

**MATERIALES DE TIERRAS RARAS: PRODUCCIÓN, PROPIEDADES,
APLICACIONES INDUSTRIALES Y NECESIDAD TECNOLÓGICA**

(Autor)

LILIANA MARIBEL AGUILAR ECHEVERRÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, mes día de año

**MATERIALES DE TIERRAS RARAS: PRODUCCIÓN, PROPIEDADES,
APLICACIONES INDUSTRIALES**

(Autor) LILIANA MARIBEL AGUILAR ECHEVERRÍA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Directora: JENIFFER KATERINE CARRILLO GÓMEZ

Magister en Controles industriales

PhD (c). En Automática

PhD (c). Tecnologías para nanosistemas, bioingeniería y energía

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, diciembre 8 de 2021

Dedicatoria

La dedicatoria de esta monografía es especialmente para mi papá José Aguilar y a mi mamá Emilce Echeverría por siempre estar para mí, gracias por apoyarme y motivarme en el transcurso de la carrera, lo logré por ustedes, quiero que se sientan orgullosos de mí, no fue fácil cursar una carrera como ingeniería química, pero desde que hice un preuniversitario de ingenierías, sabía que era la carrera que quería.

AGRADECIMIENTOS

quiero agradecer primero a Dios sin el nada de esto fuera posible, a mis padres que fueron las personas incondicionales para mi formación como estudiante, agradecer a todos los docentes del departamento de ingeniería química, a mis compañeros de la carrera, a mis mejores amigos Natalia y Jhordan que estuvieron apoyándome en momentos complicados. Agradezco a el profesor Erik Yanza que me enseñó a ser más responsable, aparte de que repetí tres veces termodinámica II, quiero agradecer porque fue una de las materias que más tuvo peso ya que marcaba un antes y un después en la carrera, también quiero mencionar a la profesora Jaqueline Contreras que me enseñó transferencia de calor, y fue una de las materias que más me gusto, con ella supe que era perder una materia en 2.94 algo que me marco para siempre.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 Objetivo general.....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS, LOS MATERIALES DEL PRESENTE Y EL FUTURO.....	17
4.1 Definición de REE, LREE, HREE y lugar en la tabla periódica.....	17
4.2 Mineralogía de REE.....	18
4.2.1 Bastnaesita.....	19
4.2.2 Monacita.....	19
4.2.3 Otros minerales RE.....	20
4.3 Distribución y extracción a nivel mundial.....	20
4.3.1 Principales yacimientos.....	21
4.4 Procesamiento de minerales de tierras raras.....	22
4.4.1 Exploración de depósitos.....	22
4.4.2 Minería.....	23
4.4.3 Proceso de beneficio.....	24
4.4.3.1 Separación por gravedad.....	25
4.4.3.2 Separación por gravedad magnética.....	26
4.4.3.3 Separación por gravedad-flotación.....	26
4.4.4 Tratamiento químico.....	27
4.4.5 Proceso de separación.....	29
4.4.5.1 Extracción de disolventes e intercambio iónico.....	30
4.4.5.2 Fluido supercrítico.....	31
4.4.5.3 Bioabsorción.....	32

4.5	propiedades, descripción, historia y usos comunes de los ree	32
4.5.1	Propiedades generales de los REE.....	32
4.5.2	Lantano (La).....	34
4.5.2.1	Propiedades del La.....	34
4.5.2.2	Usos comunes del lantano	35
4.5.3	Cerio (Ce).....	35
4.5.3.1	Usos comunes del Cerio.....	35
4.5.3.2	Propiedades del cerio.....	36
4.5.4	Praseodimio (Pr)	36
4.5.4.1	Propiedades del praseodimio	37
4.5.4.2	Usos comunes de praseodimio	37
4.5.5	Neodimio (Nd).....	37
4.5.5.1	Propiedades del Neodimio.....	38
4.5.5.2	Usos comunes del Neodimio	38
4.5.6	Prometio (Pm).....	39
4.5.6.1	Propiedades del prometio	39
4.5.6.2	Usos comunes del prometio.....	39
4.5.7	Samario (Sm)	39
4.5.7.1	Propiedades del samario	40
4.5.7.2	Usos comunes del samario	40
4.5.8	Europio (Eu).....	40
4.5.8.1	Propiedades químicas de Europio.....	41
4.5.8.2	Usos comunes del Europio	41
4.5.9	Gadolinio (Gd).....	41
4.5.9.1	Propiedades del gadolinio.....	42
4.5.9.2	Usos de gadolinio	42

