

## MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS, MODELOS DE DEPÓSITOS Y SISTEMAS MINERALES

### CRITICAL RAW MATTERS, DEPOSITS MODELS AND MINERAL SYSTEMS

 **JORGE LUIS TORRES ZAFRA\***,  **XIOMARA CAZAÑAS DÍAZ**

*Instituto de Geología y Paleontología, Cuba, Vía Blanca No. 1002 y Carretera Central. San Miguel del Padrón CP 11 000, La Habana, Cuba.  
Correo-e: [dprospección@igp.minem.cu](mailto:dprospección@igp.minem.cu)*

*\*Correo-e: [zafra@igp.minem.cu](mailto:zafra@igp.minem.cu)*

**RESUMEN:** Las materias primas críticas, o minerales críticos, constituyen un conjunto de materias primas de creciente importancia para la economía y la sociedad a escala mundial. Se obtienen del subsuelo como resultado de la exploración geológica y la minería. Por ello, es importante mostrar el vínculo existente entre ellas, los tipos de depósitos minerales donde se encuentran y los sistemas minerales de los cuales estos últimos forman parte. El trabajo persigue el objetivo de presentar los principales sistemas minerales portadores de materias primas críticas en Cuba y su distribución espacial en el territorio nacional. Como resultado de la búsqueda bibliográfica, la sistematización y la generalización de la información recopilada sobre materias primas críticas, se presenta un listado generalizado de las mismas y algunos hechos básicos relacionados con el concepto de materia prima crítica. Se expone la relación entre geología de los minerales críticos y la cadena de suministro, y se muestra cómo ellos se distribuyen por modelos de depósitos minerales y por sistemas minerales a escala mundial. En este contexto, se exponen los principales sistemas minerales portadores de los mismos en Cuba, así como su ubicación dentro del país. Se concluye que la distribución de los recursos geológicos (evaluados y potenciales por descubrir) de materias primas críticas en Cuba se concentran en cuatro sistemas minerales. De ellos, el más перспекivo, por la magnitud de su riqueza en recursos de mena, es el sistema mineral supergénico, portador de Ni, Co, Sc, Cr, EGP y ETR.

**Palabras clave:** materia prima crítica, mineral crítico, modelo de depósito, sistema mineral.

**ABSTRACT:** Critical raw materials, or critical minerals, constitute a set of raw materials of increasing importance for the economy and society on a global scale. They are obtained from the subsoil as a result of geological exploration and mining. Therefore, it is important to show the link between them, the types of mineral deposits where they are found and the mineral systems of which the latter are part. Finally, the objective is to present the main mineral systems that carry critical raw materials in Cuba and their spatial distribution in the national territory. As a result of the bibliographic search, systematization and generalization of the information collected on critical raw materials, a generalized list of them and some basic facts related to the concept of critical raw materials are presented. The relationship between the geology of critical minerals and the supply chain is exposed, and how they are distributed by mineral deposit models and mineral systems on a global scale is shown. In this context, the main mineral systems carrying them in Cuba are exposed, as well as their location within the country. It is concluded that the distribution of geological resources (evaluated and potential to be discovered) of critical raw materials in Cuba are concentrated in four mineral systems. Of them, the most promising, due to the magnitude of its richness in ore resources, is the supergene mineral system, carrier of Ni, Co, Sc, Cr, EGP and ETR.

**Keywords:** critical raw matter, critical mineral, deposit model, mineral system.

**Recibido:** 11/12/2023

**Aceptado:** 22/01/2024



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## INTRODUCCIÓN

Minerales, rocas, así como elementos y compuestos extraídos de ambos, constituyen una gran parte de los materiales empleados por el hombre para mejorar sus condiciones de vida. Ellos provienen del subsuelo y son, por tanto, objeto de estudio de la geología. Al principio, los seres humanos comenzaron a confeccionar herramientas de piedra, en particular de pedernal, por ser este el material que mejor satisfacía sus necesidades en ese aspecto. Con el paso del tiempo y el progreso de la sociedad humana, el universo de materias primas utilizadas procedentes del subsuelo se fue ampliando cada vez más, a medida que crecían sus necesidades y demandas.

Un gran salto se produjo en el siglo XIX, el cual se caracterizó por el desarrollo de la sociedad industrial y el creciente consumo de rocas y minerales para la obtención a gran escala de una gama cada vez más amplia de productos. En ese contexto, a lo largo del mencionado siglo se consolidó la idea de que el carbón y el hierro eran materias primas esenciales para asegurar la prosperidad económica y la fortaleza militar de una nación, y las grandes potencias de entonces hicieron todo lo necesario para asegurar para ellas su disponibilidad y empleo masivo. Este fue el origen del concepto de material o mineral estratégico, aparecido en el siglo XX y definido, bajo la influencia de las dos guerras mundiales, como aquellos vitales para la industria militar.

En la segunda mitad del siglo XX, la economía mundial, en particular la de los países desarrollados, continuó su rápido progreso y, a partir de 1980, entró en un período de rápidas e importantes transformaciones, caracterizadas por la aparición de nuevos productos y, con ellos, de nuevas necesidades a satisfacer. Estos cambios trajeron consigo una sustancial ampliación del universo de materias primas utilizadas, incluido un conjunto de ellas, como Co, elementos de las tierras raras (ETR), elementos del grupo del platino (EGP), Ga, Ge, In, Mg, Nb, Sb, Si, Sr, Ta, Mg, Li y otras, todas altamente purificadas, las cuales -aunque consumidas en pequeñas cantidades- son difíciles de obtener debido a su escasa abundancia geológica en el volumen del planeta accesible a la minería en términos técnicos y, mucho más importante aún, en términos de rentabilidad económica.

Este grupo particular de materias primas tiene como principal esfera de uso, la fabricación de productos de alta tecnología, los que van desde maquinaria de alta precisión y complejidad hasta productos de consumo generalizado, como computadoras y móviles. A lo anterior se añade su uso en la industria militar, esfera donde su disponibilidad constituye un componente clave para la fabricación de armamento de "última generación", un componente esencial del poderío militar de las grandes potencias de hoy. Otra gran esfera de aplicación de las mismas es la energía renovable, donde son imprescindibles para la fabricación de turbinas eólicas, paneles solares, coches híbridos y totalmente eléctricos, así como en iluminación exterior e interior.

Lo anterior, unido a la presión ejercida por el cambio climático en favor de la transición de la base energética de la sociedad, de una infraestructura basada en el consumo de combustibles fósiles hacia otra basada en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, genera un fuerte incremento de la demanda de este grupo de materias primas y, en consecuencia, una pronunciada elevación de sus precios. Sin embargo, como subproductos, la oferta de estas materias primas (Ge, In, Ga y Te, por ejemplo) depende fuertemente de la producción de los metales principales (también llamados metales *carriers* en el argot comercial, el cual significa que arrastran). Aunque su recuperación depende, en primer término, de sus concentraciones en los concentrados que abastecen a las refinerías metalúrgicas, otros factores son también considerados por los refinadores (los metalúrgicos) a la hora de decidir si recuperarlos o no. Entre estos factores figuran cuán fácil resulta o no la recuperación, la disponibilidad de contratos de abastecimiento a largo plazo, el grado de seguridad de ese abastecimiento y los costos de transportación. Otro importante factor es el hecho de que muchos refinadores consideran los

mercados de subproductos como una distracción de sus negocios principales y se muestran reacios a invertir tiempo, dinero y esfuerzo en involucrarse en nichos de mercado volátiles (de precios muy variables a corto plazo), de pequeña escala y escasa transparencia, aun cuando los niveles de precios son atractivos. Otra preocupación de las compañías refinadoras es el impacto que puede producir la recuperación del subproducto en el delicado y cuidadosamente ajustado proceso de refinación del producto principal, el que les garantiza su máxima eficiencia económica.

Todo lo arriba expuesto se traduce en la existencia de un “cuello de botella” en la cadena de producción-consumo de este grupo de materias primas, el cual impide que los incrementos de demanda y de precios se traduzca en crecimientos de su producción a corto plazo. Esto, unido al carácter vital de estas materias primas para la industria de alta tecnología y la vinculada con la transición energética, dio lugar al nacimiento, a principios del presente siglo XXI, del concepto de “materia prima crítica”.

Por otro lado, entre 1980 y el día de hoy, el conocimiento geológico sobre los depósitos minerales ha experimentado grandes avances. Dentro de ellos se destaca el desarrollo de los modelos de depósitos minerales (descriptivos y descriptivo-genéticos) y la creación y empleo del concepto de sistema mineral, pilares ambos, junto a la tipología de ambientes geodinámicos (geotectónicos), de la metalogenia actual.

El objetivo del presente trabajo es vincular las materias primas reconocidas como críticas, con la geología de los depósitos minerales donde ellas se encuentran en forma más o menos concentrada. En este sentido se propone exponer y comentar la definición de materia prima crítica, ofrecer una visión actualizada de los listados de estas materias primas y presentar un cuadro generalizado de su distribución geológica a través de la cadena materia prima crítica-modelo de depósito mineral-sistema mineral. Como resultado, se pretende ofrecer al lector una vía rápida y fácil de conocer en cuáles unidades metalogénicas -sistemas minerales- y, dentro de ellas, en qué tipos de depósitos minerales pueden ser localizadas mediante trabajos de exploración geológica. Otro objetivo del mismo es dar a conocer las áreas de Cuba donde, de acuerdo con la distribución espacial de los sistemas minerales, se presentan depósitos portadores de estas materias primas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración del presente trabajo se recurrió a la revisión de una considerable cantidad de literatura publicada disponible en internet, parte de la cual figura en su bibliografía. También fue utilizado el libro “Modelos descriptivo-genéticos de depósitos minerales metálicos para el mapa metalogénico de la República de Cuba a escala 1:250 000” (Torres, Lavaut y Cazañas, 2017).

La confección de la [tabla 1](#), de listados de materias primas críticas, se preparó a partir de las listas contenidas en documentos consultados, incluyéndose en la misma solo aquellas para las cuales se disponía de al menos un documento fuente y, por tanto, con la posibilidad de dotarla con la correspondiente cita. La [tabla 2](#), de modelos de depósitos portadores de materias primas críticas, fue preparada a partir de la consulta de literatura especializada. La [tabla 3](#), de sistemas minerales, por otra parte, fue preparada por los autores y tiene un carácter generalizado. La metodología utilizada se resume en consulta, sistematización de información recogida en la literatura recopilada, y una generalización de la geología de los depósitos minerales.

**TABLA 1a.** Materias primas críticas según listados publicados

Metal	USA 2011	USA 2017	USA 2021	USA 2023	Can* 2021	UE 2010	UE 2014	UE 2017	UE 2020	UE 2023
Cita bibliográfica	1	2, 3, 4	5	6, 7	8	9	10	11, 12	13	13
Al		X	X	X	X				X	X
Ag										
As		X	X	X						X
Au										
Sb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B		X					X	X	X	X
Ba		X	X	X				X	X	X
Be	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Bi		X	X	X	X			X	X	X
Cd										
Cr		X	X	X	X		X			
Cs		X		X	X					
Co	X	X	X	XX	X		X	X	X	X
Cu					X					X
Diamante										
EGP	X	X	X	XX	X	X	X	X	X	X
ETR	X	X	X	XX	X	X	X	X	X	X
F	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fe										
Feldespato										X
Ga	X	X	X	XX	X	X	X	X	X	X
Ge	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Grafito	X	X	X	XX	X	X	X	X	X	X
Hf		X	X	X				X	X	X
He		X			X			X		X
In	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Li		X	X	XX	X				X	X
Mg	X	X	X	XX	X	X	X	X	X	X
Mn		X	X	X	X					X
Mo					X					
Nb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ni			X	XX	X					X
P							X	X	X	X
Pb										
Potasa		X			X					
Rb			X	X						
Re		X								
Sc		X	X	X	X			X	X	X
Si (alta pureza)							X	X	X	X
Sn		X		X	X					
Se										
Sr		X							X	X
Ta	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Te		X	X	X	X					
Ti		X	X	X	X				X	X
W	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
V		X	X	X	X			X	X	X
Zr		X	X	X						
Zn			X	X	X					

\*Canadá.

