014. Geochemistry and mineralogy of REY-rich mud in the eastern Indian Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences* 93, 25-36.

Zhang, X., Tao, C., Shi, X., Li, H., Huang, M.U., Huang, D., 2017. Geochemical characteristics of REY-rich pelagic sediments from the GC02 in central Indian Ocean Basin. *Journal of Rare Earths* 35, 1047-1058