

3.2) Yacimientos sedimentarios de nódulos y costras de Mn-polimetálicas

- Génesis y características geológicas
- Yacimientos
- Métodos de exploración y explotación

Los nódulos de manganeso oceánicos (Fig. 1 y fotos) fueron descubiertos en 1.868 en el mar de Kara (Rusia) y, posteriormente, en 1873-76 al sur de la isla canaria de El Hierro por la famosa expedición Challenger. Por su parte, las costras de Mn fueron se encontraron en 1982 en campañas oceanográficas en las islas Hawai.

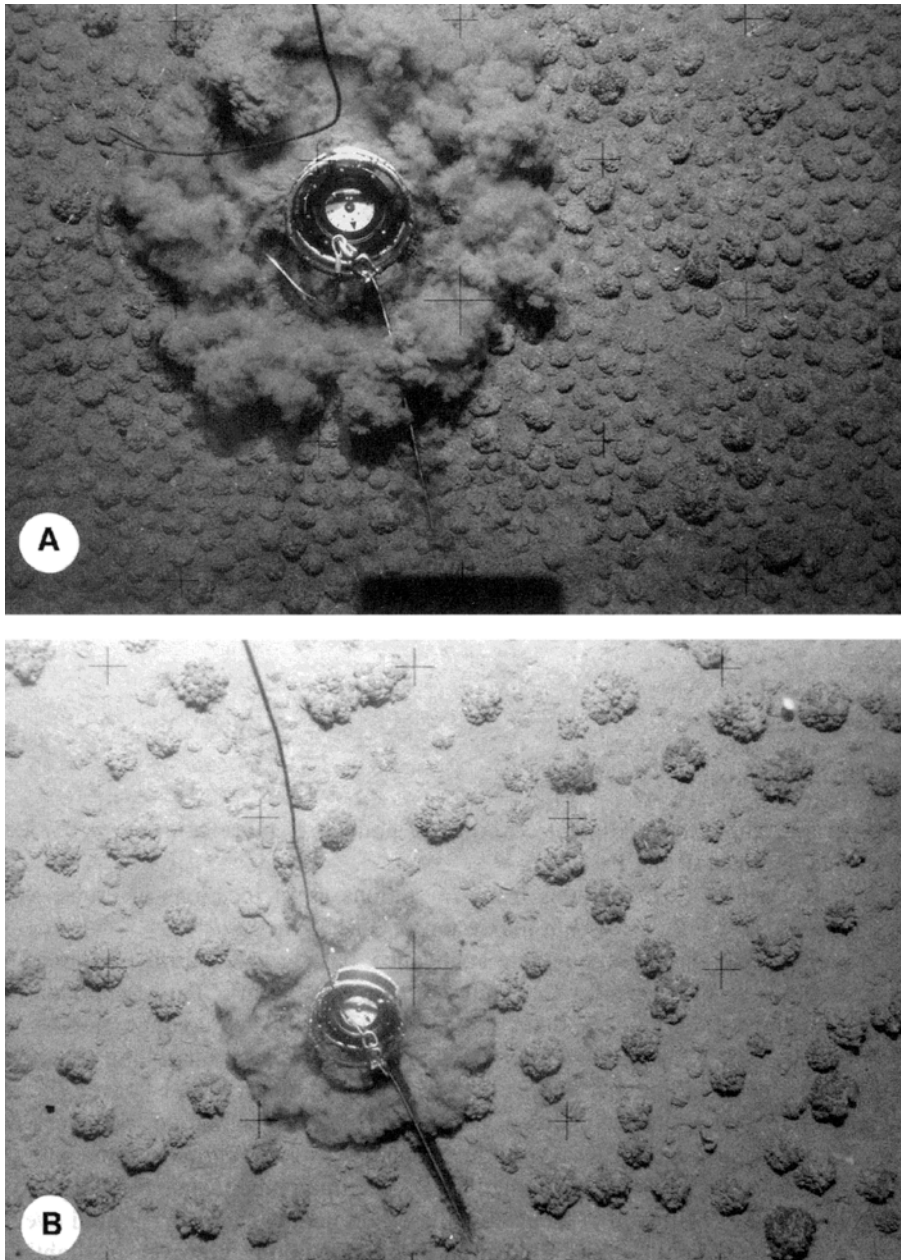
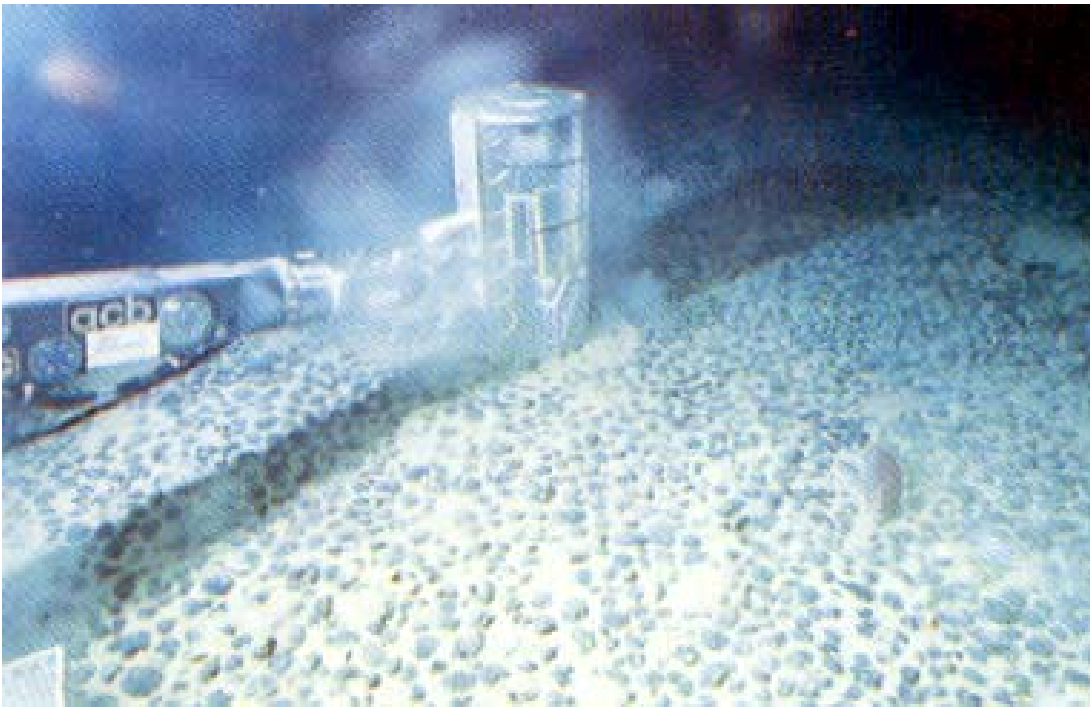
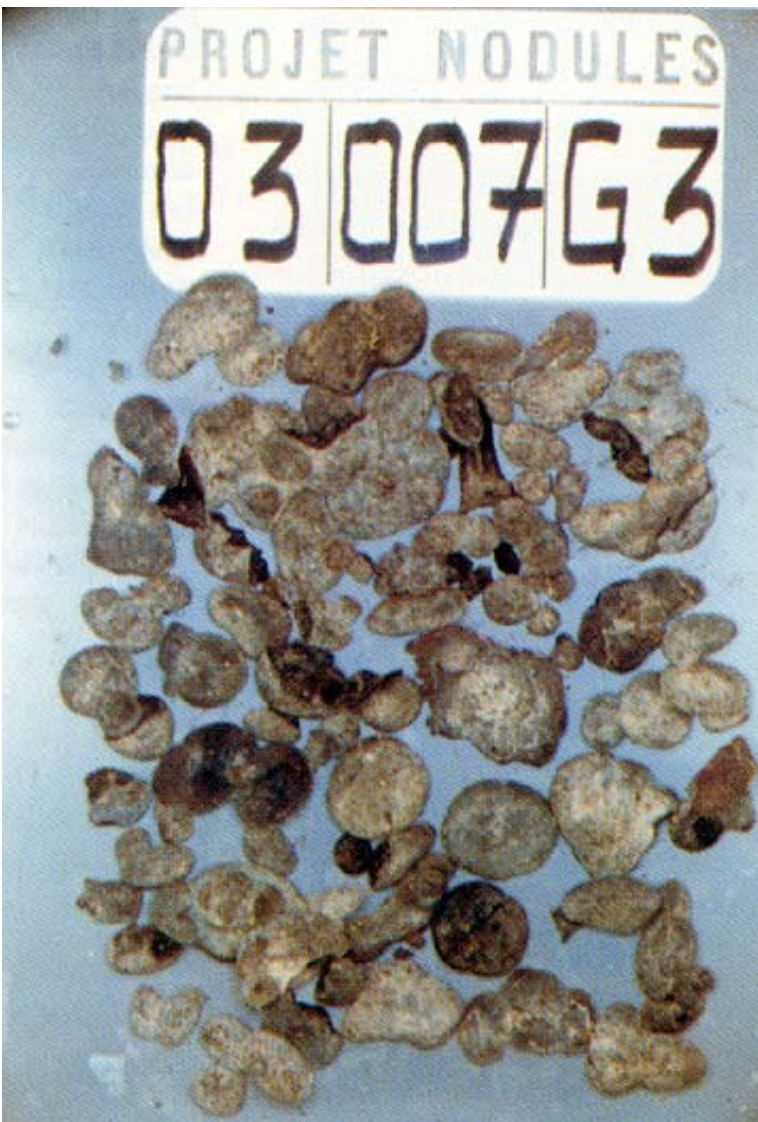