**TABLA 1b.** Materias primas críticas según listados publicados

Metal	Australia 2019	Australia 2021	Australia 2022	Japón 2018	China 2016	UK 2021	India 2016	India 2023
Cita bibliográfica	14	15	16	8	8	17	18	19
Al			X		X			
Ag				X				
As								
Au				X	X			
Sb	X	X	X	X	X	XX		X
B								
Ba								X
Be	X		X	X			X	X
Bi	X	X	X			X		
Cd								X
Cr	X	X	X	X	X		X	
Cs								
Co	X	XX	X	X	X	X		X
Cu				X	X			X
Diamante				X				
EGP	X	X	X	X		XX		X
ETR	X	XX	X	X	X	XX	X	X
F				X	X			
Fe					X			
Feldespato								
Ga	X	X	X	X		XX		X
Ge	X		X	X			X	X
Grafito	X	XX	X		X	X	X	X
Hf	X		X					X
He	X	X	X					
In	X	X	X	X		X		X
Li	X	X	X	X	X	X		X
Mg	X	X	X	X		XX		
Mn	X	X	X	X				
Mo				X	X			X
Nb	X	X	X	X		X	X	X
Ni				X	X			X
P				X	X			X
Pb				X				
Potasa					X		X	X
Rb								
Re	X	X	X	X			X	X
Sc	X	X	X					
Si (alta pureza)			X			X	X	X
Sn				X	X	X		X
Se								X
Sr				X			X	X
Ta	X	X	X	X		X	X	X
Te						X		X
Ti	X	X	X	X				X
W	X	X	X	X	X	XX		X
V	X	XX	X	X		X		X
Zr	X	X	X	X	X		X	X
Zn				X				

Notas a la tabla 1: Cu y Ni son incluidos en la lista de la UE 2023 no como metales críticos (no cumplen los requerimientos para ser críticos en esa evaluación), sino por estratégicos. XX: materias primas más críticas en el listado correspondiente. La lista china del 2016 mezcla materias primas consideradas en ella críticas y estratégicas. El listado de USA 2023 no incluye el Os y el Ir como "minerales" críticos y presenta los ETR por separado. El U no se incluye en la tabla por ser considerado una materia prima energética. Lo mismo sucede con el carbón (coque). El titanio metálico y el silicón son productos elaborados, cuya obtención no es un asunto geológico. El segundo es sustituido aquí por el Si, referido al cuarzo de alta pureza, el cual sí es competencia de la geología.

Fuentes utilizadas en la tabla 1: 1) U.S. Department of Energy, 2011. 2) Fortier y otros, 2018. 3) Fortier y otros, 2019. 4) Hofstra y Kreiner, 2020. 5) U.S. Geological Survey, 2021. 6) US Geological Survey, 2022. 7) U.S. Department of Energy, 2023. 8) Su y Hu, 2022. 9) European Commission, 2010. 10) European Commission Enterprise and Industry, 2014. 11) Gisle, Comisión Europea, 2017. 12) Grohol, European Commission, 2018. 13) Grohol, Veeh y European Commission, 2023. 14) Commonwealth of Australia, 2019. 15) Office of the Chief Economist, Department of Industries, Science, Energy and Resources, 2021. 16) Geoscience Australia, 2022. 17) Lusty y otros, 2021. 18) Gupta, Biswas y Ganesan, 2016. 19) Ministry of Mines (of India), 2023.

**TABLA 2.** Distribución de materias primas críticas por modelos de depósitos minerales

No.	Modelo de depósito	Componente útil principal	Componentes acompañantes	Materias primas críticas
1	VMS máfico - ultramáfico	Cu	Au, Ag, Zn, Co, Cd	Co
2	VMS bimodal máfico	Cu, Zn ± Pb	Au, Ag ± barita, Cd, Te, In, Ge.	Barita, Ge, In, Te,
3	VMS máfico - siliciclástico	Cu, Zn, Ag	Au, Co, Sn, Cd, In, Ge, Ga.	Co, In, Ge, Ga, <b>Sn</b>
4	VMS félsico	Cu, Zn ± Pb	Au, Ag ± Cd, barita	Barita
5	Cu - Mo ± Au porfírico	Cu, Mo, Au	Re, ± Ag, Te, EGP, As, Zn	As, <b>EGP, Mo, Re,</b> Te
6	Mo porfídico tipo Endako	Mo	± W, Re	<b>Mo,</b> W, Re
7	Mo porfírico tipo Climax	Mo	Sn y W	<b>Mo,</b> Sn, W
8	W - Mo porfírico	W y Mo	Cu, Sn, Au, Ag ± Sb, Bi, Be, Zn, Pb, In, ETR	<b>Bi,</b> Be, ETR, In, <b>Mo,</b> Sb, <b>W</b>
9	Mo Porfírico Tipo Dabie	Mo, Cu	Pb, Zn, Ag	<b>Mo</b>
10	Sn porfírico	Sn	Ag, W ± In	<b>In, W, Sn</b>
11	Skarn de Fe	Fe	± granates, flogopita, boratos	<b>B,</b> Ge
12	Skarn de Fe - Cu	Fe, Cu	Zn, Ag ± Ge	<b>Ge</b>
13	Skarn de Cu	Cu, Au	± Ag, Mo, W	W, Mo
14	Skarn de Pb - Zn	Pb, Zn, Ag	± Cu, Au, Cd, W	W
15	Skarn de Mo	Mo	± W, Cu, Pb, Zn, Sn, Bi, U, Au	Bi, <b>Mo,</b> W, Sn
16	Skarn de W	W	± Mo, Cu	<b>Mo, W</b>
17	Skarn de Sn	Sn	± W, Zn, Fe, B, Bi	<b>Sn, W,</b> B, Bi
18	Au - Ag epitermal de alta sulfuración	Au, Ag, Cu.	As, Sb	<b>Sb,</b> As
19	Au - Ag epitermal de baja sulfuración (incluido el subtipo alcalino)	Au, Ag	Pb, Zn, Cu ± Te, Pt y Pd, As	As, Pt y Pd, Te
20	Au - Au epitermal de sulfuración intermedia	Ag, Au, Pb, Zn.	Cu, Mn ± Ge, In y Ga	Ge, Ga, In, Mn
21	Au orogénico tipo Mother Lode	Au	Ag, Cu, Sb, W	Sb, <b>W</b>
22	Au orogénico hospedado en secuencias siliciclásticas	Au	As, Ag, Sb, W, Cu ± grafito	<b>Sb, grafito,</b> As, W
23	Au - EGP orogénico en pizarras negras	Au ± Ag	EGP, As ± Sb, Li, Bi, W, y B	As, Sb, B, Bi, EGP, Li, W
24	Vetas auríferas asociadas con intrusivos reducidos	Au	Sb	Sb
25	Vetas de W	W	Mo, Sn ± Au, Ag, Sc, Nb, Ta	<b>W,</b> Mo, Nb, Sc, Sn, Ta
26	Vetas de cinco elementos Ni - Co - As - Ag ± Bi, U	Ag, Co	As, Ni, Bi, U, Sb	<b>Co, Bi,</b> As, Sb
27	Cu - Ni orogénico	Cu, Ni	Au, Co ± EGP	<b>Ni,</b> Co, EGP
28	Mn volcanogénico tipo oceánico	Mn	Fe	<b>Mn</b>
29	Mn volcanogénico tipo cubano	Mn		<b>Mn</b>
30	Mn epitermal	Mn		<b>Mn</b>
31	Óxidos de Fe - Cu - Au ± U, P, ETR tipo Olympic Dam (IOCG <i>sensu strictu</i> )	Cu, Au, Ag, U	P, Fe y ETR, Co, barita, fluorita	B, barita, Co, ETR, fluorita, P
32	Óxidos de Fe - P - ETR tipo Kiruna	Fe	± ETR	ETR

No.	Modelo de depósito	Componente útil principal	Componentes acompañantes	Materias primas críticas
33	Cu - Co - Au hospedado en metasedimentos	Cu, Co, Au	Ag ± Bi, Mo, Ni, Pb, U, W, Zn, ETR	Bi, Co, ETR, Ni, Mo, W
34	Vetas de Th - ETR	Th, ETR		<b>ETR</b>
35	Fe - Ni - Co supergénico tipo laterítico	Ni, Co	Fe, Sc ± Cr, Au, EGP, Mn, Ti, ETR	<b>Ni, Co, Sc, Cr, EGP</b> (Pt y Pd), ETR, Mn
36	Fe - Ni - Co supergénico tipo laterítico - saprolítico	Ni, Co	Fe, Sc ± Cr, Au, EGP, Mn, Ti, ETR	<b>Ni, Co, Sc, Cr, EGP</b> (Pt y Pd), ETR, Mn.
37	Fe - Ni - Co tipo Sedimentario	Ni, Co	Fe ± Mn, Ti, Cr	<b>Ni, Co, Cr, Mn.</b>
38	Cromitita podiforme	Cr	EGP	<b>Cr, EGP</b>
39	Zn - Pb - Ag ± Au exhalativo sedimentario	Zn, Pb, Ag	Cu, Au ± barita, Cd, Mn, Sb, Se, Sn, In, Ga, Ge, Bi, Co, Ni, EGP, Tl, Hg, As,	<b>Co, Ge, Sn, As,</b> barita, Bi, EGP, Ga, In, Mn, Ni, Sb.
40	Cu ± Ag ± Co hospedado en sedimentos	Cu, Ag, Co	Pb, Zn ± EGP, Au, Re, Ga, Ge, In, U, V, Tl	<b>Co, EGP, Ga, Ge, Re, In, V</b>
41	Lutitas negras polimetálicas	Ni, Mo, V, U, Cu, Zn, Co	Au, EGP ± Sc, Re, Se, ETR, P, Sb	<b>Ni, V, Mo, Co,</b> EGP, ETR, P, Sb, Sc
42	Barita estratiforme	Barita		<b>Barita</b>
43	Zn - Pb tipo valle del Mississippi (MVT)	Zn, Pb	Ag, Au, barita, Cu, Ge, Ga, Cd, In, Co, Sr	<b>Co, Ge, barita,</b> Ga, In, Sr
44	Au tipo Carlin	Au	Posible As	As
45	Mn estratiforme	Mn		<b>Mn</b>
46	Pb - Zn - Ag ± Cu tipo Broken Hill	Pb, Zn, Ag	Cu, ± Au, barita, Mn	Barita, Mn
47	Vetas polimetálicas de Pb - Zn - Ag en secuencia siliciclástica	Pb, Zn	Cu, Sb, Bi, Ge, Ga, In, As	Sb, Bi, Ge, Ga, In, As
48	Cu - Ni ± EGP ricos en sulfuros en complejos de diques y sills basálticos picríticos y toleíticos	Cu, EGP, Ni	Au, Ag, Co, Se, Te	Co, <b>EGP, Ni, Te</b>
49	Cu - Ni ± EGP asociados a intrusivos máfico - ultramáficos estratificados	EGP, Cu, Ni	Au	EGP, Ni
50	Be volcanogénico epitermal	Be		<b>Be</b>
51	Cromitita estratiforme	Cr, EGP		<b>Cr, EGP</b>
52	Pegmatitas de Li - Cs - Ta (LCT)	Li - Cs - Ta	Be, Nb Sn, Rb Cuarzo, Feldespato K, moscovita, Sn, Sc, gemas.	<b>Be, Cs, Li, Nb, Rb, Ta, Sc, Sn</b>
53	Pegmatitas de Nb - Y - fluorita (NYF)	Nb - Y - fluorita		Nb, fluorita, Y (uno de los ETR)
54	Pegmatitas comunes	Feldespato para cerámica, cuarzo extra puro, moscovita		<b>Feldespato, cuarzo de alta pureza.</b>
55	ETR asociados a intrusivos carbonatíticos y peralcalinos	ETR (ligeras)	Barita, fluorita, Fe, Nb, P Sr, Th, Ti, U, Zr, vermiculita	<b>ETR, barita, Nb, Sr, fluorita, P, Zr.</b>
56	Arenas de minerales pesados en ambientes costeros (placeres costeros y marinos)	Au, Ti, Zr, Sn, EGP	Sillimanita, cianita, estauroлита, monacita (ETR y Th), Hf, Ta, Nb	<b>EGP, ETR, Hf, Nb, Sn, Ta, Zr.</b>
57	Placeres superficiales y paleoplaceres - canales enterrados	Au, EGP	ETR, Sn, Gemas y otros minerales, Sc	<b>EGP, Sn, ETR, Sc</b>
58	Magnesita espática	Mg		<b>Mg</b>
59	Formación de hierro tipo Algoma	Fe	Mn, Co	Mn, Co
60	Fuente termal subacuática de Au - Ag	Ag, Au	Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg	As, <b>Sb, Zn</b>
61	Vetas de Sn - Ag	Ag, Sn	Zn, Cu, Au, Pb, Cd, In, Bi, W	<b>Sn, Bi, In, W</b>
62	Vetas y disseminaciones de Sb	Sb	Au, Ag	<b>Sb</b>
63	Vetas de barita	Barita		<b>Barita</b>
64	Vetas de fluorita - barita	fluorita ± barita	Pb, Zn, Cu, a veces minerales de Be	<b>Fluorita, barita, Be</b>