4.5.10	Terbio (Tb).....	42
4.5.10.1	Propiedades químicas	43
4.5.10.2	Usos comunes del Terbio	43
4.5.11	Disproso (Dy)	43
4.5.11.1	Usos comunes	44
4.5.12	Holmio (Hm).....	44
4.5.12.1	Propiedades del Holmio.....	45
4.5.13	Erbio (Er)	45
4.5.13.1	Propiedades del Erbio	45
4.5.13.2	Usos comunes del Erbio	46
4.5.14	Tulio (Th).....	46
4.5.14.1	Propiedades químicas del tulio	46
4.5.14.2	Usos comunes del tulio	46
4.5.15	Iterbio (Yb)	47
4.5.15.1	Propiedades del Iterbio	47
4.5.15.2	Usos comunes del Iterbio	48
4.5.16	Lutecio (Lu)	48
4.5.16.1	Propiedades químicas de lutecio.....	48
4.5.16.2	Usos comunes del Lutecio	49
4.5.17	Itrio (Y).....	49
4.5.17.1	Propiedades del Itrio	49
4.5.17.2	Usos comunes del Itrio	49
4.5.18	Escandio (Cs).....	50
4.5.18.1	Propiedades químicas del Escandio.....	50
4.5.18.2	Usos comunes del Escandio	51
4.6	Aplicaciones industriales de materiales de ree, ALGUNOS estudios recientes	51

4.6.1	Lantano (La).....	51
4.6.2	Cerio (Ce).....	52
4.6.3	Praseodimio (Pr)	54
4.6.4	Neodimio (Nd).....	55
4.6.5	Prometio (Pm).....	58
4.6.6	Samario (Sm)	59
4.6.7	Itrio (Y).....	62
4.6.8	Escandio (Cs).....	64
5.	CONCLUSIONES.....	67
6.	Anexos.....	68
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Producción mundial de REE, por país, 2019 (Lal, 2019).	20
Tabla 2. Algunas propiedades de REE; pm (picómetros)(Gupta & Krishnamurthy, 2016). ...	68
Tabla 3. Minerales primarios portadores de REE y sus fórmulas (Dostal, 2017).	69
Tabla 4. Fuentes minerales primarias de monacita y su contenido de tierras raras (porcentaje del óxido total de tierras raras) por depósitos a nivel mundial (Hedrick et al., 1999), (Kumari et al., 2015).	70
Tabla 5. Países productores y reservorios de REE (King, 2020).....	71
Tabla 6. Abundancia, recursos y producción de REE y Cobre (Haque et al., 2014).....	72
Tabla 7. Resumen sobre exploración greenfield y exploración brownfield (Suli et al., 2017).	73
Tabla 8. Resumen de diferentes tipos de adsorbentes para proceso de bioabsorción (Suli et al., 2017).	74
Tabla 9. Propiedades físicas del lantano (AZO Materials, 2021a).	75
Tabla 10. Propiedades físicas del Ce (AZO Materials, 2021f).	76
Tabla 11. Propiedades físicas de praseodimio (AZO Materials, 2012c).	77
Tabla 12. Neodimio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021h).	78
Tabla 13. Europio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021g).	79
Tabla 14. Gadolinio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021e).....	80
Tabla 15. Propiedades físicas del Terbio (AZO Materials, 2012d).	81
Tabla 16. Disproso - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021b).....	82
Tabla 17. Propiedades físicas del Holmio (AZO Materials, 2012b).....	83
Tabla 18. Erbio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021c).....	84
Tabla 19. Propiedades físicas del Tulio (AZO Materials, 2012e).	85
Tabla 20. Propiedades físicas de Iterbio (AZO Materials, 2021j).	85
Tabla 21. Propiedades físicas del Lutecio (AZO Materials, 2012a).....	86
Tabla 22. Itrio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021i).	87
Tabla 23. Escandio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021d).....	88
Tabla 24. Descubrimiento y origen en la tierra de los REE.....	89