Fig. 1. Fotografía del fondo marino con nódulos de Mn en la cuenca de Perú. A) gran densidad de nódulos de 5 cm de diámetro a 4.030 m. de profundidad en el área SPN, B) menos densidad de nódulos de tamaño mediano (15 cm) a 4.090 m. en el área SPS (Cronan, 1999)



Fotos de nódulos en el fondo marino y muestras recogidas



Los nódulos y costras de manganeso son depósitos hidrogenéticos (precipitación mineral a partir del agua de mar) (Figs. 1 y 2 y fotos) y diagenéticos (precipitación mineral a partir de fluidos intrasedimentarios en los procesos de compactación y litificación de sedimentos). Los nódulos muestran formas concéntricas a partir de un núcleo de precipitación (Fig. 3) y las costras son bandas que se disponen sobre diversas superficies del fondo marino (Fig. 4). Ambos están constituidos principalmente por óxidos e hidróxidos de manganeso (Todorokita y Vernardita: $\delta\text{-MnO}_2$) y hierro (Feroxyhyta: $\delta\text{-FeOOH} \cdot x \text{H}_2\text{O}$), aunque contienen cantidades significativas y variables de otros metales como el cobre, níquel, cobalto, etc. (Tabla 1). Tanto los nódulos como las costras representan unos recursos importantes de metales como Mn, Fe, Ni, Cu, Co, Mo y, en menor proporción, Zn, Ti, Pb, REE, Pt, As, etc. Las costras suelen tener más Co y, menos Fe y Mn que los nódulos.

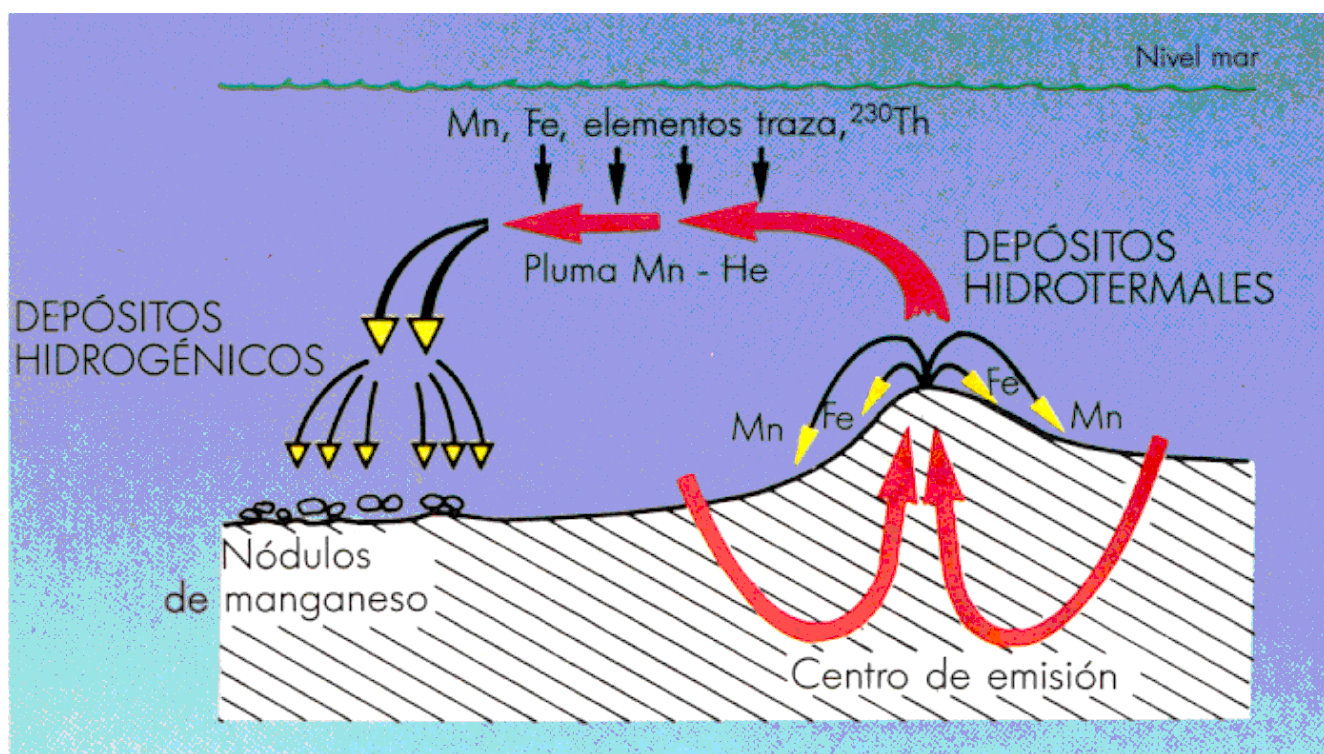


Fig. 2 Modelo hidrogenético de los nódulos de ferromanganeso con fuente magmática de metales (Martínez y Lunar, 1992)

En líneas generales el origen de los componentes metálicos de estos materiales proviene de la actividad magmática del océano (Fig. 2), de los aportes de elementos químicos provenientes de aguas y vientos continentales y de componentes químicos contenidos en los organismos marinos, los cuales son liberados al morir y descomponerse. Así, más de diez millones de m^3 de óxidos e hidróxidos de Mn, Fe, Ni, Cu, Co, etc., que se encuentran disueltos en el agua marina, precipitan todos los años sobre los nódulos y costras manganésíferas de los fondos oceánicos.

La morfología de los nódulos de Mn varía de redondeada a elipsoidal o completamente irregular (Figs. 3 y 4) y su morfología depende del tipo de precipitación mineral (hidrogenética o diagenética), de la forma del núcleo de precipitación (rocas ígneas, restos orgánicos, pedazos de nódulos preexistentes o cualquier otro objeto sólido del fondo) y de los procesos de deformación frágil (fracturación) que sufren durante su formación. Por otra parte, la naturaleza del núcleo influye en los procesos de precipitación pues se ha comprobado que los de naturaleza más metálica son capaces de acumular capas más gruesas de óxidos de manganeso que los nódulos en núcleos formados por materiales no metálicos (por ejemplo, restos orgánicos).

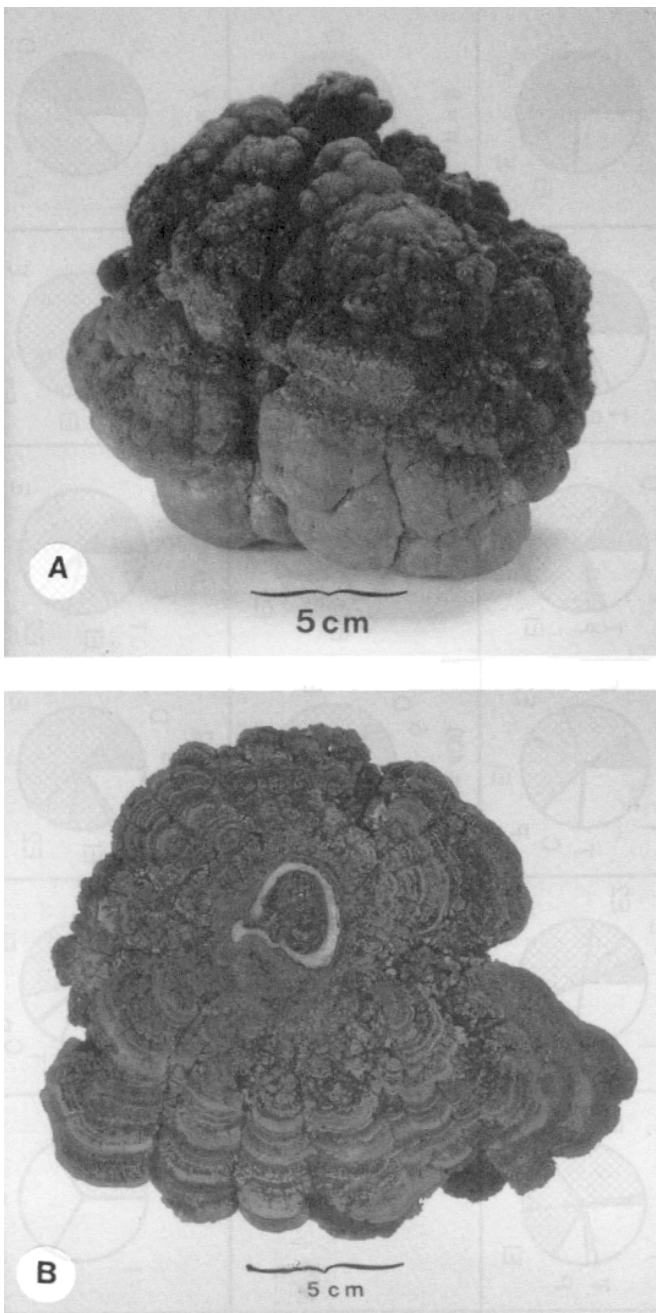


Fig. 3. Aspecto de dos nódulos de manganeso de la zona de Clarion y Clipperton en el Pacífico (la escala es en centímetros) con núcleo sedimentario a la derecha y magmático a la izquierda. Cronan, 2000