No.	Modelo de depósito	Componente útil principal	Componentes acompañantes	Materias primas críticas
65	Vetas de U clásicas	U	Bi, Co, Ni, As, Ag, Cu, Mo	As, Bi, Co, Mo, Ni
66	Vetas de magnesita criptocristalina en rocas ultramáficas	Magnesita		<b>Mg</b>
67	Manto polimetálico de Ag - Pb - Zn	Ag, Pb, Zn	Au, Cu, Sn, Bi	Bi, Sn.
68	Óxidos magmáticos de Ti - Fe ± V	Ti, Fe, V		<b>V</b> , ETR, P
69	Cr - EGP tipo alaskaño	Pt, Cr	Ir, Os, Rh, magnetita ± Ni	Cr, EGP
70	Talco - magnesita hospedada en rocas ultramáficas	Talco, magnesita		<b>Mg</b> , Ni
71	Elementos raros asociados a carbonatitas	Nb, P, Cu	Zr, Hf, V, Ti, Th, U, ETR, Ta, Sr, fluorita	<b>Nb, P, ETR, fluorita, Sr, Hf, Zr</b> , Ta, V.
72	Grafito microcristalino	Grafito microcristalino		<b>grafito</b>
73	Grafito hojoso cristalino	Grafito cristalino	Polvo de grafito	<b>grafito</b>
74	Vetas de grafito en secuencias metamórficas	Hojuelas y terrones de grafito cristalino		<b>grafito</b>
75	Esmeraldas hospedadas en esquistos	esmeraldas	Be industrial, otras gemas	<b>Be</b>
76	Feldespatos en sienita - nefelina			<b>Feldespatos</b>
77	Feldespatos tipo alaskita	feldespatos	Sílice, mica	<b>Feldespatos</b> , cuarzo de alta pureza)
78	Barita residual relacionado con carso	Barita	Pb, Zn	<b>Barita</b>
79	Li K ± Cs, Sr, B de salar	Li	K ± Cs, Sr, B	<b>Li</b> , B, Cs, Sr
80	Al en laterita bauxítica	Al	Ga ± V	<b>Al</b> , ETR, Ga, V
81	Sn - Ta - Nb en granitos	Sn, Ta, Nb, Li		<b>Li, Nb, Sn, Ta</b>
82	Placer de Sn - Ta - Nb	Sn	Ta, Nb	<b>Sn, Nb, Ta</b>
83	Nb - P - Ti en lateritas y bauxitas			Nb, P.
84	Arena sílice	Cuarzo de alta pureza		Cuarzo de alta pureza
85	Fe nodular sedimentario marino	Fe	± V	V
86	P en sedimentos marinos	P	ETR ± V, Ag, Cd, Sr, Se, Te, Zn	<b>P</b> , ETR, Sr, Te, V
87	ETR absorbidos en arcilla	ETR		<b>ETR</b>
88	Tipo Coeur d'Alene	Ag, Pb, Zn, Cu	Sb, Co, Ge, Ga, In	<b>Sb, Co</b> , Ge, Ga, In

Nota: Esta tabla solo contempla los modelos de depósitos minerales que son portadores de elementos críticos. En **negritas** están las materias primas críticas que son o han sido objeto de recuperación. Para establecer esta distinción, además de lo indicado en los correspondientes modelos, se tuvo en cuenta el trabajo de Hofstra y Kreiner (2020). Los modelos listados proceden de las siguientes fuentes:

Modelos del 1 al 47, con excepción de 8 y 10: libro de modelos descriptivo - genéticos del Mapa Metalogénico de Cuba (Torres, Lavaut y Cazañas, 2017). Los No. 8 y 10 fueron colocados aquí para tener juntos a todos los modelos de depósitos porfíricos aquí incluidos (Hosking, 1982; Artiaga y otros, 2013) y (Jiménez-Franco y otros, 2018; Pavlova y otros, 2015), respectivamente.

Modelos del 48 al 55: monografías sobre modelos descriptivo-genéticos publicadas por el USGS (Schulz y otros, 2014; Zientek, 2012; Foley y otros, 2010; Schulte y otros, 2010; Bradley, McCauley y Stillings, 2017; Verplanck y otros, 2014; Van Gosen y otros, 2014).

Modelos del 56 al 77: modelos del British Columbia Mineral Deposit Profiles.

Modelos del 78 al 86: modelos del "chessboard" classification scheme of mineral deposits (Dill, 2009).

Otros modelos: modelo 87 (Santana y Botelho, 2022; Zhao y otros, 2022); modelo 88 (Hofstra y Kreiner, 2020).

Fuentes utilizadas en la tabla 2: 1) Dill, 2009. 2) Hosking, 1982. 3) Artiaga y otros, 2013. 4) Pavlova y otros, 2015. 5) Jiménez-Franco *et al.*, 2018. 6) Chang, Shu y Meinert, 2019. 7) Fan, 2023. 8) Lefebure, 1996. 9) Laznicka, 2010. 10) Mosier y Page, 1988. 11) Cazañas, *et al.*, 2017. 12) Torres, Lavaut y Cazañas, 2017. 13) Mosier, 1986. 14)

Eliopoulos y Economou-Eliopoulos, 2000. 15) Lazarenkov *et al.*, 2005. 16) Aiglsperger *et al.*, 2013. 17) Emsbo *et al.*, 2016. 18) Cox *et al.*, 2007. 19) Hulbert, *et al.*, 1992. 20) Mao *et al.*, 2002. 21) Paradis, Hannigan y Dewing, 2007. 22) Bliss y Cox, 1986. 23) Schulz *et al.*, 2014. 24) Zientek, 2012. 25) Foley *et al.*, 2010. 26) Schulte *et al.*, 2010. 27) Bradley, McCauley y Stillings, 2017. 28) Hora, 2010a. 29) Verplanck *et al.*, 2014. 30) Levson, 1995a. 31) Van Gosen *et al.*, 2014. 32) Ryan, 1995. 33) Levson, 1995b. 34) Levson, Levson y Timothy, 1995. 35) Simandl y Hancock, 1998. 36) Gross, 1996. 37) Alldrick, 1995. 38) Panteleyev, 1996a. 39) Panteleyev, 1996b, 40) Hora, 1996a. 41) Hora, 1996b. 42) McMillian, 1996. 43) Paradis y. Simandl, 1996. 44) Nelson, 1996. 45) Gross, Gower y Lefebure, 1997. 46) Nixon, 1996. 47) Simandl y Ogden, 1999. 48) Birkett y Simandl, 1999. 49) Simandl y Kenan, 1997a. 50) Simandl y Kenan, 1997b. 51) Simandl y Kenan, 1997c. 52) Simandl, Paradis y Birkett, 1999. 53) Hora, 2010b. 54) Santana y Botelho, 2022. 55) Zhao *et al.*, 2022. 56) Hofstra y Kreiner, 2020.

Notas aclaratorias a la **tabla 2**:

- El Mg tiene como otras fuentes principales agua de mar, salmueras y dolomías.
- El As es un elemento tóxico y es relativamente abundante, por lo que la distancia entre el depósito y los consumidores de este elemento influye en la factibilidad económica de su obtención.
- El V puede obtenerse además como subproducto de las cenizas de petróleo, carbón y asfaltitas.
- El carbón, en particular la variedad bituminosa, es portadora de V, As, Ge, Ga y Sb. El As tiene gran afinidad geoquímica con el carbón. También los hay enriquecidos en Ge y/o Ga, los cuales además están presentes en sus cenizas (Dill, 2009).

**TABLA 3.** Distribución por sistemas minerales generalizados de los modelos de depósitos minerales portadores de materias primas críticas.

<b>Sistema Mineral</b>	<b>Modelos de depósito</b>	<b>Productos principales</b>	<b>Materias primas críticas</b>
Sedimentario de placer	Arenas de minerales pesados en ambientes costeros (placeres costeros y marinos)	Au, Ti, Zr, Sn, ETR, EGP	EGP, ETR, Hf, Nb, Sn, Ta, Zr, Sc
	Placeres superficiales y paleoplaceres - canales enterrados	Au, EGP, Sn	<b>EGP, Sn</b>
	Placer de Sn - Ta - Nb	Sn	<b>Nb, Sn, Ta</b>
	Placeres asociados a Cr - EGP tipo alaskiano	Pt, Cr	<b>Pt</b>
	Arena sílice	Arena sílice común y de alta pureza	<i>Cuarzo de alta pureza</i>
Supergénico	Fe - Ni - Co supergénico tipo laterítico	Ni, Co	<b>Ni, Co, Sc, Cr, EGP</b> (Pt y Pd), ETR, Mn
	Fe - Ni - Co supergénico tipo laterítico - saprolítico	Ni, Co	<b>Ni, Co, Sc, Cr, EGP</b> (Pt y Pd), ETR, Mn
	Depósitos residuales asociados a carbonatitas	Nb, ETR	<b>Nb, ETR, Sc</b>
	Al en laterita bauxítica	Al	<b>Al, Ga, ETR, V</b>
Porfírico - skarn - epitermal	Nb - P - Ti en lateritas y bauxitas		<i>Nb, P</i>
	ETR absorbidos en arcilla	ETR	<b>ETR</b>
	Cu - Mo ± Au porfírico	Cu, Mo, Au	<b>EGP, Re, As, Te</b>
	Mo porfídico tipo Endako	Mo	<b>Mo, W, Re</b>
	Mo porfírico Tipo Climax	Mo	<b>Mo, W, Sn</b>
	W - Mo porfírico	W y Mo	<b>W, Bi, Mo, Be, ETR, In, Sb,</b>
	Mo Porfírico Tipo Dabie	Mo	<b>Mo</b>
	Sn porfírico	Sn	<b>In, Sn, W</b>
	Feldespatos tipo alaskita	Feldespatos	<b>Feldespatos, Si</b>
	Vetas de Sn - Ag	Ag, Sn	<b>Sn, Bi, In, W</b>
Skarn de Fe	Fe	<b>B, Ge</b>	
Skarn de Fe - Cu	Fe, Cu	<i>Ge</i>	