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Tabla periódica de los elementos. Los LREE (incluyen el Sc en marrón) en morado y los HREE en naranja (King, 2020).	17
Imagen 2. Distribución global de carbonatita, incluido el depósito en la producción y los objetivos de exploración (Dushyantha et al., 2020).....	18
Imagen 3. Distribución promedio de elementos de tierras raras en cada depósito. (a) Bayan Obo, China; (b) Mountain pass, USA; (c) Mount Weld, Australia; (d) Lahat, Malasia. (Gambogi, 2015).....	21
Imagen 4. Esquema de los pasos de procesamiento de REE (Suli et al., 2017).	22
Imagen 5. Diagrama de flujo de beneficio del mineral del depósito de Bayan Obo (Li & Yang, 2014).	25
Imagen 6. Proceso de separación-flotación por gravedad en Mianning REE min (Li & Yang, 2014).	26
Imagen 7. Técnica de extracción de REE para elución de corteza erosionada - depósito de mineral REE (Li & Yang, 2014).....	29
Imagen 8. La contracción del lantánido se demostró trazando los radios de 3+ cationes en nueve coordinaciones. También se muestran los radios de los cationes de los otros estados de oxidación de lantánidos más comunes, al igual que los radios de Y^{3+} y Sc^{3+} (Gupta & Krishnamurthy, 2016).....	33
Imagen 9. Esquema del condensador MOS que tiene bicapas de ZrO_2/La_2O_3 . Las dimensiones de los diferentes materiales se muestran entre paréntesis (Mangla & Roy, 2021).	52
Imagen 10. Perfiles (a) H_2 -TPR de un SAPO-34 y (b) SAPO-34 optimizado (Varzaneh et al., 2015).	53
Imagen 11. Diagrama esquemático de la síntesis de nanopartículas de óxido de praseodimio (Zinatloo-Ajabshir & Salavati-Niasari, 2015).	55
Imagen 12. Protección de la cavidad de los conjuntos Nd contra la decoherencia (T. Zhong et al., 2017).	56
Imagen 13. Coeficiente de absorción para ZnO no dopado, ZnO dopado con átomo de Eu, ZnO dopado con átomo Pm y ZnO dopado con Eu, Pm codopado (El Hachimi et al., 2019).....	59
Imagen 14. Microestructura (MO) de las aleaciones (a) Mg fundido – 12% Gd – 1,4% Sm; (b) Mg – 12% Gd después del tratamiento térmico, que incluyó homogeneización a 515 ° C,	

enfriamiento + envejecimiento de 64 horas a +200°C recocido de 32 horas a 250°C para la aleación en (b) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).	60
Imagen 15. La dureza de las aleaciones de Mg-Gd-Sm y Mg-Gd (1 - 4 son las mismas que en la Fig.1) tras el recocido isotérmico a 250 ° C para la recuperación después del endurecimiento por envejecimiento a 200 ° C durante 64 h (τ_{ann} es el recocido tiempo) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).....	61
Imagen 16. Dureza HB de las aleaciones de magnesio templadas al envejecer a 200 ° C: (1) Mg – 12% Gd – 2,1% Sm, (2) Mg – 12% Gd – 1,4% Sm, (3) Mg – 12% Gd– 0,7% Sm y (4) Mg – 12% Gd (τ_{ag} es el tiempo de envejecimiento) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).	61
Imagen 17. El nano-AFL optimizado se fabricó mediante recocido posterior a 1300°C durante 1h después de PLD con una composición volumétrica de 50:50(Ni: BZY), mientras que el nano-AFL no optimizado mediante recocido posterior a 1200°C durante 1 h. (a) Perfiles de OCV obtenidos durante la reducción del ánodo en los que la concentración de H ₂ se varió del 0% al 100% con N ₂ equilibrado en el gas de alimentación en el lado del ánodo (Bae et al., 2017).	63
Imagen 18. Estructura optimizada de (a) C ₂₄ +Sc+H ₂ (b) C ₂₄ +Sc+3H ₂ (c) C ₂₄ +Sc+5H ₂ (d) C ₂₄ +Sc+6H ₂ composiciones (Mahamiya et al., 2022).	65
Imagen 19. 1,5 gramos de lantano puro. Tamaño original en cm: 1 x 1, almacenado en una ampolla de vidrio llena de argón (Images of Elements, 2016f).	89
Imagen 20. Cerio ultrapuro bajo argón, 1,5 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1 (Images of Elements, 2016a).....	89
Imagen 21. Piezas de praseodimio ultrapuras bajo argón, 1,5 gramos. Tamaño original en cm: 0,5 – 1 (Images of Elements, 2016h).	90
Imagen 22. Neodimio ultrapuro bajo argón, 5 gramos. Longitud original de la pieza grande en cm (Britannica, 2021h).	90
Imagen 23. Prometio puro (Indiamart, 2021)	91
Imagen 24. Samario ultrapuro sublimado, 2 gramos. Tamaño original en cm: 0,8 x 1,5 (Images of Elements, 2016i).	91
Imagen 25. Europio débilmente oxidado, por lo tanto, ligeramente amarillento. 1,5 gramos, pieza grande 0,6 x 1,6 cm (Images of Elements, 2016d).	92