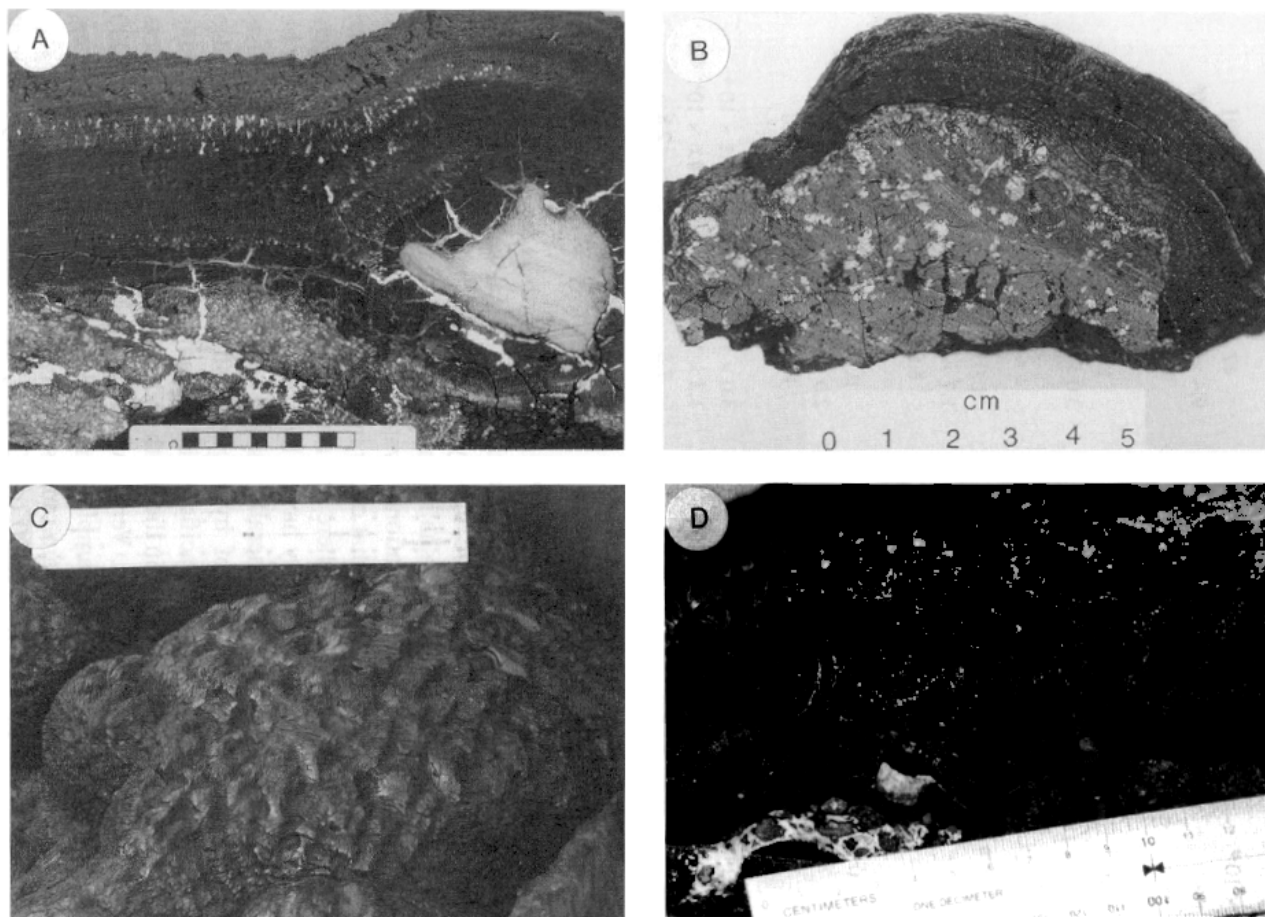


FIGURE 9.1 (A) 180-mm-thick hydrogenetic Fe–Mn crust from Lomilik Seamount, Marshall Islands, which grew on a phosphatized hyaloclastite substrate and contains fractures filled with CFA; distinct growth layers can be seen, some of which are very porous, with pores and vugs filled with either carbonate sediment or CFA. (B) Mixed hydrothermal–hydrogenetic Fe–Mn crust from Gorda Ridge, northeast Pacific; the crust shows distinct growth layers and Fe-rich laminae near the base; the substrate is amygdaloidal basalt. (C) Current polished and fluted surface of a botryoidal Fe–Mn crust from the Marshall Islands, water depth 2,090 m. (D) Same crust as in (C) showing 30- to 50-mm-tall columns in a 40- to 50-mm-thick crust; note that the columns are separated by detrital-rich material (pale gray). Scales are in centimeters.

Fig. 4. Aspecto de una roca volcánica oceánica recubierta por costras de manganeso de zonas sumergidas de las islas Hawai (la escala es en centímetros). Cronan, 2000

La tasa de crecimiento de los nódulos puede ser determinada datando por métodos radiogénicos las distintas capas concéntricas que aparecen desde el núcleo hasta el exterior. Las dataciones geocronológicas confirman que crecen unos pocos milímetros por cada millón de años y, en general, los nódulos diagenéticos crecen más rápido que los hidrogenéticos. Como evidencia de lo anterior, están la gran cantidad de nódulos de forma irregular en la que su superficie superior (parte hidrogenética ya que recibe metales de la precipitación directa del agua) ha crecido menos o más lentamente que la superficie inferior (zona diagenética y que está en contacto con los sedimentos subyacentes) (Fig. 5). Además, se ha comprobado que existen dos factores que influyen en la velocidad de crecimiento de los nódulos: la tasa de suministro de elementos y los procesos catalíticos en la superficie de precipitación. Si se diese un escenario en el cual existe una alta tasa de aporte de elementos (por ejemplo, actividad volcánica submarina próxima, fuente diagenética importante debido a la composición de sedimentos, Fig. 2), entonces se

produce una rápida precipitación de óxidos polimetálicos. En el caso opuesto, como suele suceder en el fondo marino, predominan los procesos hidrogenéticos de carácter más lento.

a) Pacific Ocean (Cronan and Tooms, 1969)

	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Pb	Zn
Todorokite	19.53	9.07	0.985	0.172	0.562	0.033	
δMnO_2	15.30	13.78	0.390	0.790	0.107	0.115	

(b) Atlantic Ocean (Cronan, 1975b)

	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Pb	Zn
Todorokite	19.85	16.39	0.62	0.29	0.17		0.09
δMnO_2	17.35	21.45	0.26	0.47	0.078		0.073

(c) Indian Ocean (Cronan and Moorby, in preparation)

	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Pb	Zn
Todorokite	20.0	9.5	0.844	0.130	0.689	0.076	0.103
δMnO_2	14.7	19.3	0.250	0.360	0.079	0.142	0.054

Tabla 1. Concentración de metales en distintos minerales que constituyen nódulos de Mn polimetálicos en distintos océanos (Cronan, 2000)