Sistema Mineral	Modelos de depósito	Productos principales	Materias primas críticas
Volcanogénico	Skarn de Cu	Cu, Au	W
	Skarn de Mo	Mo	Mo, Bi, W
	Skarn de W	W	Mo, W
	Skarn de Sn	Sn	W, Sn, B, Bi,
	Manto polimetálico de Ag - Pb - Zn	Ag, Pb, Zn	Bi, Sn
	Au - Ag epitermal de alta sulfuración	Au, Ag, Cu	Sb, As
	Au - Au epitermal de sulfuración intermedia	Ag, Au, Pb, Zn.	Ge, Ga, In, Mn
	Mn epitermal	Mn	Mn
	Fuente termal subacuática de Au - Ag	Ag, Au	As, Sb
	Be volcanogénico epitermal	Be	Be
	Au tipo Carlin	Au	As
	VMS máfico - ultramáfico	Cu	Co
	VMS bimodal máfico	Cu, Zn ± Pb	Ba, Ge, In, Te
	VMS félsico	Cu, Zn ± Pb	Ba
Orogénico	Mn volcanogénico tipo oceánico	Mn	Mn
	Mn volcanogénico tipo cubano	Mn	Mn
	Au orogénico tipo Mother Lode	Au	W, Sb
	Au orogénico hospedado en secuencias siliciclásticas	Au	Sb, C (grafito), As, W
	Vetas de cinco elementos Ni - Co - As - Ag ± Bi, U	Ag, Co	Co, Bi, As, Sb
	Cu - Ni orogénico	Cu, Ni	Ni, Co, EGP
	Vetas y disseminaciones de Sb	Sb	Sb
	Au - EGP orogénico en pizarras negras	Au ± Ag	As, Sb, B, Bi, EGP, Li, W
	Esmeraldas hospedadas en esquistos	esmeraldas	Be
	IOCG	Óxidos de Fe - Cu - Au ± U, P, ETR tipo Olympic Dam	Cu, Au, Ag, U
Intrusivos reducidos	Óxidos de Fe - P - ETR tipo Kiruna	Fe	ETR
	Cu - Co - Au hospedado en metasedimentos	Cu, Co, Au	Co, Bi, ETR, Ni, W
	Vetas de W	W	W, Nb, Sc, Sn, Ta
	Vetas Auríferas asociadas con Intrusivos reducidos	Au	Sb
	Pegmatitas de Li - Cs - Ta (LCT)	Li - Cs - Ta	Li, Cs, Ta, Nb, Sn, Be, Rb, Sc, Sn
	Pegmatitas de Nb - Y - F (NYF)	Nb - Y - F	Nb, F, Y
	Pegmatitas comunes	Si, feldespato	Si, feldespato
	Sn - Ta - Nb en granitos	Sn, Ta, Nb, Li	Li, Nb, Sn, Ta
	Skarn de W (asociados con intrusivos tipo S)	W	W
	Skarn de Sn (asociados con intrusivos tipo S)	Sn	W, B, Bi,
Singenético - epigenético de cuenca distensiva	Vetas polimetálicas de Pb - Zn - Ag en secuencia siliciclástica	Pb, Zn	Sb, Bi, Ge, Ga, In, As
	VMS máfico - siliciclástico	Cu, Zn, Ag	Sn, Co, In, Ge, Ga
	Zn - Pb - Ag ± Au exhalativo sedimentario	Zn, Pb, Ag	Co, Ge, Sn, As, Ba, Bi, EGP, Ga, In, Mn, Ni, Sb
	Cu ± Ag ± Co hospedado en sedimentos	Cu, Ag, Co	Co, EGP, Ga, Ge, Re, In, Mo, V
	Zn - Pb tipo valle del Mississippi (MVT)	Zn, Pb	Co, Ge, Ba, Ga, In, Sr

Sistema Mineral	Modelos de depósito	Productos principales	Materias primas críticas
	Lutitas negras polimetálicas	Ni, Mo, V, U, Cu, Zn, Co	<b>Ni, Mo, V, Co,</b> <i>EGP, ETR, P, Sb, Sc</i>
	Barita estratiforme	Ba	<b>Ba</b>
	Mn estratiforme	Mn	<b>Mn</b>
	Vetas de barita	Ba	<b>Ba</b>
	Ba residual relacionado con carso	Ba	<b>Ba</b>
	Formación de hierro tipo Algoma	Fe	<b>Mn, Co</b>
	P asociado a sedex (subtipo dentro del P en sedimentos químicos marinos)	P	<i>As, ETR, Sr, V</i>
Salmueras residuales	Li K ± Cs, Sr, B de salar	Li	<b>Li, B, Cs, Mg, Rb, Sr</b>
	Evaporitas marinas de Na - K	Na, K	<b>B</b>
Intrusivos máfico - ultramáficos	Cu - Ni ± EGP ricos en sulfuros en complejos de diques y sills basálticos picríticos y toleíticos	Cu, EGP, Ni	<b>EGP, Ni, Co, Te,</b>
	Cu - Ni ± EGP asociados a intrusivos máfico - ultramáficos estratificados	Cu, EGP, Ni	<b>EGP, Ni</b>
	Cromitita estratiforme	Cr, EGP	<b>Cr, EGP</b>
	Óxidos magmáticos de Ti - Fe ± V	Ti, Fe, V	<b>Ti, V, ETR, P</b>
	Cr - EGP tipo alaskaño	Cr, EGP	<i>Cr, EGP</i>
Ofiolítico	Cromitita Podiforme	Cr	<b>Cr, EGP</b>
	Vetas de magnesita criptocristalina en rocas ultramáficas	Mg	<b>Mg</b>
	Talco - magnesita hospedada en rocas ultramáficas	Mg, Talco	<b>Mg, Ni</b>
Asociado a intrusivos alcalinos y carbonatitas	Vetas de Th - ETR	Th, ETR	<b>ETR</b>
	ETR asociados a intrusivos carbonatíticos y peralcalinos	ETR	<b>ETR, Ba, Nb,</b> <i>Sr, F, P, Ti, Zr</i>
	Vetas de fluorita - barita	F ± barita	<b>F, Ba, Be</b>
	Elementos raros asociados a carbonatitas	Nb, P, Cu	<b>Nb, P, ETR, F, Sr,</b> <i>Hf, Zr, Ta, Ti, V</i>
	Feldespatos en sienita - nefelina	Feldespatos	<b>Feldespatos</b>
	Feldespatos tipo alaskita	Feldespatos	<b>Feldespatos, Si</b>
	Au - Ag epitermal de baja sulfuración del subtipo alcalino	Au, Ag	<i>As, Pt y Pd, Te</i>
Sedimentario químico	Barita estratiforme	Ba	<b>Ba</b>
	Mn estratiforme	Mn	<b>Mn</b>
	Magnesita espática	Mg	<b>Mg</b>
	Fe nodular sedimentario marino	Fe	<i>V</i>
	P en sedimentos marinos	P	<b>P, ETR, F, Sr, Te, V</b>
Postorogénico	Vetas de U clásicas	U	<i>As, Bi, Co, Mo, Ni</i>
Metamórfico	Pb - Zn - Ag ± Cu tipo Broken Hill	Pb, Zn, Ag	<i>Ba, Mn</i>
	Tipo Coeur d'Alene	Ag, Pb, Zn, Cu	<b>Sb, Co, Ge, Ga, In</b>
	Grafito microcristalino	Grafito microcristalino	<b>C (Grafito)</b>
	Grafito hojoso cristalino	Grafito cristalino	<b>C (Grafito)</b>
	Vetas de grafito en secuencias metamórficas	Hojuelas y terrones de grafito cristalino	<b>C (Grafito)</b>

Nota: Esta tabla, como la anterior, solo contempla los modelos de depósitos minerales que son portadores de elementos críticos. En **negritas** las materias primas críticas que son o han sido objeto de recuperación, En *italicas* las de potencial recuperación. Para establecer esta distinción, además de lo indicado en los correspondientes modelos, se tuvo en cuenta el trabajo de Hofstra y Kreiner (2020).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Definiciones

Aunque es común hablar de “minerales críticos” y de “metales críticos”, en realidad estos incluyen no solo minerales metálicos, sino también rocas y minerales industriales. También se han incluido gases como el He y materiales de origen biológico, como el caucho natural, por lo que resulta mucho más apropiado y exacto hablar de materias primas críticas, aunque en verdad, la aplastante mayoría de ellas constituyen minerales procedentes del subsuelo. Por lo anterior, el término “mineral crítico” es de uso frecuente en la literatura sobre el tema. Mineral crítico es, asimismo, el término empleado por el USGS (United States Geological Survey) y, según el [U.S. Interior Department \(2018\)](#), se define como sigue:

“Mineral crítico, como es definido por la Orden Ejecutiva [13817 de diciembre 20, 2017], es un mineral identificado por ser (i) un mineral no combustible o material mineral esencial para la economía y la seguridad nacional de los Estados Unidos, (ii) la cadena de suministro del cual es vulnerable a interrupción, y (iii) que desempeña una función esencial en la fabricación de un producto, la ausencia del cual podría tener consecuencias significativas para la economía o la seguridad nacional de Estados Unidos”.

La UE (Unión Europea), por su parte, considera “materiales críticos” aquellas materias primas que presentan un riesgo elevado de escasez de suministro y una gran importancia económica, el acceso fiable y sin trabas a las cuales constituye una preocupación para la industria europea y las cadenas de valor ([Comisión Europea, 2017](#)).

Por su parte, India las define como ([Ministry of Mines of India, 2023](#)):

“Minerales críticos son aquellos minerales que son esenciales para el desarrollo económico y la seguridad nacional, la carencia de disponibilidad de esos minerales, incluida la concentración de la existencia, extracción o procesamiento de esos minerales en pocas localidades geográficas, puede resultar en vulnerabilidad e interrupción de su cadena de abastecimiento”.

Para completar estas definiciones, es necesario añadir que se trata de materias primas situadas al inicio de las cadenas de valor, para las cuales no hay sustitutos viables con las tecnologías actuales.

Como se desprende de todo lo anterior, el término “mineral crítico” o “materia prima crítica” se usa para designar a aquellas materias primas que combinan alta importancia económica con elevado riesgo de suministro. El riesgo de suministro se deriva de su escasez geológica, pero también intervienen en su magnitud otras fuentes de riesgo de origen puramente humano como monopolización, inestabilidad política y/o económica en los países suministradores, dificultades para la sustitución con materias primas alternativas y el bajo nivel de reciclaje. Todo ello se traduce en el grado de disponibilidad en los mercados de la materia prima dada en cantidad y calidad suficiente para satisfacer la demanda. Como puede apreciarse, muchos de los riesgos mencionados caen en el ámbito de la Geografía Económica y de la Geopolítica.

Vale la pena señalar que el factor escasez geológica puede ser descompuesto en:

- Baja abundancia absoluta de la materia prima considerada en la parte más superior de la corteza terrestre, por lo que sus depósitos accesibles a la minería son escasos y con baja ley de la mencionada materia prima crítica.

- Comportamiento geoquímico disperso de la materia prima. Hay elementos que resultan escasos porque, a pesar de ser relativamente abundantes en la parte superior de la corteza terrestre, no tienden a formar depósitos minerales.
- Alto grado de dificultad de acceso a los depósitos donde se acumulan cantidades importantes de estas materias primas (Ni, Co y Mn en nódulos submarinos, por ejemplo), lo que vuelve muy difícil, compleja y costosa su minería, además de los problemas medioambientales asociados a algunos casos, como en el del ejemplo mencionado.