Imagen 26. Gadolinio amorfo ultrapuro, 12 gramos. Tamaño original en cm: 1,5 x 2 (Images of Elements, 2016e).	92
Imagen 27. Terbio puro, 3 gramos. Tamaño original: 1 cm (Images of Elements, 2016k).....	93
Imagen 28. Dendritas de disprosio ultrapuras. Tamaño original en cm: 2 x 2 (Images of Elements, 2016b).	93
Imagen 29. Holmio ultrapuro, 17 gramos. Tamaño original 1.5 x 2.5 cm (Images of Elements, 2016b)	94
Imagen 30. Erblio ultrapuro con trazas cortadas, 25 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 2 x 2 (Images of Elements, 2016c).	94
Imagen 31. Tulio cristalino ultrapuro, 22,3 gramos. Tamaño original en cm: 2,5 x 3 (Images of Elements, 2017a).....	95
Imagen 32. Iterbio ultrapuro, 2 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1,5 (Images of Elements, 2017b).	95
Imagen 33. Pieza ultrapura de lutecio, 3 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1 (Images of Elements, 2016g)	96
Imagen 34 Cristal de itrio ultrapuro por dos caras. Tamaño original en cm: 2 x 3 (Images of Elements, 2016l).	96
Imagen 35. Escandio cristalino ultrapuro, 5 gramos. Tamaño original en cm: 2 (Images of Elements, 2016j).	97

GLOSARIO

AFC - Peine de frecuencia atómica
AIMD - Dinámica molecular ab-initio
AWD - Dispositivos de ondas acústicas
BZY - Zirconato de bario dopado con itrio
DFT - Teoría del funcional de la densidad
EDS – Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva
FT-IR – Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier
HIMS - Separación magnética de alta intensidad
HREE – Elementos de tierras raras pesados
LIMS - Separación magnética de baja intensidad
LREE – Elementos de tierras raras ligeros
MO – Microestructura de las aleaciones
MOS - Capacitores semiconductores de óxido de metal
MRI - Imágenes por resonancia magnética
PCFC - Celdas de combustible de cerámica protónica
PEG – Polietilenglicol
PLD – deposición por láser pulsado
RE – Tierras Raras
REE – Elementos de tierras raras
REM - Metales de tierras raras
REO – Óxidos de tierras raras
SCF - Método de fluido supercrítico
TCO – Óxidos conductores transparentes
TEMED – Tetrametiletilendiamina
TPR - Reducción programada de temperatura
TSCM - Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
UV – Ultravioleta
XRD – Patrones de difracción de rayos X en polvo
YAG - Granate de itrio-aluminio
YIG - Granate de itrio-hierro

1. INTRODUCCIÓN

Primero se inició la investigación con la definición de REE y sus derivados, se buscó información sobre los principales minerales que contienen los REE en la corteza terrestre. La distribución de los principales yacimientos, la composición mineral de algunos de ellos además de los principales países que los producen. Se investigó acerca del procesamiento de los REE y los pasos correspondientes (Exploración, Minería, Proceso de Beneficio y las diferentes técnicas de separación primarias de otras materias primas, Tratamiento químico, Procesos de separación individuales de cada uno de los REO para su posterior refinación u uso en los materiales de REE. Se realizó la búsqueda de las propiedades físicas y químicas, descripción, usos comunes, historia e imágenes de cada uno de los REE Finalmente se realizó a búsqueda de artículos recientes sobre la aplicación de algunos de los REE en materiales, encontrando investigaciones para el aumento en rendimiento en catalizadores, transferencia de información cuántica con fotones de banda ancha en redes de comunicación cuántica óptica de alta velocidad, uso en optoelectrónica y espintrónica, uso en electrolitos para pilas de combustible de alto rendimiento y materiales para el almacenamiento de hidrogeno en estado sólido.