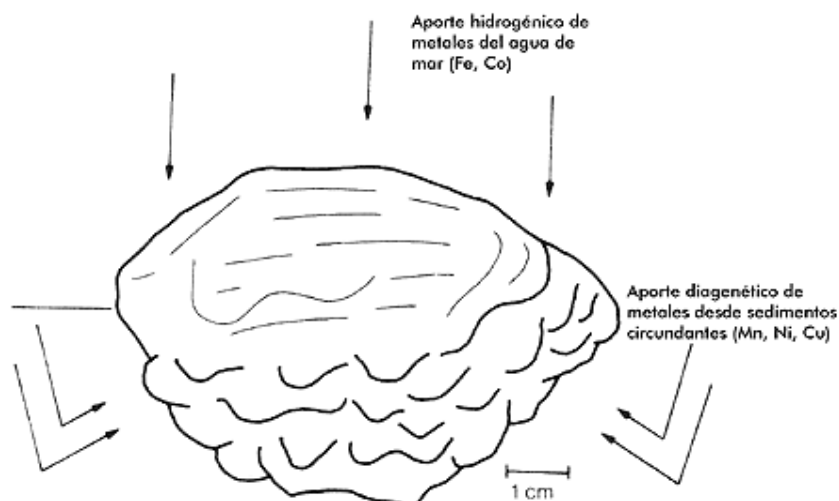


Fig. 5. Esquema de un nódulo de Mn con morfología y composición diferentes en la parte superior e inferior. Cronan, 2000

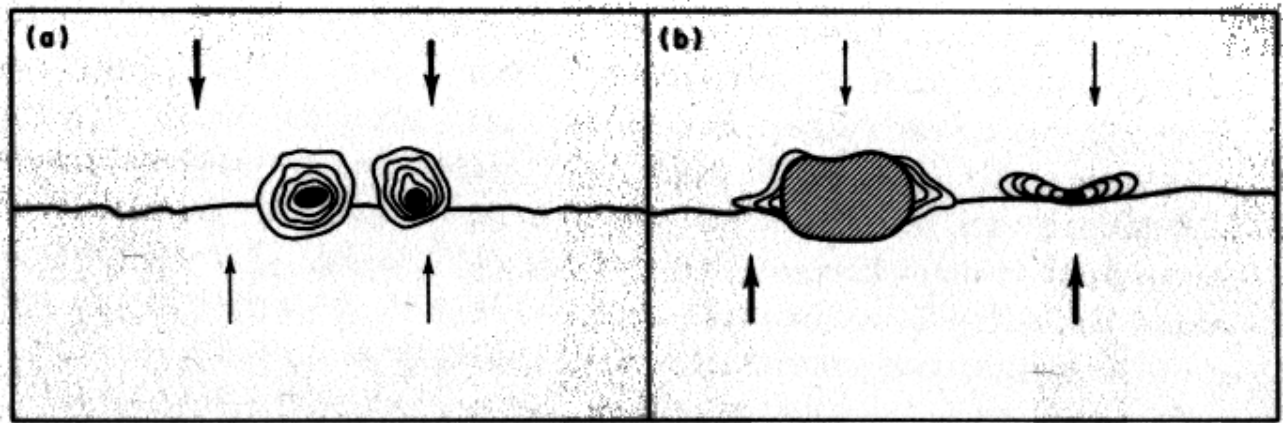


Fig. 31. Morphology of ferromanganese oxide concretions as a function of metal supply: (a) dominant supply from sea water; (b) dominant supply from interstitial water (from Manheim, 1965).

La distribución de los nódulos de Mn está relacionada con las tasas de sedimentación, las cuales están controladas por el suministro de sedimentos y por las corrientes marinas del fondo. En general, se cumple que donde la sedimentación es rápida, los nódulos de Mn son escasos. Esto se debe a que los sedimentos entierran los núcleos de los nódulos antes de que estos crezcan hasta un tamaño apreciable. Cuando las tasas de sedimentación son bajas, los nódulos suelen ser abundantes. Otros factores que afectan la abundancia y distribución de los nódulos son la presencia o ausencia de núcleos aptos para el inicio del crecimiento de los nódulos, el tiempo de precipitación y por supuesto, como hemos comentado anteriormente, su proximidad a las fuentes de suministro de metales.

La distribución de los nódulos de manganeso en los océanos es muy variable (Fig. 6). Así, en el océano Atlántico la concentración de nódulos de Mn es menor que en el Pacífico y el Índico, probablemente a causa de su más alta tasa de sedimentación. La mayor abundancia de nódulos tiene lugar en las cuencas abisales a cada lado de la dorsal mediooceánica, donde la sedimentación es baja, y también en las zonas de corrientes circumpolares.

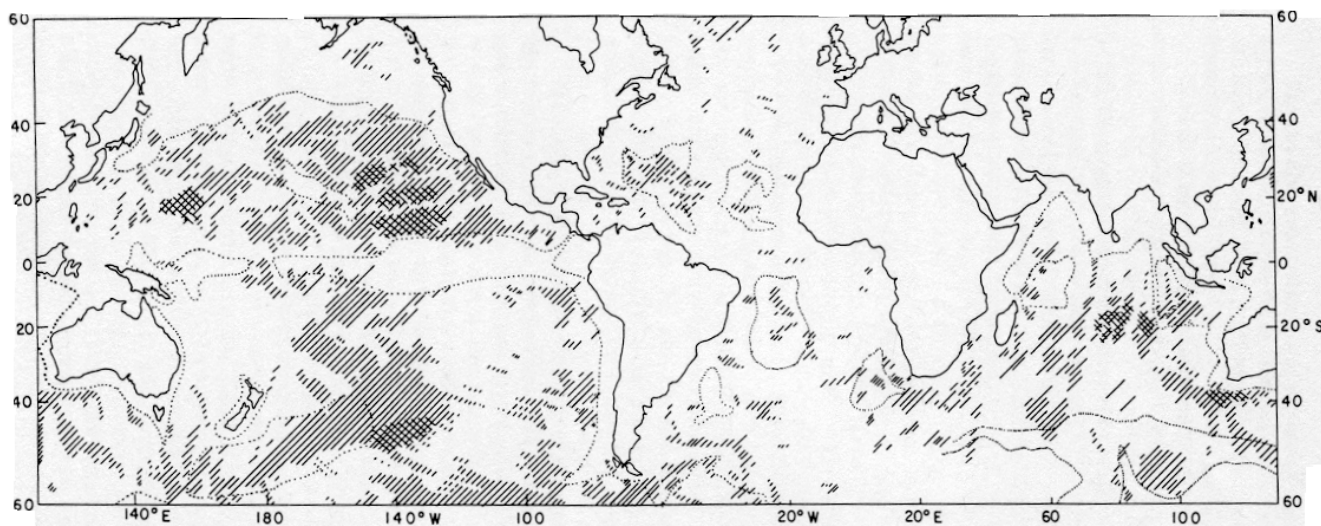


Fig. 6. Distribución mundial de los nódulos de Mn en los océanos. Las zonas con rayas cruzadas tienen mayor abundancia en nódulos (Roonwal, 1986)

En el océano Índico los nódulos son más abundantes al sur del ecuador, en las cuencas al este y al oeste de la dorsal de los 90°E (Fig. 37). Algunas de las áreas que presentan mayor abundancia de nódulos son la cuenca central india, la cuenca sur y oeste australiana y la cuenca de Madagascar-Mozambique.

En el océano Pacífico, los nódulos son bastante abundantes, especialmente en una zona comprendida entre los 6° N y los 20° N, desde los 120° W hasta los 160° W, entre las fracturas transformantes de Clarion y Clipperton (CCZ) (Fig. 6). Existen ya concesiones mineras en la CCZ y pertenecen esencialmente a países del grupo G7 (Japón, USA, Canadá, Francia, Italia, Alemania y Reino Unido) y a otros países como Rusia, Corea, China y un consorcio de países del Este. Esta zona se extiende unos 9 millones de Km², aparecen más de 10 kg/m² de nódulos de Mn por lo que contienen 34 billones de Tm de nódulos, lo que supone unos recursos de 750.000 millones de Tm de Mn, 340 de Ni, 265 de Cu y 78 de Co. En el Pacífico sur, la distribución de nódulos es más irregular debida posiblemente a su mayor diversidad topográfica y a la abundancia de islas oceánicas.

Con relación a las costras de Mn, estas contienen igualmente óxidos de manganeso, hierro y otros metales como cobalto, platino, cobre, etc. y aparecen generalmente en las laderas y cumbres de las montañas submarinas (seamounts) e islas oceánicas, y en las dorsales mediooceánicas y los plateaux oceánicos (Fig. 7). Las costras de Mn se localizan a profundidades entre 400 y 4500 m., aunque las más potentes se sitúan entre 800 y 2.500 m.