Debido a lo anterior, la mayoría de los minerales críticos no constituyen productos principales, sino que se recuperan como subproductos o “metales acompañantes” de productos principales como Cu, Zn, Pb, Ni, Mo, Fe, Au, Ag y P (Hofstra y Kreiner, 2020). Así, el Te se recupera de menas donde el producto principal es el Cu, el In y Ge proceden de menas donde el Zn (a veces el Cu) es el producto principal, el Re de menas de Cu - Mo, el Co se obtiene de menas sulfurosas de Cu y lateríticas de Ni y el Ga se obtiene de la bauxita (menas supergénicas de Al), por ejemplo. ETR, EGP y Ta - Nb, por su parte, son “productos acoplados”, porque por lo general son minados y procesados juntos, sin ser arrastrados por un producto (componente útil) principal.

No son pocos los especialistas que, dentro y fuera del ámbito de la Geología, a la hora de abordar este tema solo tienen en cuenta los listados emitidos por los Estados Unidos y la UE. Al hacerlo así, trabajan con una visión parcial del mismo. Para tener una visión más realista sobre el tema y trabajar con un listado más apropiado, representativo y completo de materias primas críticas para la economía mundial, es necesario tomar de igual modo en cuenta los listados publicados por naciones de otras partes del mundo. Esta necesidad se vuelve más clara cuando se considera la nueva redistribución emergente de los centros económicos mundiales y los consiguientes cambios avizorados en el futuro de la economía globalizada. Por esta razón, para la identificación de las materias primas críticas presentadas en este artículo fueron considerados todos los listados mostrados en la [tabla 1](#), otorgándoseles a cada uno de ellos igual importancia.

Por último, es conveniente señalar que los términos “materias primas críticas” y “minerales estratégicos”, aunque no son sinónimos, se solapan entre sí. En este sentido se tiene, en forma resumida, que los minerales (materias primas) esenciales para la industria militar son estratégicos, en tanto las materias primas para las cuales una amenaza a su abastecimiento implica daños y perjuicios a la economía, son críticas. Esto implica que una materia prima crítica puede ser o no ser estratégica. Así, en el 2023 la UE listó las siguientes materias primas estratégicas (Grohol, Veeh, DG GROW, European Commission, 2023): B, Bi, Co, Cu, EGP, ETR, Ga, Ge, grafito, Li, Mg, Mn, Ni, Si (cuarzo de alta pureza), Ti (metálico) y W. Como puede verse en la [tabla 1](#), la gran mayoría de ellas aparecen en el listado de materias primas críticas de la UE del 2023 al cumplir con los criterios evaluados (riesgo de abastecimiento e importancia económica).

## Evaluaciones y listados de materias primas críticas

Aunque la iniciativa de recopilar información sobre las materias primas críticas data del 2008, las primeras evaluaciones y listados de estas fueron publicadas en el 2011 por los Estados Unidos y 2010 por la Unión Europea, respectivamente. Tanto los Estados Unidos como la Unión Europea llevan a cabo evaluaciones de materias primas críticas cada tres años, resultado de las cuales es la publicación de documentos contentivos de los correspondientes listados, así como informaciones y comentarios asociados con los mismos. Como puede verse en las [tablas 1a](#) y [1b](#), otros países también han publicado en diversos años listados de materias primas críticas.

La evaluación para establecer si un mineral es crítico o no se realiza a partir del análisis de dos criterios: importancia económica y riesgo de suministro. El primero evalúa el aporte de la materia prima objeto de evaluación al producto global de la economía a través de su contribución,

mediante la medición de la cantidad de uso, en cada sector y subsector económico. Así, mientras más alto sea el valor agregado producido por el sector o subsector de la economía que la consume y más sea el aporte sumado de estos al producto económico global del país, más elevado será el valor de criticidad para la materia prima considerada. El segundo, además de los riesgos derivados de la concentración de la producción, considera el grado de sustitución y reciclaje. De este modo, una materia prima disponible en el país en cantidades suficientes, para la cual existan sustitutos funcionales o cuente con un buen nivel de reciclaje, obtendrá un menor valor de criticidad para este criterio. La combinación de los valores obtenidos para cada uno de los dos criterios expuestos y/o la ubicación de la materia prima en un gráfico donde el riesgo de suministro es representado en el eje vertical y la importancia económica en el eje horizontal, determina si la materia prima en cuestión es crítica o no (European Commission, 2017).

Todas estas evaluaciones tienen carácter aproximado debido a: A) Inconsistencia de los datos utilizados a nivel global y nacional. B) Dificultad en reflejar de modo adecuado las variaciones de precio derivadas de eventos de escasez o de sobreabastecimiento. C) No inclusión de los factores ambientales y asociados a la sustentabilidad de los procesos de producción en los que la materia prima considerada participa. D) Dificultad para la evaluación adecuada de la criticidad de la materia prima derivada de la importación de productos intermedios o semielaborados. E) Dificultad a la hora de evaluar los cambios generados por la introducción de nuevas tecnologías, que mejoran la producción de productos existentes o dan lugar a la aparición de otros nuevos (U.S. Department of Energy, 2011). Esta es, en suma, la causa del corto plazo de vigencia (trianual) de las sucesivas evaluaciones realizadas, tanto por los Estados Unidos como por la Unión Europea.

Como puede apreciarse en la [tabla 1](#), hay un amplio conjunto de materias primas que de manera reiterada clasifican como críticas en listas correspondientes a diferentes años y diferentes evaluadores (países), formado por: Al, B, Be, Bi, Co, Cr, cuarzo de alta pureza, EGP (elementos del grupo del platino), ETR (elementos de las tierras raras), fluorita, Ga, Ge, grafito, Hf, In, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, Re, Sb, Ta, V, W y Zr. A ellas se les añade otro grupo de materias primas, clasificadas como críticas en evaluaciones realizadas entre los años 2021 y 2023, formado por: As, barita, Cu, Cs, feldespato, He, Li, P y fosfatos, potasa, Rb, Sc, Sn, Sr, Te, Ti (metálico) y Zn. En cambio, otras materias primas, como Pb, Fe, Au, Ag y diamante, aunque figuran en la [tabla 1](#), solo aparecen en ella una o dos veces.

Atendiendo a lo arriba expuesto, las materias primas críticas aquí consideradas son: Al, As, barita, Be, B, Bi, Co, Cr, Cs, cuarzo de alta pureza, EGP, ETR (incluido el Y), fluorita, feldespato, Ga, Ge, grafito, He, Hf, In, Li, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, P y fosfatos, potasa, Rb, Re, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, V, W y Zr. Este conjunto es presentado en la [tabla 2](#), enfocada por modelos de depósitos minerales.

El Cu y el Zn no se consideran aquí materiales críticos por tratarse de dos de los metales base, contenidos en numerosos depósitos minerales y con grandes volúmenes de producción. El carbón tampoco se considera materia prima crítica, por tratarse de una materia prima combustible. A su vez el titanio metálico, al ser un producto elaborado, tampoco es considerado dentro de las materias primas críticas. Asimismo, no se incluyen el Pb, Fe, Au, Ag y diamante.

Finalmente, cabe señalar que se consideran materias primas estratégicas "clásicas" (desde los tiempos de la Segunda Guerra mundial) Al, Cr, Fe, Mn, Ni y W, a las cuales ahora se les añade el Cu, declarado como tal por la UE. Como ya se expuso, el universo de materias primas minerales consideradas estratégicas es más amplio y se solapa de modo parcial con el universo de las materias minerales críticas.

## Ubicación geológica de las materias primas críticas

Por modelos de depósitos minerales, según [Cox y Singer \(1986\)](#), se entiende “la información sistemáticamente arreglada que describe los atributos esenciales (propiedades) de una clase de depósito mineral”. La presencia de uno u varios modelos de depósitos minerales, en una zona dada, constituye un importante rasgo metalogénico de ella y brinda criterios acerca de qué recursos minerales buscar, dónde buscarlos y en qué forma estos pueden aparecer. También constituyen una base de partida importante para el cálculo cuantitativo de recursos en las evaluaciones de potencial. Por estas razones, su formulación y reconocimiento son un paso obligado en la confección de los mapas metalogénicos y las evaluaciones de potencial mineral.

El concepto de sistema mineral es un reflejo del conocimiento alcanzado en el entendimiento de los procesos y regularidades que dan origen a un depósito mineral. Definido por primera vez en [Wyborn, Heinrich y Jaques \(1994\)](#), este concepto fue desarrollado posteriormente por otros autores ([McCuaig, Beresford y Hronsky, 2010](#); [Huston et al., 2016](#); [Hofstra y Kreiner, 2020](#)). Estos dos últimos plantean que, en general, un sistema mineral abarca los siguientes componentes requeridos para formar yacimientos:

1. Un ambiente geodinámico óptimo (configuración tectónica actual, evolución cortical y/o de las condiciones climáticas).
2. Fuente de energía para el sistema (calor, gravedad).
3. Rocas fuentes de ligantes y metales (rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas preexistentes),
4. Medio de transporte (fundidos; fluidos acuosos, líquidos y/o en vapor; petróleo y/o gas natural)
5. Vías de transporte (canales, litologías y estructuras permeables).
6. Trampas químicas y físicas, que concentran los metales hasta crear depósitos minerales.
7. Expresiones distales, que se extienden hasta el límite del sistema mineral (anomalías mineralógicas, químicas o térmicas).

Cualquier cambio en los componentes mencionados, que ocurra dentro de un ambiente geodinámico, provoca el desarrollo de sistemas y depósitos minerales de diferentes tipos, portadores de distintos productos y subproductos. Entre estos últimos figuran muchas de las materias primas críticas. Esto implica la existencia de una relación jerárquica entre sistemas minerales (tipos de depósitos minerales relacionados entre sí desde el punto de vista genético), productos principales y materias primas minerales críticas. Partiendo de esta premisa, para ilustrar esta relación fue construida la [tabla 3](#).

Como suele ocurrir en toda generalización, al confeccionar la [tabla 3](#) se incurrió en cierto grado de simplificación, pues la realidad geológica siempre supera en amplitud y complejidad a su representación generalizada. Ello se refleja en las denominaciones dadas en la tabla a los sistemas minerales, carentes a toda alusión a su ubicación geotectónica y metalogénica concreta. Así, por ejemplo, en un país, región o continente, puede existir no uno, sino varios sistemas minerales porfírico-skarn-epitermales, los cuales pueden ser identificados, cartografiados y nombrados de manera reconocible y unívoca en sus correspondientes ubicaciones. En otros casos, el sistema mineral generalizado es subdividible en varios más específicos. Así, por ejemplo, dentro del sistema mineral singenético-epigenético de cuenca distensiva es posible distinguir cuencas extensionales asociadas a rift y cuencas extensionales de trasarco, por ejemplo.

Otro hecho a tener presente es que un sistema mineral puede contener modelos de depósitos minerales pertenecientes a diferentes familias o grupos de modelos. A su vez, un modelo de depósito dado puede estar presente en varios sistemas minerales de diferentes tipos. Una complicación adicional es que, en una misma región, pueden existir dos o más sistemas minerales, similares o diferentes, ubicados en distintos intervalos del tiempo geológico, es decir,

pertenecientes a diferentes épocas metalogénicas. Todo lo anterior implica que la **tabla 3** aquí presentada, si se confeccionase con un mayor grado de apego a la realidad geológica, resultaría considerablemente más extensa y complicada. Esto último, a su vez, se apartaría del propósito general perseguido de brindar una guía general que permita al lector establecer con facilidad hacia dónde dirigir su atención en relación a una materia prima o grupo de materias primas críticas de su interés.