Para realizar la búsqueda de artículos correspondientes al tema de la monografía se usaron las siguientes bases de datos proporcionadas por la plataforma de la Universidad de Pamplona: Science Direct, Scopus, Springer Link, Oxford Journals, Nature y Taylor and Francis Online. Además de hacer uso del buscador Google Scholar y la base de datos Encyclopedia Britannica para a historia, propiedades y usos comunes, la página sobre materiales AZOM para las propiedades físicas de cada uno de los REE. palabras clave: Rare Earth, electronics industry, semiconductors, LED, materials, alloys Lanthanum, Cerium, Praseodymium, Neodymium, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium. También se usaron las herramientas de búsqueda de las bases de datos para que los artículos buscados fueran del tema de ciencia de materiales.

2. JUSTIFICACIÓN

Se realizó una búsqueda de estudios que englobaran temas como la producción, propiedades y aplicaciones industriales sobre materiales de cada uno de los REE, además de la necesidad tecnológica de estos, a pesar de que se encontraron generalidades y temas específicos no se encontró un estudio que recopilara todos estos temas, por tanto, Se justifica la realización de dicho estudio ya que aportaría una visión desde el punto de vista de materiales sobre los REE además de la importancia cada vez mayor de estos metales en la tecnología moderna (American Geosciences Institute, 2021). Se hace necesario un estudio que recopile una serie de artículos recientes que reflejen en donde están ubicados los yacimientos minerales, los principales países productores y las razones de la competencia entre estas naciones, las propiedades de materiales que usan cada uno de los REE.

Los REE aportan a diversos materiales una serie de propiedades ópticas, magnéticas y catalíticas específicas que impulsan la demanda en una amplia gama de aplicaciones. Estos metales se han vuelto muy críticos en la industria electrónica moderna con aplicaciones en computadores, celulares, monitores, baterías recargables, lentes de cámaras, LED, lámparas fluorescentes (Balaram, 2019).

Como materiales esenciales y funcionales, los REE se han denominado "Las vitaminas de la industria moderna". Sus productos pueden no solo ser capaces de satisfacer las necesidades de ser más rápidos, más livianos, más pequeños y más eficientes, sino también juegan un papel importante en el desarrollo de las industrias (Metalpedia, 2021).

Existen una multitud de artículos científicos sobre la adición de REE a los materiales con el fin de mejorar sus propiedades (Science Direct, 2021). Los REE en muchos procesos y productos industriales son esenciales y muy difíciles de remplazar, ya que usar otro tipo de materiales empeoraría las propiedades o directamente no existen alternativas de materiales que aporten las propiedades que necesita en la industria para satisfacer las necesidades.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

EVALUAR LAS APLICACIONES INDUSTRIALES, PROPIEDADES Y NECESIDAD TECNOLÓGICA DE LOS MATERIALES DE TIERRAS RARAS Y LA DISTRIBUCIÓN-PRODUCCIÓN DE ESTAS A NIVEL MUNDIAL

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- MOSTRAR LA DISTRIBUCIÓN MINERAL Y LA PRODUCCIÓN DE LOS REE EN EL MUNDO
- ESTUDIAR PROPIEDADES QUE APORTAN CADA UNO DE LOS REE EN DIVERSOS MATERIALES
- MENCIONAR LAS APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS MATERIALES DE REE
- EVIDENCIAR LA NECESIDAD TECNOLÓGICA DE LOS REE EN LA INDUSTRIA

4. ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS, LOS MATERIALES DEL PRESENTE Y EL FUTURO

4.1 DEFINICIÓN DE REE, LREE, HREE Y LUGAR EN LA TABLA PERIÓDICA

Las tierras raras o elementos de tierras raras, rare earth elements (REE) por sus siglas en inglés son un grupo de 17 elementos químicos, 15 son los lantánidos (Lantano, Cerio, Praseodimio, Neodimio, Prometio, Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disproso, Holmio, Erblio, Tulio, Iterbio y Lutecio) más el Escandio e Itrio (IUPAC, 2007).