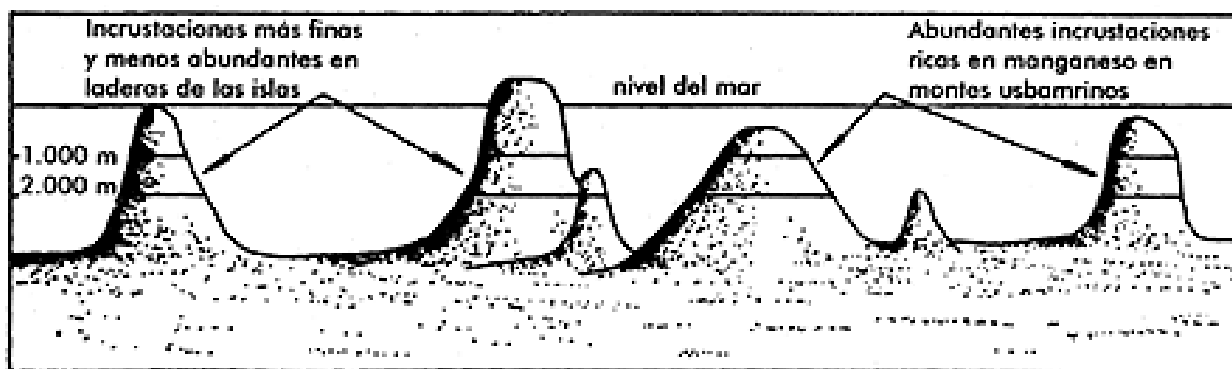


Fig. 7. Distribución de las costras de Mn en montañas e islas oceánicas (Cronan, 1980)

La velocidad de crecimiento de las costras de Mn se estima entre 1 y 10 mm por millón de años. Con relación a la tasa de crecimiento, cuanto más lenta sea esta, mayor será el contenido de cobalto en la incrustación. El grosor medio de las costras es de unos 2,5 mm pero puede alcanzar 250 mm (Fig. 4), mostrando a menudo varias bandas que corresponden con distintos periodos de crecimiento. Al igual que en los nódulos de Mn la potencia de las costras están relacionadas con la tasa de sedimentación. Así, las costras tienden a formarse cuando la sedimentación es nula o muy baja. Es por ello que este tipo de depósitos se localiza en las laderas o cumbres de las montañas submarinas e islas, libres de sedimentación, no obstante la erosión y los desplomes en estos edificios volcánicos pueden destruir las costras, reduciendo así sus potencias. Otros factores que influyen en los grosores de las incrustaciones son el tiempo de crecimiento de estas y la velocidad a la que se han acumulado los óxidos polimetálicos.

La densidad de las costras secas es baja de unos 1,3 g/cc, tienen una porosidad del 60%, su superficie externa suele mostrar texturas botroidales (arriñonadas) y en el interior se observan texturas masivas, botroidales, laminadas y columnares. Mineralógicamente están compuestas de vernardita ($\delta\text{-MnO}_2$) e hidróxidos de Fe amorfos (feroxyhyta $\delta\text{-FeOOH} \cdot x \text{H}_2\text{O}$) y, en menor proporción, todorokita, francolita, cuarzo, esmectitas y feldespatos, y pueden tener adheridas partículas detríticas de otros minerales (cuarzo, carbonatos, zeolitas, etc.). Con la vernardita están asociados los otros metales como Co, Ni, Cr, Ti, Pt y Mo, y con los hidróxidos de Fe elementos como el As. La precipitación de óxidos e hidróxidos de Mn y Fe en las costras hidrogenéticas depende de la concentración de metales en el agua de mar y sus relaciones, la carga superficial de los coloides, los tipos de agentes de formación de complejos, área superficial y tasa de crecimiento. En general, hay una oxidación de Mn^{2+} y formación de distintos coloides con adsorción de metales diversos en suspensión y luego se alcanza la precipitación directa sobre el fondo marino en forma de óxidos e hidróxidos de Mn y otros metales (Fig. 8)

En los estudios de las costras de Mn ricas en cobalto de los océanos se ha comprobado que la distribución de las mismas está relacionada con la latitud, de manera

que la presencia y potencia de este tipo de materiales es mayor conforme nos acercamos al ecuador (en concreto, entre los 5° y 15° de latitud). De igual manera, las cantidades de cobalto y níquel también aumentan en dirección al ecuador.

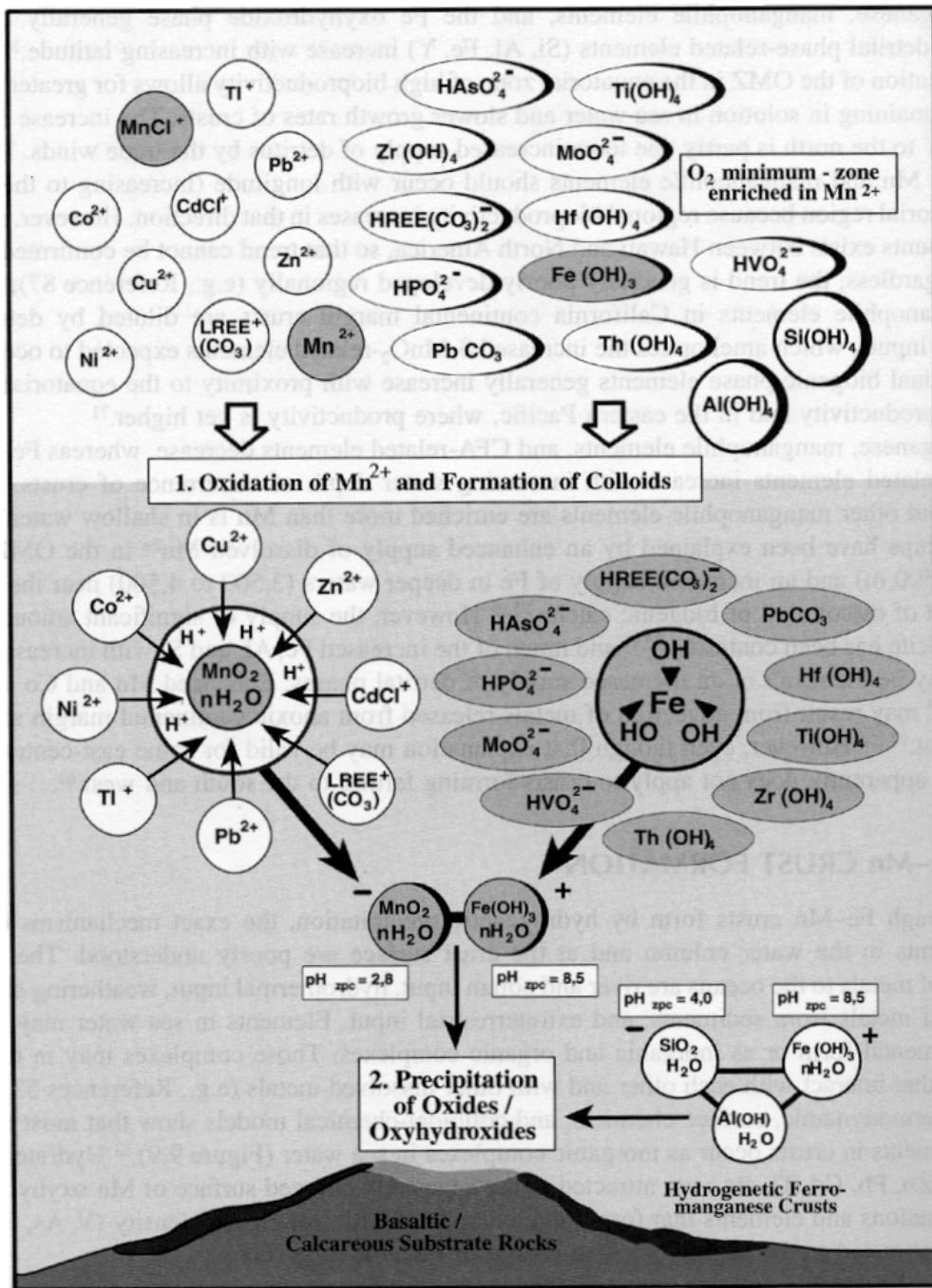


Fig. 8. Modelo de formación hidrogenético de costras de Mn en montañas submarinas mostrando la formación de complejos y fases coloidales y adsorción de metales. Zpc: pH en el punto cero de carga (Cronan, 1999)

YACIMIENTOS MINERALES (INDICIOS)

IFREMER

MARINE MINERAL OCCURRENCE

Occurrence
 Deposit **NAME: CLARION - CLIPPERTON**
 Deposit/File

Commodities: Mn Ni Cu Co **Type of deposit:** polymetallic nodules
Country: International Area **District:** Clarion Clipperton zone
Marine area: Pacific central north

ADMINISTRATION

- Territorial sea
 Continental Shelf
 Exclusive Economic Zone
 International Area

COORDINATES

Latitude	N	7.000
(Decimal °)	N	17.000
Longitude	W	115.000
	W	158.000
Z (in m)		-4 to 5,000

TYOLOGY

Zone type	abyssal hills
Morpho. 1	surface layer
Morpho. 2	nodules
Petrography	ferromanganese hydroxides
Mineralogy	birnessite todorokite dMnO2

STAGE

- Exploration:
 Mining:
 Processing:

MINING RIGHTS

- Free:
 Under control:
 Unknown:

Up-dated on: 3/3/95

Company:

	Ore	Heavy minerals	Commodities
Grades	Mn 30 Ni 1.4 Cu 1.2 Co 0.25 %		
Tonnage	200-500 Mt		

Description:

1) Between Hawaii and Clipperton Island. Bordered northward by Clarion fracture zone and southward by Clipperton fracture zone.
 2) Climate: Tropical, heavy rains, prevalent wind E to SE.
 3) Hydro: Sea sometimes rough, strong swell associated with E to SE trade winds.
 4) Works performed: Intensive surveys in the 1970's by 4 international consortia registered in USA (Kennecott Consortium, KCON; Ocean Mining Associates, OMA; Ocean Management Inc., OMI; Ocean Minerals Company, OMCO) and the french group AFERNOD. During the 1980's and 1990's five other groups investigated the area: 1) Deep Ocean Resources Development Co. Ltd, DORD, Japan; 2) Yuzhmorgeologiya, Russia; 3) Inter Ocean Metal, group of organisations from Bulgaria, Cuba, Czech Republic, Poland and Russia; 4) China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, COMRA, China People Republic; 5) KORDI, Korea.
 Works included exploration by bathymetry, acoustic profiling, side-scan sonar, multifrequency acoustic (nodule detection), bottom photography and television, sampling; mining system studies and trials at sea; processing tests. In 1994 2.5 Mkm² have been allocated to the above "pioneers" or reserved to the International Seabed Authority by the UN or by governments (USA, Germany, UK) in patches varying from 75,000 to 200,000 km².
 5) Characteristics of the deposit: The bottom topography (5,000 m) is formed by NS trending hills, several 10 km long, 2-5 km distant and 100-300 m high, often bordered by small 2-40 m cliffs. The sediment cover is a brown diatom ooze with low shear strength (5 kPa). Brown black nodules 5-10 cm wide are scattered on the ocean floor. Their abundance averages 5 kg/m² on the area, with "mineable fields" 2-5 km wide and 10-30 km long, with more than 15 kg/m². The nodules are formed by concentric layers of ferro-manganese hydroxides where nickel, copper and cobalt are disseminated inside the crystal network. A volcanic, clayey or phosphatic core is sometimes observed (low grade nodules). Chemical composition varies, but in large areas the grades are above Mn 25%, Ni and Cu 1%, Co 0.2%. Mining targets are 3,000 km² "mineable flat fields" scattered in several 10,000 km² with 30-40 Mt of nodules containing 30% Mn, 1.4% Ni, 1.2% Cu, 0.25% Co. At the present metal prices, mining will provide a very narrow margin.

References:

Lenoble J.P., 1994. The future of deep seabed mining: a changing economic and legal contingency. International advisory conference on deep seabed mining policy at KORDI (Seoul-Korea) 5-6/9/94.

IFREMER

MARINE MINERAL OCCURRENCE

Occurrence
 Deposit
 Deposit/File

NAME: INDIAN CENTRAL BASSIN

Commodities: Mn Ni Cu Co Type of deposit: polymetallic nodules
 Country: International Area District:

Marine area: Indian central bassin

ADMINISTRATION

- Territorial sea
 Continental Shelf
 Exclusive Economic Zone
 International Area

TYPOLGY

Zone type	abyssal hills
Morpho. 1	surface layer
Morpho. 2	nodules
Petrography	ferromanganese hydroxides
Mineralogy	birnessite todorokite dMnO2

COORDINATES

Latitude	S	-16.250
(Decimal °)	S	-10.000
Longitude	E	-81.750
	E	-72.750
Z (in m)		-4 to 5,000

MINING RIGHTS

Free:
 Under control:
 Unknown:

Up-dated on: 3/3/95

Company: AMP

	Ore	Heavy minerals	Commodities
Grades			
Tonnage			

Description:

- 1) South of the Indian peninsula and W of the Mid-indian Ridge.
- 2) Climate: Tropical, heavy rains, trade E to NE winds.
- 3) Hydro: Sea sometimes rough, strong swell associated with trade winds.
- 4) Works performed: Intensive surveys during the 1980's by several Indian institute coordinated by the Department of Ocean Development, DOD. Exploration continued in the 1990's with advanced methods (swath mapping) in order to delimit the best area. Works included exploration by bathymetry, acoustic profiling, bottom photography, sampling; mining system and process studies; processing tests. In 1987 150,000 km² were allocated to DOD that must be reduced to 75,000 km² in 1995 and 150,000 km² reserved for the International Seabed Authority by the UN.
- 5) Characteristics of the deposit: The bottom topography (5,000 m) is formed by NS trending hills, several 10 km long, 2-5 km distant and 100-300 m high. The sediment cover is mainly brown siliceous ooze with some strip of calcareous ooze. Brown black nodules 5-10 cm wide are scattered on the ocean floor. Their abundance averages 5-10 kg/m². The nodules are formed by concentric layers of ferro-manganese hydroxides where nickel, copper and cobalt are disseminated inside the crystal network. A volcanic, clayey or phosphatic core is sometimes observed (low grade nodules). Chemical composition varies, but in large areas the grades are above Mn 25%, Ni and Cu 1%, Co 0.2%.

References:

Scharma R. & Rao A., 1991. Environmental considerations of nodule mining in the central Indian basin. OTC 6554, 23rd Offshore Technology Conference (Houston-USA) 6-9/5/1991, 481-490.

MARINE MINERAL OCCURRENCE

Occurrence
 Deposit
 Deposit/File

NAME: PERU BASIN

Commodities: Mn Ni Cu Co	Type of deposit: polymetallic nodules
Country: International Area	District:

Marine area: Pacific SE, Peru basin

ADMINISTRATION

- Territorial sea
- Continental Shelf
- Exclusive Economic Zone
- International Area

TYOLOGY

Zone type	abyssal hills
Morpho. 1	surface layer
Morpho. 2	nodules
Petrography	ferromanganese hydroxydes
Mineralogy	birnessite todorokite dMnO2

COORDINATES

Latitude	S	-7.500
(Decimal °)	S	-11.000
Longitude	W	88.000
	W	93.000
Z (in m)		-4,000

STAGE

Exploration:
 Mining:
 Processing:

MINING RIGHTS

Free:
 Under control:
 Unknown:

Up-dated on: 3/3/95

Company: AMR

	Ore	Heavy minerals	Commodities
Grades			
Tonnage			

Description:

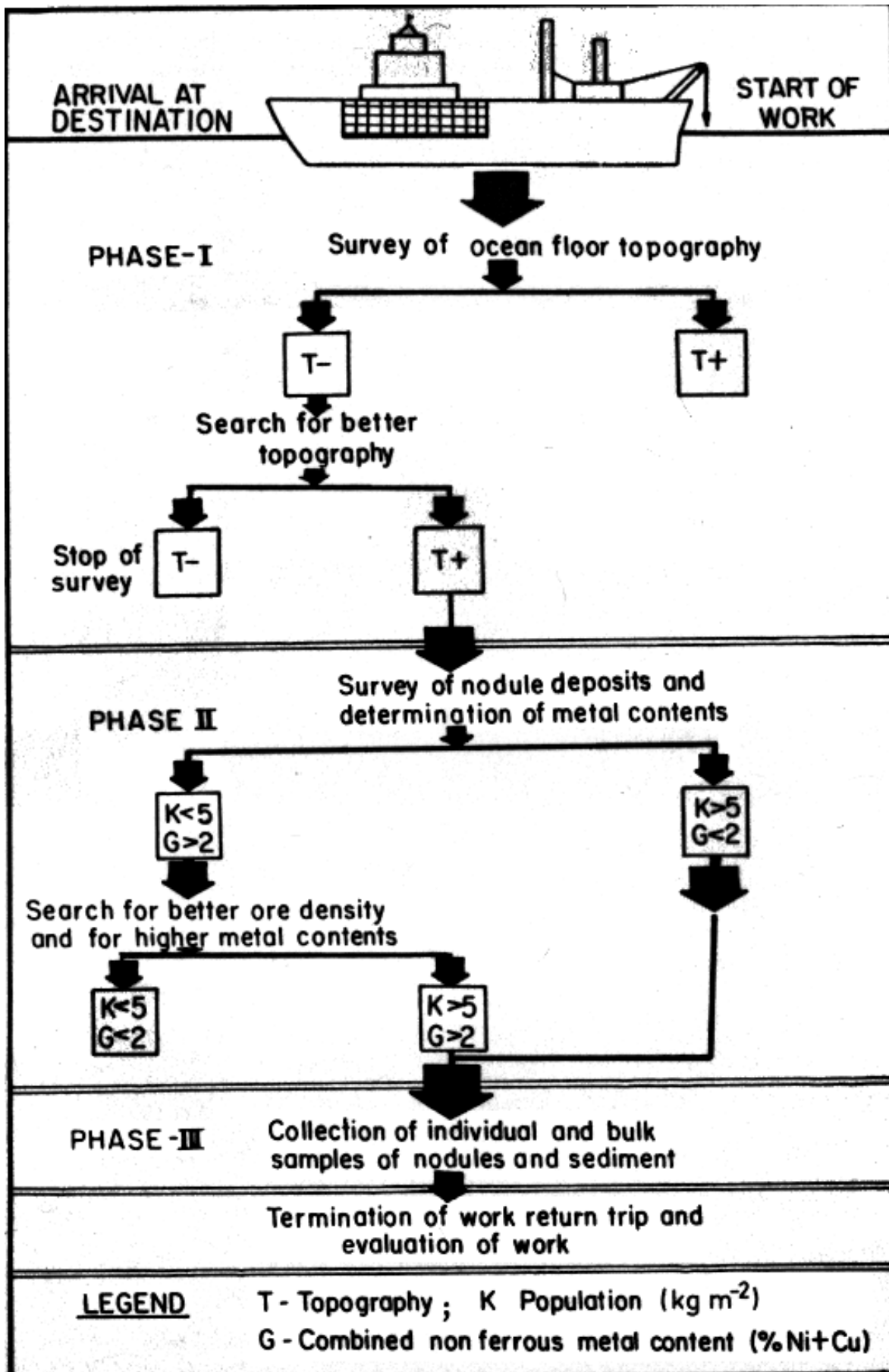
- 2) Climate: Tropical, heavy rains, trade winds.
- 3) Hydro: Sea sometimes rough, strong swell associated with trade winds.
- 4) Works performed: Exploration surveys during the 1980's by the German group Arbeitsgemeinschaft Meerestechnisch Gewinnbare Rohstoffe (AMR). Works included bathymetry, acoustic profiling, bottom photography and television, sampling. In the 1990's, environmental studies were carried on by Hamburg and Kiel Universities. In 1984 approx. 140,000 km² were allocated to AMR by the German government.
- 5) Characteristics of the deposit: Few information is available. The nodules appeared larger but more discarded than in the N Pacific area.