## Geología y cadena de suministro

Una inspección de las **tablas 2 y 3** revela que las materias primas críticas están presentes en un gran número de tipos de depósitos minerales, distribuidos en casi todos los sistemas minerales. También muestran que no todas las materias primas aquí consideradas se distribuyen de igual manera, pues mientras elementos tales como Ni, Co, EGP, Mn y V se asocian con magmatismo máfico-ultramáfico (intrusivos estratificados, ofiolitas y arcos volcánicos toleíticos), otros, como el Mo, W y Sn se asocian con el magmatismo félsico. Los que forman minerales de gran inercia química en ambiente exógeno, como Sn, Zr, Hf, EGP, ETR, Ti y Ta, entre otros, suelen aparecer en depósitos sedimentarios de placer. Por otra parte, los sistemas minerales relacionados con intrusivos reducidos (del tipo S) y con secuencias sedimentarias ricas en materia orgánica, albergan un considerable surtido de materias primas críticas.

A la luz de lo anterior puede afirmarse que el problema geológico de las materias primas críticas, en sentido general, no radica en la amplitud de su distribución por modelos de depósitos y sistemas minerales, sino en las bajas concentraciones en que estas suelen acumularse en los depósitos minerales de diferentes tipos. Otro problema, correlativo con este, aunque no geológico, es la dependencia económico-tecnológica del suministro de la mayoría de estas materias primas de la producción de productos principales. En adición a esto, en muchos casos, la mina donde se obtiene el concentrado mineral, portador de una o más materias primas críticas, y la planta metalúrgica refinadora, donde se obtiene el producto principal (que puede ser más de uno) y sus subproductos, se ubican en distintos lugares, en no pocas ocasiones muy alejados uno del otro, y pertenecen a empresas diferentes. Ello da lugar a que la cadena de suministro de materias primas críticas puede encontrarse en cuatro situaciones básicas:

1. La producción de mena (y concentrados) es monopolizada por unos pocos países productores. Esta situación se deriva, directamente, de la distribución geológica, en pocas localidades, de las fuentes capaces de suministrar la materia prima considerada en condiciones de rentabilidad económica.
2. La refinación (separación-recuperación) químico-metalúrgica de la materia prima considerada, es monopolizada por muy pocos países o empresas. Esta situación surge cuando este proceso se realiza en un número muy limitado de plantas industriales, ubicadas también en un número limitado de localidades geográficas. Esta situación es la causante de que en los listados publicados de materias primas críticas en ocasiones aparezca el producto refinado (Ti metálico, silicón, por ejemplo) en lugar de la materia prima mineral fuente del producto.
3. La tercera situación combina las dos anteriores, de manera que la cadena de suministro de la materia prima experimenta un doble "cuello de botella", el primero por la monopolización, o casi monopolización, de la extracción por un número limitado de productores de concentrados de mena; en tanto el segundo es producido por la existencia de un limitado número de refinadores, los cuales monopolizan, o casi monopolizan, la producción del producto o subproducto final (materia prima crítica purificada) demandado por las diferentes esferas de la industria y la economía.

4. La cuarta situación tiene lugar cuando la producción de las menas y concentrados de la materia prima en cuestión se encuentra dispersa entre numerosos productores, pero pequeños en relación al suministro total global disponible.

De este modo, la realidad económica y geopolítica internacional de la cadena de suministro de cada una de las materias primas reconocidas como críticas puede ser descrita en términos de una combinación, en determinadas proporciones, de las cuatro situaciones básicas arriba descritas, en la cual las empresas refinadoras ocupan una posición superior en la cadena de valor con respecto a la de los productores de concentrados.

## Distribución de minerales críticos en Cuba

La geología de Cuba se caracteriza por la presencia de varios ambientes geotectónicos. Ellos son: margen continental distensivo asociado a una cuenca de rift, arcos volcánicos insulares, corteza oceánica (ofiolitas), orogénico y de intraplaca. Dentro de ellos se distinguen diversos ambientes deposicionales. Así, en los márgenes continentales (de los bloques Maya y Bahamas-Florida) hay secuencias siliciclásticas y carbonatadas, en los arcos volcánicos insulares hay secuencias pertenecientes a las series toleítica, calcoalcalina y alcalina. A su vez, están representadas sus diferentes partes: antearco, arco (con el eje magmático principal) y trasarco. Dentro de las ofiolitas aparecen todos los niveles del corte ofiolítico, en tanto el ambiente orogénico incluye cuerpos intrusivos subvolcánicos -de máficos a félsicos- así como granitoides generados por fusión parcial de corteza continental. En el ambiente de cuencas intraplaca, correspondiente a la cubierta neoauctótona neógeno-cuaternaria, aparecen las secuencias sedimentarias, químicas y mecánicas, así como las de origen supergénico.

En este contexto, en el territorio cubano existe un total de 41 modelos y 8 submodelos descriptivo-genéticos de depósitos metálicos, identificados con diferentes grados de certeza. A lo anterior se añaden otros 9 modelos y 2 submodelos de depósitos que pudieran estar presentes, aunque, hasta el momento, no se conocen depósitos pertenecientes a ellos.

El estudio de los modelos, unido al análisis de la interrelación espacio-temporal existente entre los tipos de depósitos localizados en los diferentes ambientes geodinámicos y unidades tectónico-estructurales de Cuba, ha permitido reconocer la presencia en el país de 10 sistemas minerales (Cazañas y otros, 2017).

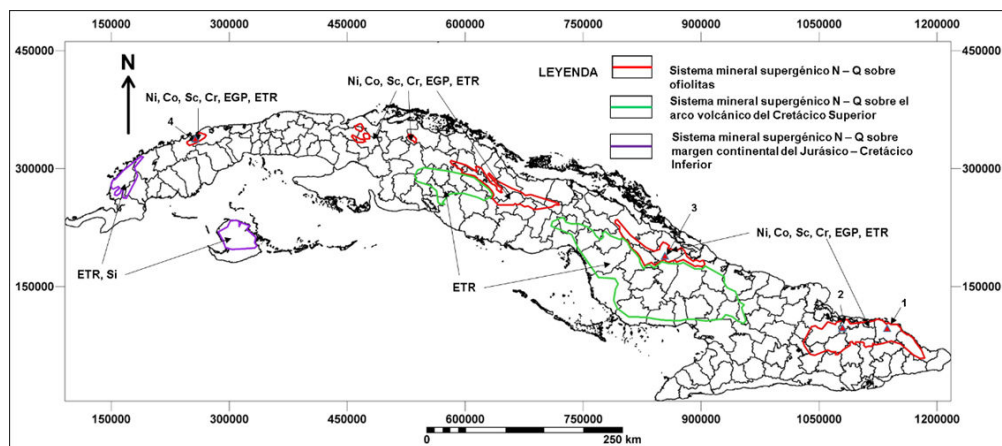
De esos sistemas minerales, los más perspectivas para materias primas críticas son:

- Sistema mineral supergénico (Figura 1), en particular el desarrollado sobre secuencias máfico-ultramáficas ofiolíticas (Ni, Co, Sc, Cr, EGP, ETR). De ellas, en la actualidad son objeto de explotación industrial Ni y Co, los cuales constituyen los productos principales de estas menas. Importantes y representativos depósitos de este tipo son los de los distritos minerales Moa y Nicaro, así como San Felipe y Cajálbana (Figura 1). Por otra parte, las secuencias supergénicas caoliníticas desarrolladas sobre el margen continental y el Arco Volcánico insular del Cretácico Superior pueden contener ETR, sobre todo en aquellas zonas con presencia de intrusivos graníticos. En este caso, sin embargo, hasta ahora, no hay identificado ningún depósito portador de ETR, por no existir estudio alguno al respecto.
- Sistema mineral (Figura 2) VMS bimodal máfico - vetas de Ag - Au en secuencias volcánicas - Mn volcanogénico tipo cubano del Eoceno Medio (Mn, Ge, In). En este sistema mineral se ubica la región patrón mundial de los depósitos de Mn volcanogénico tipo cubano (Mosier y Page, 1988), los cuales produjeron concentrado de esta materia prima crítica, también estratégica, como producto principal. Depósitos importantes y representativos de Mn son Las Margaritas y El Quinto (Figura 2), ambos en la provincia de Santiago de Cuba. Otro hecho a destacar en este sistema mineral es que, según

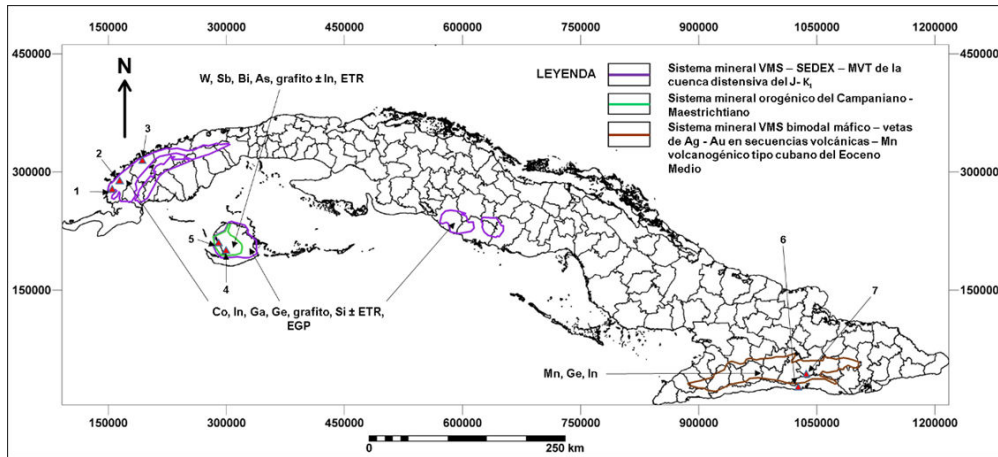
Álvarez, Saito y Yasuoka (1991), está probada la presencia de In y Ge en las menas del yacimiento El Cobre (Figura 2).

- Sistema mineral VMS máfico-silicoclástico -SEDEX- MVT (Figura 1) de la cuenca distensiva J- K<sub>1</sub> (Co, In, Ge, grafito, cuarzo de alta pureza ± ETR, EGP), todos los cuales aparecen como elementos acompañantes de Cu y Zn (±Au). Es de destacar el hecho de que, en este sistema mineral, a diferencia del anterior, el Co se presenta en forma de sulfuros, por lo general como piritita cobaltífera, donde constituye un sustituto isomórfico del Fe. Depósitos importantes donde está comprobada la presencia de In, Ge y Co son Unión- Juan Manuel y Hierro Mantua. Los dos primeros elementos mencionados se encuentran también en las menas del distrito mineral Santa Lucía-Castellanos (Figura 2). El grafito y el cuarzo de alta pureza aparecen en las secuencias con metamorfismo regional.
- Sistema mineral orogénico (Figura 2) del Campaniano-Maastrichtiano (W, Sb, Bi, As, grafito ± In, ETR, cuarzo de alta pureza). Mientras el W y grafito pueden ser productos principales, las demás constituirían subproductos arrastrados por los productos principales Cu y Au. La presencia de cuerpos intrusivos de granitoides abre posibilidades a la presencia de otras materias primas críticas. En este sentido, un importante factor, aún por determinar, es la filiación geoquímica (I o S) de los mismos. Depósitos representativos de este tipo son Lela y La Demajagua, ubicados ambos en el Municipio Especial Isla de la Juventud (Figura 2).

En Cuba existen otras posibilidades para materias primas críticas. En este sentido, en los depósitos de Cu - Mo ± Au porfírico de los arcos volcánicos insulares del Cretácico y del Paleógeno, aunque hasta ahora no se ha realizado ninguna determinación analítica para este elemento, cabe esperar la presencia de Re en concentraciones de interés, en virtud de la conocida regularidad metalogénica mundial, según la cual, los depósitos porfíricos formados en ambientes geotectónicos de arcos volcánicos insulares y con importante influencia del aporte del manto, son portadores de los más altos contenidos de Re en molibdenita (Sinclair y Jonasson, 2014; Sinclair et al., 2016; Plotinskaya y otros, 2019). Por otra parte, hay grafito en los macizos metamórficos Isla de la Juventud y Guamuhaya, aunque su carácter amorfo y frecuente entrecrecimiento con otros minerales limitan sus perspectivas en lo que a la obtención de grafito altamente purificado se refiere. Por último, se tiene la existencia de depósitos de arena sílice de alta pureza (en Pinar del Río) y de vetas de cuarzo igualmente de alta pureza (en Sancti Spíritus).