HEAVY Rare Earth Elements
LIGHT Rare Earth Elements
by Geology.com

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
Lanthanides																		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Actinides																		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Imagen 1. Tabla periódica de los elementos. Los LREE (incluyen el Sc en marrón) en morado y los HREE en naranja (King, 2020).

La definición de la IUPAC divide los REE en REE ligeros LREE (Lantano (La) - Samario (Sm)) y REE pesado HREE (Europio (Eu) - Lutecio (Lu)) basándose en su masa atómica (Coint et al., 2019). Aunque el Y es más ligero que los LREE, se incluye en el grupo de HREE debido a sus asociaciones químicas y físicas con las HREE en depósitos naturales (King, 2020). El Sc se considera un LREE (Ignacio et al., 2014).

En la naturaleza, los REE casi siempre ocurren en el estado de valencia +3 (es decir, forman el óxido REE_2O_3) pero hay dos excepciones importantes en ambientes naturales. En ambientes oxidantes, como depósitos meteorizados y depósitos de agua de mar, Ce forma Ce^{4+} (CeO_2), un catión mucho más pequeño, y en ambientes reductores, Eu forma el catión Eu^{2+} más grande (Imagen 8). En el laboratorio, también se conocen valencias +2 para Sm, Tm, Yb; Pr_6O_{11} es un óxido sintético mixto ($4\text{PrO}_2 \cdot \text{Pr}_2\text{O}_3$) (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

4.2 MINERALOGÍA DE REE

Los minerales que contienen tierras raras suelen estar dominados por HREE o LREE. Los minerales que contienen predominantemente itrio y los HREE incluyen gadolinita, xenotima, samarskita, euxenita, fergusonita, itrotantalita, itrotungstita, ittrialita. Los minerales que contienen predominantemente LREE incluyen bastnasita, monacita, allanita, loparita, ancilita, parásito, lanthanita, quevinita, cerita, stillwellita, britolita, fluocerita y cerianita. Los minerales primarios portadores de REE y sus fórmulas se encuentran en la Tabla 3. Sin embargo, las minas que operan comercialmente en todo el mundo extraen principalmente minerales de bastnasita, monacita y xenotima (Haque et al., 2014).

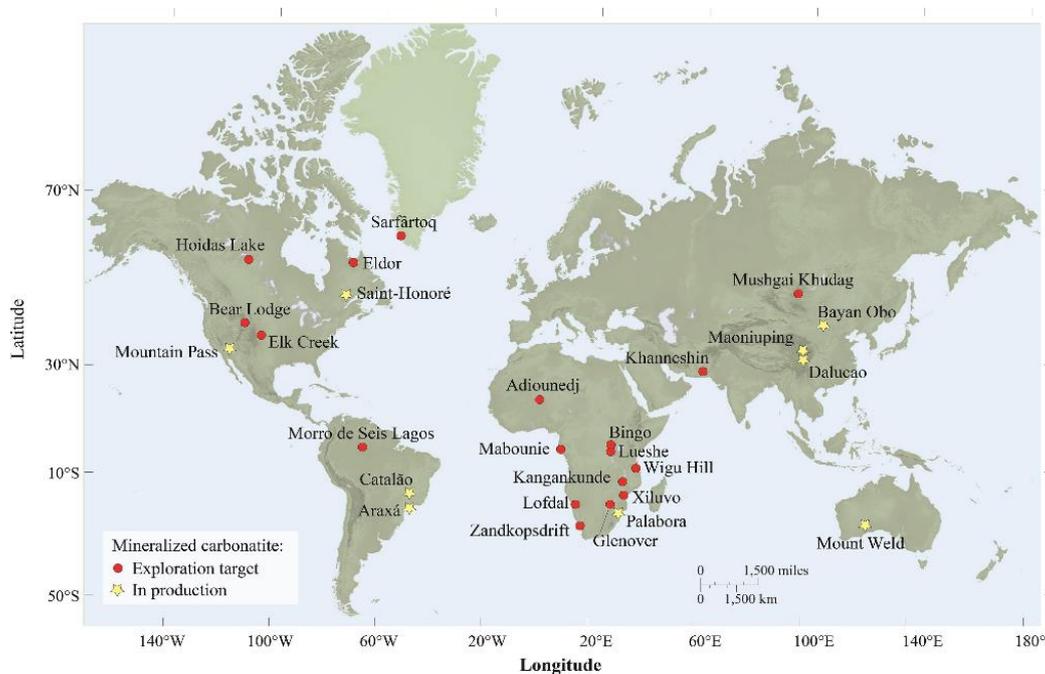


Imagen 2. Distribución global de carbonatita, incluido el depósito en la producción y los objetivos de exploración (Dushyantha et al., 2020).