Achève d'impression
 au Centre IFRM-IBP de
 Atelier de reproduction
 dépôt légal, 1ère trimestre 1995

References:

Lenoble et al., 1995

EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS DE NÓDULOS DE Mn



MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE NÓDULOS DE Mn

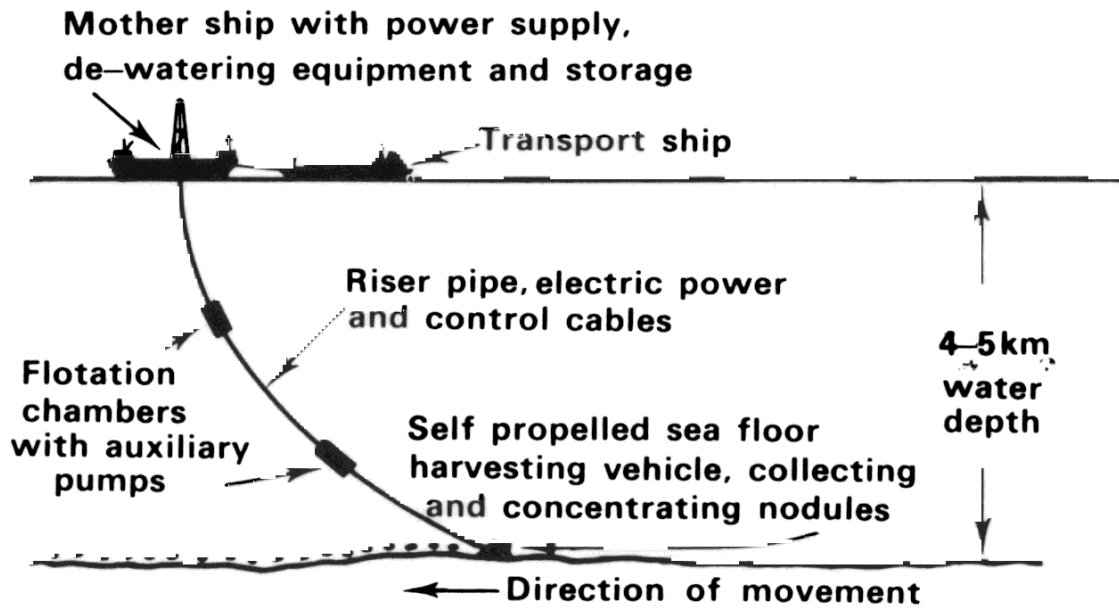
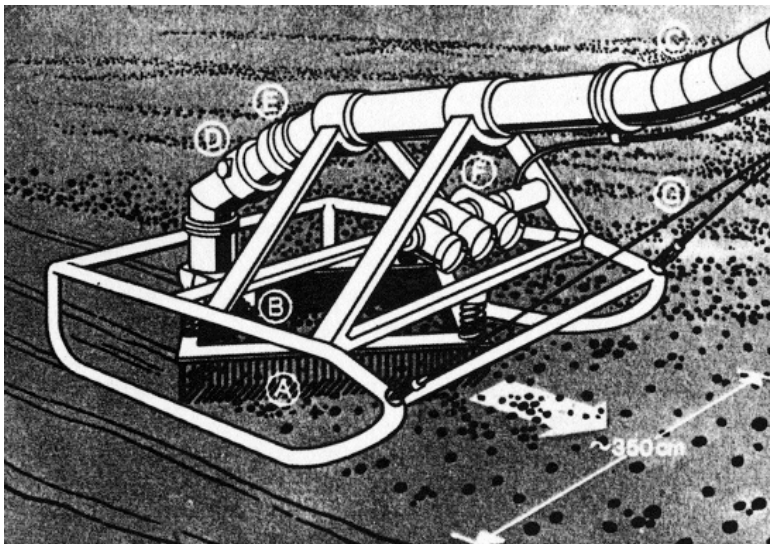
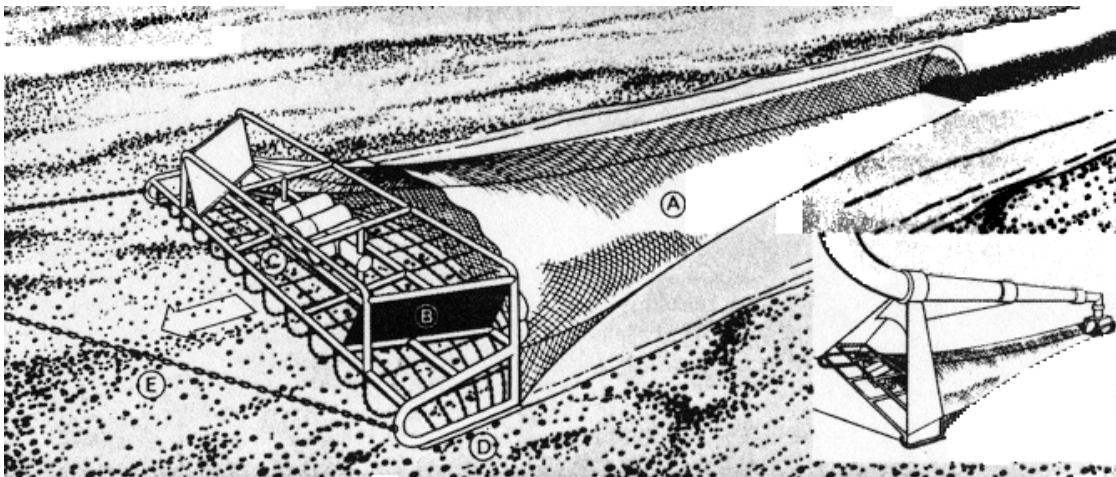
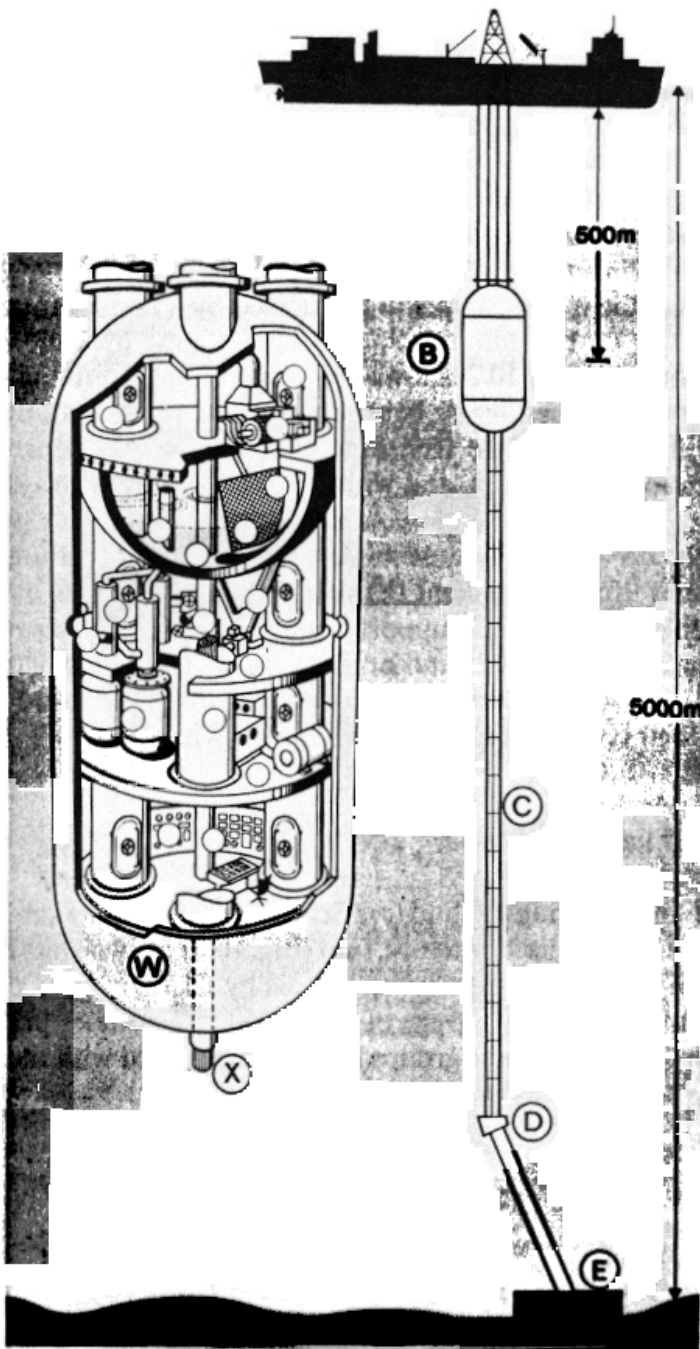
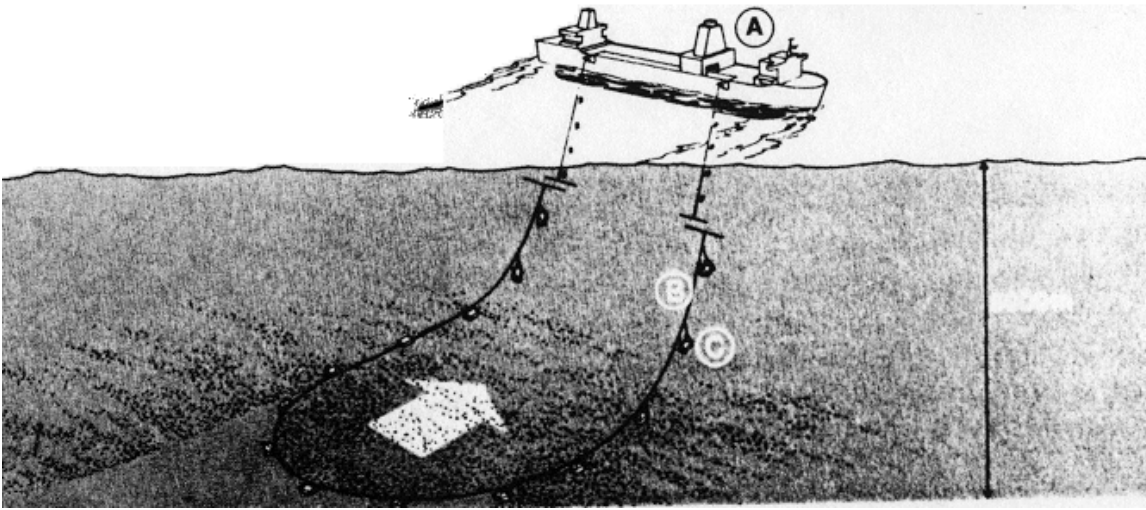