**FIGURA 1.** Distribución de las materias primas críticas en el sistema mineral supergénico del Neógeno-Cuaternario en el mapa de división político-administrativa municipal de Cuba. La figura muestra, de modo diferenciado, las áreas de este sistema mineral sobre ofiolitas, rocas del arco volcánico del K<sub>2</sub> y secuencias sedimentarias (metamorfizadas o no) del margen continental del J - K<sub>1</sub> pertenecientes al Bloque Maya. Depósitos representativos: 1. Moa (Yagrumaje, Camarioca y otros). 2. Nicaro (Luz, Martí y otros). 3. San Felipe. 4. Cajalbana



**Nota a la fig. 2:** Como puede apreciarse, en la Isla de la Juventud los dos primeros sistemas mencionados en la leyenda se superponen en el espacio, siendo el segundo más joven que el primero. Por otro lado, el tercero de los sistemas minerales presentados se extiende por el flanco septentrional del eje del arco volcánico insular del Paleógeno Sierra Maestra-Caimán y por su cuenca de trasarco. Depósitos representativos: 1. Unión-Juan Manuel. 2. Hierro Mantua. 3. Santa Lucía -Castellanos. 4. Lela. 5. La Demajagua. 6. El Cobre. 7. La Margarita y El Quinto

**FIGURA 2.** Distribución de los principales sistemas minerales endógenos portadores de materias primas críticas en el mapa de división político-administrativa municipal de Cuba

## CONCLUSIONES

1. El concepto de materia prima crítica tiene un componente geológico y otro económico-geopolítico y comercial. El primero viene dado por la escasez de depósitos minerales donde ellas se concentran, un hecho derivado, en lo fundamental, de su comportamiento geoquímico en la corteza terrestre.
2. Las materias primas críticas con menor distribución geológica, por el número de modelos de depósitos en los cuales se presentan, son: Al, B, Be, Cs, fluorita, feldespato, grafito, Hf, Li, Rb, Re, Sc, Sr, Ta, Te y Zr. En cambio, los de mayor distribución geológica por modelo son Co, EGP y W, seguidos por Sb y Sn. Sin embargo, mayor número de modelos no necesariamente implica mayor abundancia en términos de recursos minerales evaluados disponibles. Un ejemplo muy ilustrativo de esto son los EGP, pues la mayoría aplastante de sus recursos y reservas se concentran en solo dos modelos de depósitos, ambos asociados a un mismo medioambiente deposicional (intrusivos máfico-ultramáficos estratificados).
3. La distribución de los recursos geológicos (evaluados y potenciales por descubrir) de materias primas críticas en Cuba se concentran en cuatro sistemas minerales. De ellos, el más perspective, por la magnitud de su riqueza en recursos de mena, es el sistema mineral supergénico, portador de Ni, Co, Sc, Cr, EGP y ETR.
4. En Cuba hay posibilidades, aún sin evaluar, para ETR adsorbidos en arcillas y para Re en depósitos porfíricos. En sentido general, el grado de estudio de los minerales críticos en los depósitos minerales cubanos es bajo.

## REFERENCIAS

- Aiglsperger, T. y otros (2013): Occurrence of scandium and rare earth elements in laterites from Cuba and the Dominican Republic. *MINERIA'2013, VI Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niqulíferas*. La Habana. Cuba.
- Alldrick, D. J. (1995): Subaqueous Hot Spring Au-Ag. In D. V. Lefebure and G. E. Ray (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal*. Open File 1995-20. pp. 55-58. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment.

- Álvarez, A.; Saito, A.; Yasuoka, T. (1991): *Distribución de elementos secundarios en menas cubanas y productos de procesamiento industrial*. II Simposio Internacional de Minería y Metalurgia (MINEMETAL`91). Memorias, Tomo II. pp.703 - 711.
- Artiaga, D.; Torres, B.; Torró, L.; Tauler, E.; Melgarejo, J. C.; Arce, O. R. (2013): The Viloco Sn-W-Mo-As deposits, Bolivia: geology and mineralogy. *Mineral deposit research for a high-tech world. 12<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting 2013*. Proceedings, Volume 3. Hydrothermal ore-forming processes. 1239 - 1242.
- Birkett, T. C.; Simandl, G. J. (1999): Carbonatite-associated Deposits: Magmatic, Replacement and Residual. In G. J. Simandl, Z. D. Hora and D. V. Lefebure (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 3 - Industrial Minerals. Open File 1999-10*. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Energy and Mines.
- Bliss, J. D.; Cox, D. P. (1986): Grade and tonnage model of polymetallic veins. In D. P. Cox and D. A. Singer (Eds.) *Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin* (1693) p. 291. Washington D.C: United States government printing office.
- Bradley, D. C.; McCauley, A. D.; Stillings, L. M. (2017): Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-O*, p. 48, <https://doi.org/10.3133/sir201050700> . ISSN 2328-0328 (online).
- Cazañas, X.; Torres, J. L.; Lavaut, W.; Cobiella, J. L.; Capote, C. R.; González, V.; López, J. M.; Bravo, F.; Llanes, A. I.; González, D.; Ríos, Y.; Ortega, Y.; Yasmany, R.; Pantaleón, G.; Torres, M.; Figueroa, D. (2017): *Metalogenia de Cuba. Memoria Explicativa del Mapa Metalogénico de Cuba a escala 1:250 000*. 176 p. La Habana, Centro Nacional de Información Geológica. ISBN 978-959-7117-77-3.
- Chang, Z. S.; Shu, Q. H.; Meinert, L. D. (2019): Skarn deposits of China. *Economic. Geology*, No. 22. pp. 189 - 234.
- Comisión Europea (2017): *Comunicación de la comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones relativa a la lista de 2017 de materias primas fundamentales para la UE*. COM 490 final, versión en español. Bruselas.
- Commonwealth of Australia (2019): *Australia's critical minerals strategy* 18 p. <http://www.austrade.gov.au>
- Cox, D. P., Singer, D. A. Eds. (1986): Mineral deposit models: *Geological Survey Bulletin*. No. 1693. p. 1-10. Washington D.C: United States government printing office.
- Cox, D. P.; Lindsey, D. A.; Singer, D. A.; Moring, B. C.; Diggle, M. F. (2007): Sediment-Hosted Copper Deposits of the World. Deposit Models and Database. *Open-File Report 03-107*. Version 1.3. Available online en: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-107/>
- Dill, H. G. (2009): The "chessboard" classification scheme of mineral deposits. Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews* 100. p. 1 - 420. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>.
- Eliopoulos, D. G.; Economou-Eliopoulos, M. (2000): Geochemical and mineralogical characteristics of Fe-Ni and bauxitic laterite deposits of Greece. *Ore Geology Reviews*. 16. pp. 41 - 58.
- Emsbo, P.; Seal, R. R.; Breit, G. N.; Diehl, S. F.; Shah, A. K. (2016): Sedimentary exhalative (sedex) zinc-lead-silver deposit model: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-N*, 57 p. <http://dx.doi.org/10.3133/>
- European Commission (2010): *Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw material*. Available in: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/rawmaterials/documents/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/rawmaterials/documents/index_en.htm)
- European Commission Enterprise and Industry (2014): *Report on Critical Raw Materials for the EU*. Brussels: European Commission, p. 41.
- European Commission (2017): *Methodology for establishing the EU list of critical raw materials. Raw materials guidelines*, 25 pp Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-68051-9. <https://doi.org/10.2873/769526>
- Fan, M.; Ni, P.; Pan, J.; Wang, G.; Din, J.; Chu, Sh.; Li, W.; Huang, W.; Zhu, R.; Chi, Zh. (2023): Rare disperse elements in epithermal deposit: Insights from LA-ICP-MS study of sphalerite

- at Dalingkou, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 244, Id. 107124. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107124>
- Foley, N. K.; Seal II, R. R.; Piatak, N. M.; Hetland, B. R. (2010): An occurrence model for the national assessment of volcanogenic beryllium deposits: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1195*, p. 4.
- Fortier, S. M.; Hammarstrom, J. H.; Ryker, S. J.; Day, W. C.; Seal, R. R. (2019): USGS critical minerals review Annual Review (2018). *Mining engineering* (May 2019), pp. 35 - 47. <https://www.miningengineeringmagazine.com>
- Fortier S. M.; Nassar, N. T.; Lederer, G. W.; Brainard, J.; Gambogi, J.; McCullough, E. A. (2018): Draft Critical Mineral List-Summary of Methodology and Background Information-U.S. Geological Survey Technical Input Document in Response to Secretarial Order No. 3359. *Geological Survey Open-File Report 2018-1021*, 15 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr20181021>
- Geoscience Australia (2022): *Critical minerals at Geoscience Australia*. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/critical-minerals> . Last updated: 5 July 2023.
- Gislev, M.; Grohol, M.; European Commission (2018): *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-79-94626-4. <https://doi.org/10.2873/167813>.
- Grohol, M.; Veeh, C.; DG GROW, European Commission (2023): *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 Final Report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-68-00414-2. <https://doi.org/10.2873/725585>.
- Gross, G. A. (1996): Algoma-type Iron-formation. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. Open File 1996-13*, pp. 25-28. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Gross, G. A.; Gower, C. F.; Lefebure, D. V. (1997): Magmatic Ti-Fe±V Oxide Deposits. In: *Geological Fieldwork. Paper 1998-1*, pp. 24J-1-24J-3. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Gupta, V.; Biswas, T.; Ganesan, K. (2016): *Critical Non-Fuel Mineral Resources for India's Manufacturing Sector. A Vision for 2030*. CEEW Report, p. 75. New Delhi: National Science and Technology Management Information System (NSTMIS), Department of Science & Technology, Government of India.
- Hofstra, A. H. and Kreiner, D. C. (2020): Systems-Deposits-Commodities-Critical Minerals Table for the Earth Mapping Resources Initiative (version 1.1, May 2021): *U.S. Geological Survey Open-File Report 2020-1042*, p. 26. <https://doi.org/10.3133/ofr20201042> .
- Hora, Z. D. (1996a): Vein Barite. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. Open File 1996-13*. pp. 81 - 84. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Hora, Z. D. (1996b): Vein Fluorite-barite. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits Open File 1996-13*. pp. 85 - 88. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Hora, Z. D. (2010a): Feldspar-rich Rocks (Alaskite). In: *British Columbia Mineral Deposit Profiles Listed by Deposit Group, R14*. Vancouver, B.C: Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources.
- Hora, Z. D. (2010b): Nepheline Syenite. In *British Columbia Mineral Deposit Profiles Listed by Deposit Group. R13*. Vancouver, B.C: Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources.
- Hosking, K. F. G. (1982): A general review of the occurrence of tungsten in the world. In: J. V. Hepsworth, (ed.) *Symposium on Tungsten Geology, Jiangxi, China* (pp. 59-86). ESCAP/RMRDC Bandung: Indonesia and Geological Publishing House, Beijing, China.
- Hulbert, L. J.; Grégoire, D. C.; Paktunc, D.; Carne, R. C. (1992): Sedimentary nickel, zinc and platinum-group elements mineralization in Devonian black shales at the Nick property, Yukon, Canada. A new deposit type. *Exploration Mining Geolog.*, 139-62.