Hasta la fecha se han identificado más de 250 minerales portadores de REE en varias clases de minerales, como carbonatos, fosfatos, silicatos, óxidos y haluros (AHRENS, 1983). Con minas en producción y en exploración al rededor del mundo (Imagen 2). Generalmente, los LREE se concentran en carbonatos y fosfatos, mientras que los HREE se concentran en óxidos y una parte de fosfatos (Kanazawa & Kamitani, 2006). La bastnasita y la monacita son los minerales RE más comunes que se encuentran en los depósitos de RE. Por lo tanto, la mayor parte de la producción mundial de REE se obtiene a través de bastnaesita y monacita junto con xenotima (Zhou et al., 2017).

4.2.1 Bastnaesita

El mayor porcentaje de los recursos económicos de REE del mundo se considera como los depósitos de bastnaesita distribuidos en China y los EE. UU. La bastnaesita no contiene U o Th y se considera como la fuente principal de LREE. Este mineral contiene aproximadamente el 70% de REO (Voncken, 2016). La bastnaesita se encuentra a menudo en entornos geológicos, como depósitos de vetas, zonas metamórficas de contacto y pegmatitas. Además, se presenta en rocas de silicato de carbonato con vetas de cuarzo intrusivas alcalinas, vetas que contienen fluorita y rellenos de brechas en areniscas pérmicas (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

4.2.2 Monacita

El segundo segmento más grande son los depósitos de monacita distribuidos en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y Estados Unidos, las fuentes minerales primarias de monacita y su contenido de tierras raras por depósitos a nivel mundial se encuentran en la Tabla 4. La monacita es un mineral RE muy extendido, que se encuentra comúnmente en las arenas de las playas. Sin embargo, también se presenta en granito, gneis y otras rocas ígneas y metamórficas como mineral accesorio (Wall, 2013). Además, se puede encontrar en minerales complejos junto con óxidos de hierro, aluminosilicatos y apatita (Ferron et al., 1991). La monacita generalmente se asocia con minerales pesados, como ilmenita, magnetita, rutilo y circón debido a su alta gravedad específica y resistencia a la intemperie química (Long et al., 2012).

Este mineral generalmente contiene 10 a 40% de La_2O_3 , 4 a 12% de ThO_2 , 20 a 30% de Ce_2O_3 y una gran cantidad de Nd, Pr y Sm (Thompson et al., 2012). Se considera una fuente importante de cerio y LREE (Xaba et al., 2018). El contenido de REO en la monacita es aproximadamente del 70% (es decir, similar a la bastnaesita). Sin embargo, a diferencia de la bastnaesita, la monacita contiene torio y uranio (Gupta & Krishnamurthy, 2016). La monacita en los depósitos de placer contiene una mayor cantidad de torio y uranio que la monacita de los depósitos de carbonatita. El tonelaje estimado del depósito de placer de monacita en el interior fue de 10,21 millones de toneladas en 2005, en el que China, EE. UU. E India poseen 36%, 13% y 3%, respectivamente (Pandey, 2011).

4.2.3 Otros minerales RE

El resto de los recursos lo constituyen xenotima, allanita, euxenita, apatita, queralita, eudialyita, loparita (Tabla 3), fosforitas, arcillas portadoras de tierras raras (absorción de iones), monacita secundaria y soluciones de uranio gastado. La xenotima es un mineral de fosfato de itrio con un 67% de contenido de REO, que contiene principalmente HREE (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

4.3 DISTRIBUCIÓN Y EXTRACCIÓN A NIVEL MUNDIAL

China domina el mercado de REE desde finales de los 90's al vender tierras raras a precios muy bajos, provocando el cierre de las minas en otros países al no obtener ganancias (USGS, 2013) pero en 2010 recortó las exportaciones y los precios se dispararon. Eso motivó una nueva producción en otros países.

Tabla 1 Producción mundial de REE, por país, 2019 (Lal, 2019).