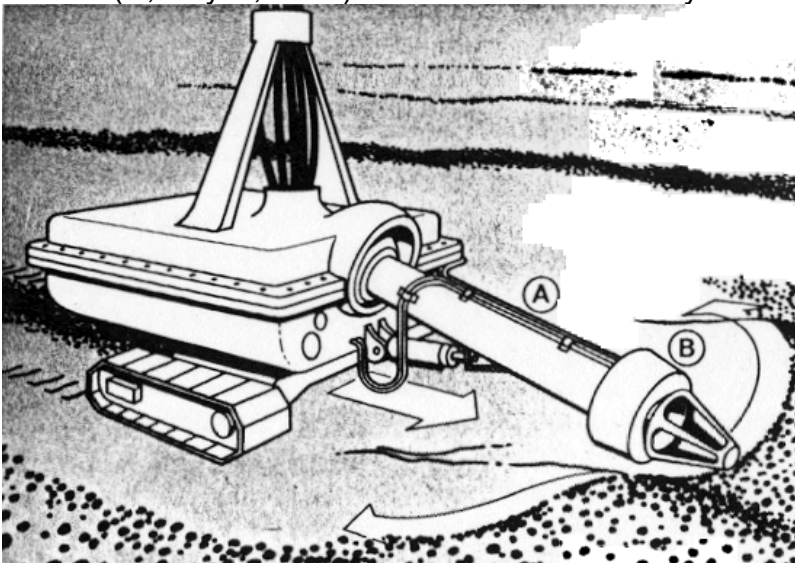
Fig. 5.1 Diagram illustrating the principle of deep ocean mining for metalliferous nodules.







Robots (D, Reyss, 1991). La Découverte des abysses. Explora. La Cité, Paris, 127 pp



MAJOR DIMENSIONS

Length : 13 m
Width : 8 m
Height : 6 m
Weight : 100 t
Installed Power : 900 KW

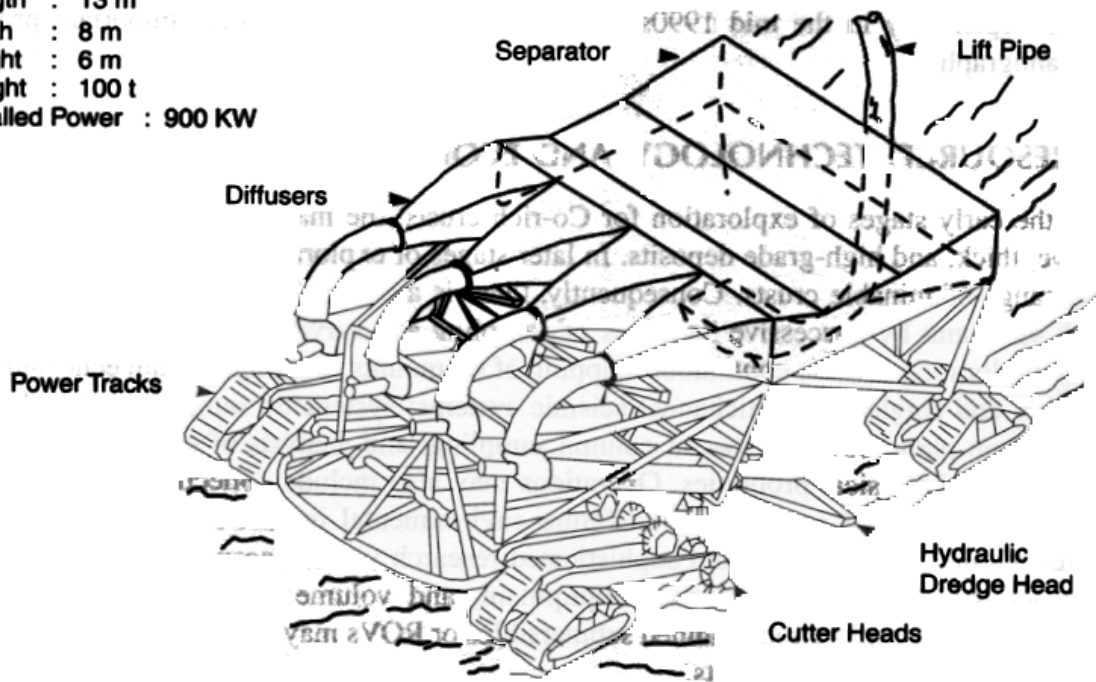


FIGURE 9.11 Schematic representation of a deep-sea mining vehicle for Fe-Mn crusts. (From DOI-MMS and DPED-State of Hawaii, Proposed marine mineral lease sale: Exclusive economic zone, adjacent to Hawaii and Johnston Island, Final Environmental Impact Statement, vols. I & II, 1990; designed by J. E. Halkyard, OTC Corporation).

Cronan, 2000