- Huston, D. L.; Mernagh, T. P.; Hagemann, S. G.; Doublier, M. P.; Fiorentini, M.; Champion, D. C.; Jaques, A. L.; Czarnota, K.; Cayley, R.; Skirrow, R.; Bastrakov, E. (2016): Tectono-metallogenic systems-The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. *Ore Geology Reviews*, 76, 168-210. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.005>].
- Jiménez-Franco, A.; Alfonso, P.; Canet, C.; Trujillo, J. E. (2018): Mineral chemistry of In-bearing minerals in the Santa Fe mining district, Bolivia. *Andean Geology*, 45 (3) 410-432. <https://doi.org/10.5027/andgeoV45n3-3052> .
- Lazarenkov, V. G.; Tijomirov, I. N.; Zhidkov, A. Y.; Talovina, I. V. (2005): Platinum Group Metals and Gold in supergene Nickel ores of the Moa and Nikaro deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resources*, 40 (6): 521-527 (translation). Original work published in: *Litologiya i Poleznie Iskopaemye* (6), 600-608.
- Laznicka, P. (2010): *Giant Metallic Deposits. Future Sources of Industrial Metals*. Second edition, 961 pp. Berlin Heidelberg 2006, 2010: Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-12404-4 e-ISBN 978-3-642-12405-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12405-1>.
- Lefebure, D. V. (1996): Five-element Veins Ag - Ni - Co - As ± (Bi, U). In: D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. Open File*, 89-91, Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources.
- Levson, V. M. (1995a): Marine Placers. In D. V. Lefebure and G. E. Ray (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal. Open File 1995-20*. 29-31. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment.
- Levson, V. M. (1995b): Surficial Placers. In D. V. Lefebure and G. E. Ray (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal. Open File 1995-20*. 21-23. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment.
- Levson, V. M.; Levson, G.; Timothy, R. (1995): Buried-Channel Placers. In D. V. Lefebure and G. E. Ray (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal. Open File*, 25-28. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment.
- Lusty, P. A. J.; Shaw, R. A.; Gunn, A. G.; Idoine, N. E. (2021): UK criticality assessment of technology critical minerals and metals. *British Geological Survey Commissioned Report, CR/21/120*, p. 76. Nottingham: British Geological Survey.
- McCuaig, T. C.; Beresford, S.; Hronsky, J. (2010): Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews*, 38 (3), 128-138. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.008>] .
- McMillian, R. H. (1996): "Classical" U Veins. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits Open File*, 93-96. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Mao, J.; Lehman, B.; Du, A. y otros (2002): Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geologic significance. *Economic Geology*, 97, 1051-1061.
- Ministry of Mines of India (2023): *Critical minerals for India. Report of the Committee on Identification of Critical Minerals*, 41 pp. <http://www.mines.gov.in>.
- Mosier, D. L. (1986): Grade and tonnage model of epithermal Mn. In D. P. Cox and D. A. Singer (Eds.) Mineral deposit models. *U.S. Geological Survey Bulletin 1693*, 166-167. Washington D.C: United States government printing office.
- Mosier, D. L. and Page, N. J. (1988): Descriptive and grade - tonnage models of volcanogenic manganese deposit in oceanic environments-A modification. *US Geological Survey Bulletin 1811*, p. 28.
- Nelson, J. L. (1996): Polymetallic Mantos Ag-Pb-Zn. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits Open File*, 101 -104). Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.

- Nixon, G.T. (1996): Alaskan-type Pt+/-Os+/-Rh+/-Ir. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits Open File*, pp. 113 - 116. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Office of the Chief Economist, Department of Industries, Science, Energy and Resources (2021): *Outlook for Selected Critical Minerals: Australia*. Australian Government. ISBN 978-1-922125-88-0 and ISBN 978-1-922125-89-7. <http://www.industry.gov.au/oce>.
- Panteleyev, A. (1996a): Sn-Ag Veins. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. Open File*, pp. 45-47. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Panteleyev, A. (1996b): Stibnite Veins and Disseminations. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. Open File*, 7- 80. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Paradis, S. and Simandl, G. J. (1996): Cryptocrystalline Ultramafic-hosted Magnesite Veins. In, D. V. Lefebure and T. Höy (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits Open File*, 97-100. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Paradis, S. M.; Hannigan, P.; Dewing, K. (2007): Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits. In W. D. Goodfellow (Ed.) *Mineral deposits of Canada. A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Special Publication no. 5*, 185-203. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.
- Pavlova, G. G.; Palessky, S. V.; Borisenko, A. S.; Vladimirov, A. G.; Seifert, T.; Phan, L. A. (2015): Indium in cassiterite and ores of tin deposits. *Ore Geology Reviews* 66, 99-113.
- Plotinskaya, O.; Abramova, V.; Bondar, D.; Seltmann, R.; Spratt, J. (2019): Porphyry Cu(Mo) deposits of the Urals: insights from molybdenite trace element geochemistry. *Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting, 27-30 August, Glasgow, Scotland*, pp. 1019-1022. The Society for Geology Applied to Mineral Deposits.
- Ryan, B. (1995): Bituminous Coal. In D. V. Lefebure and G. E. Ray (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallics and Coal*, pp. 13-15. Vancouver, B.C: British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment.
- Santana, I. V.; Botelho, N. F. (2022): REE residence, behaviour and recovery from a weathering profile related to the Serra Dourada Granite, Goiás/Tocantins States, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 143, Id. 104571. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104751>.
- Schulte, R. F.; Taylor, R. D.; Piatak, N. M.; Seal II, R. R. (2010): Stratiform chromite deposit model: U.S. *Geological Survey Open-File Report -1232*, p. 7.
- Schulz, K.J.; Woodruff, L. G.; Nicholson, S. W.; Seal II, R. R.; Piatak, N. M.; Chandler, V. W.; Mars, J. L. (2014): Occurrence model for magmatic sulfide-rich nickel-copper-(platinum-group element) deposits related to mafic and ultramafic dike-sill complexes: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-I*, p. 80. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070I>.
- Simandl, G. J.; Kenan, W. M. (1997a): Microcrystalline Graphite. *In Geological Fieldwork. Paper 1998-1*, pp. 240-1 to 240-3: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Simandl, G. J.; Kenan, W. M. (1997b): Crystalline Flake Graphite. *In Geological Fieldwork. Paper 1998-1*, pp. 24P-1 to 24P-3: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Simandl, G. J.; Kenan, W. M. (1997c): Vein Graphite in Metamorphic Terrains. *In Geological Fieldwork. Paper 1998-1*, pp. 24Q-1 to 24Q-3: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Simandl, G. J. and Hancock, K. (1998): Sparry Magnesite, *in Geological Fieldwork 1997, Paper 1*, pp. 24E-1 to 24E-3). Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- Simandl, G. J. and Ogden, D. (1999): Ultramafic-hosted Talc- Magnesite. In G. J. Simandl, Z. D. Hora and D. V. Lefebure (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 3*

- *Industrial Minerals. Open File 10*. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Energy and Mines.
- Simandl, G. J.; Paradis, S.; Birkett, T. (1999): Schist-hosted Emeralds, In G. J. Simandl, Z. D. Hora and D. V. Lefebure (Eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 3 - Industrial Minerals. Open File 10*. Vancouver, B. C: British Columbia Ministry of Energy and Mines.
- Sinclair, W. D.; Jonasson I. R. (2014): Highly siderophile elements (Re, Au and PGE) in porphyry deposits and their mantle origins. *Acta Geologica Sinica* 88 (2). 616-618.
- Sinclair, W. D.; Jonasson, I. R.; Kirkham, R. V.; Soregaroli, A. E. (2016): *Rhenium in Canadian mineral deposits, Open File 7780*, 58 p.
- Su, Y.; Hu, D. (2022): Global Dynamics and Reflections on Critical Minerals. ESAT 2022. *E3S Web of Conferences* 352, 03045 (2022). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235203045> .
- Torres, J. L.; Lavaut, W.; Cazañas, X. (2017): *Modelos descriptivo-genéticos de depósitos metálicos para el Mapa Metalogénico a escala 1:250 000 de la República de Cuba*, p. 267. Centro Nacional de Información Geológica. ISBN 978-959-7117-74-2. La Habana.
- U.S. Department of Energy. (2011): *Critical materials strategy* (DOE/PI-0009, 191 pp). Washington, D.C: U.S. Department of Energy, [Also available at [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf).]
- U.S. Department of Energy. (2023): *Critical Materials Assessment*. U.S. Department of Energy, draft report, 136 pp.
- U.S. Geological Survey. (2021): *2021 Draft List of Critical Minerals*. A Notice by the Geological Survey on 11/09/2021. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/11/09/2021-24488/2021-draft-list-of-critical-minerals> .
- US Geological Survey. (2022): *US Geological Survey release 2022 list of critical minerals*. Communications and Publishing February 22, 2022. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals> .
- U.S. Interior Department. (2018): *Draft List of Critical Minerals. A Notice by the Interior Department on 02/16/2018*. Federal register <https://www.federalregister.gov/documents/2018/02/16/2018-03219/draft-list-of-critical-minerals>
- Van Gosen, B. S.; Fey, D. L.; Shah, A. K.; Verplanck, P. L.; Hoefen, T. M. (2014): Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-L*, p. 51, <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070L> . ISSN 2328-0328 (online) .
- Verplanck, P. L.; Van Gosen, B. S.; Seal II, R. R.; McCafferty, A. E. (2014): A deposit model for carbonatite and peralkaline intrusion-related rare earth element deposits. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-J*, p. 58, <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070J> .
- Wyborn, L. A. I.; Heinrich, C. A. and Jaques A. L. (1994): *Australian Proterozoic mineral systems-Essential ingredients and mappable criteria*. Proceedings from Australasian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference, Darwin, Australia, 109-115. Darwin, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Zhao, Zh.; Wang, D.; Bagas, L.; Chen, Zh. (2022): Geochemical and REE mineralogical characteristics of the Zhaibei Granite in Jiangxi Province, southern China, and a model for the genesis of ion-adsorption REE deposits. *Ore Geology Reviews*, 140, Id. 104579. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104579> .
- Zientek, M. L. (2012): Magmatic ore deposits in layered intrusions-Descriptive model for reef-type PGE and contact-type Cu-Ni-PGE deposits. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1010*, p. 48.

**Jorge Luis Torres Zafra.** Graduado del Instituto Tecnológico de combustibles” Vitalio Acuña como Técnico Medio en Geofísica en julio de 1980; trabajó en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas No 2 (ENIA No 2) en trabajos de geofísica aplicada a la ingeniería geológica. En 1984 se incorporó a la Empresa Geológica de Pinar del Río donde participó en la ejecución de tres levantamientos gravimétricos a escala 1:50 000 en esa provincia, en el municipio especial Isla de la Juventud y en la parte Oeste de la provincia La Habana. En 1989 se graduó como Ingeniero Geólogo en el Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa con calificaciones sobresalientes, pasando a trabajar a finales de 1991 como ingeniero geólogo en la atención a canteras en la provincia La Habana por parte de la Unión Geominera, comenzando desde 1994 a trabajar en el Instituto de Geología y Paleontología. Desde entonces ha participado en numerosos proyectos de investigación, particularmente en la evaluación del potencial de recursos minerales (8 proyectos) y la metalogenia, participando en el proyecto del Mapa Metalogénico de la República de Cuba a escala 1:250 000 (2017) y del libro publicado con el mismo nombre y en el Mapa Metalogenético de América Central y el Caribe a escala 1:4.000.000 (2020). Es autor de varios artículos en revistas y de un capítulo del libro “Geology of Cuba” publicado en el 2021 por la editorial Springer. Tiene amplia experiencia como jefe de proyecto y posee la categoría científica de Investigador agregado desde el año 2004. En el año 2006 obtuvo el grado de Máster en Ciencias Geológicas (Mención Prospección de Yacimientos Minerales) en la Facultad de Geología y Mecánica de la Universidad Hermanos Saíz Montes De Oca, de Pinar del Río.