Clasificación	País	Miles de toneladas	Porcentaje del total
1	China	132,0	62,0%
2	Estados Unidos	26,0	12,2%
3	Birmania (Myanmar)	22,0	10,3%
4	Australia	21,0	9,9%
5	India	3,0	1,4%
-	Otros países	9,0	4,2%
-	Total	213,0	100,0%

Si bien los REE no son realmente raros por naturaleza, las concentraciones explotables son poco comunes. En 2014, solo se extraían activamente seis depósitos en todo el mundo, todos ellos en carbonatitas: Bayan Obo, Daluxiang, Maoniuping y Weishan en China, Mount Weld en Australia Occidental y Mountain Pass en California. A pesar de la diversidad de REE-minerales, REE se extraen de solo tres minerales REE: bastnäsite, monazite, ambos enriquecidos en LREE y xenotime, enriquecidos en HREE (Verplanck et al., 2014). Como se puede apreciar en la Tabla 5 China posee las mayores reservas 36% y es el mayor productor de REE 58%

Comparando las reservas de los REE (Tabla 6) con otro metal también indispensable para la tecnología moderna como es el cobre podemos observar que los REE son relativamente escasos en la corteza terrestre exceptuando del La, Ce, Nd, Y y Cs que poseen concentraciones más cercanas a las de cobre, sin embargo, al ritmo de producción actual el mundo tiene para la mayoría de estos metales reservas conocidas para miles de años.

4.3.1 Principales yacimientos

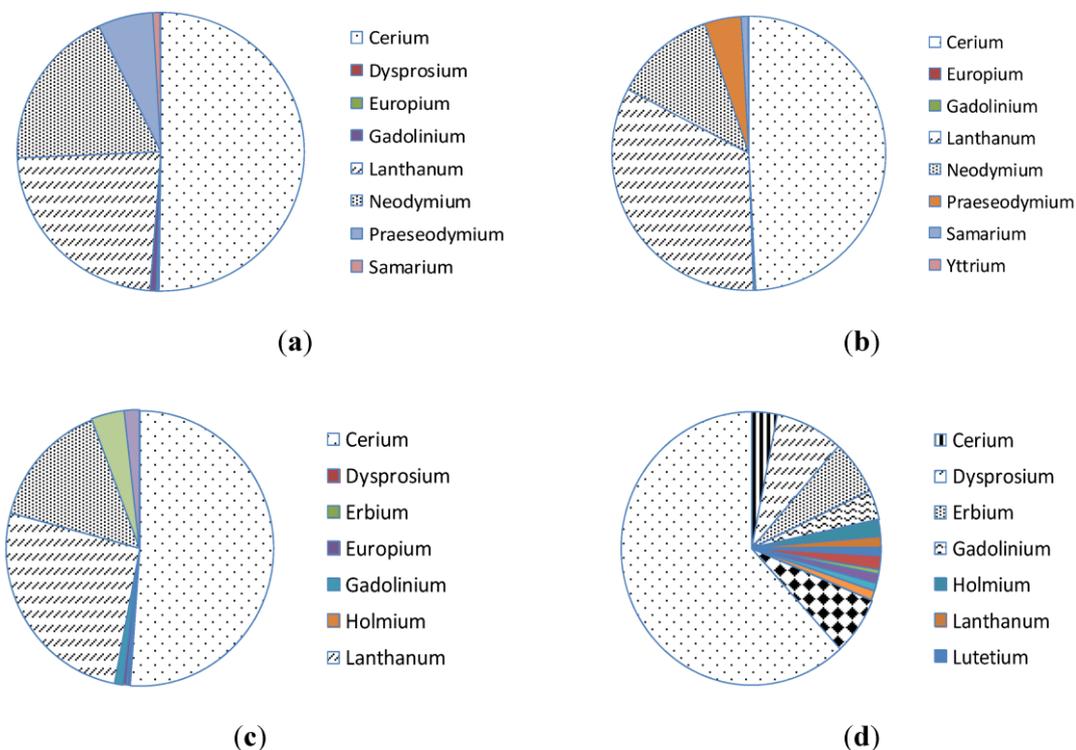


Imagen 3. Distribución promedio de elementos de tierras raras en cada depósito. (a) Bayan Obo, China; (b) Mountain pass, USA; (c) Mount Weld, Australia; (d) Lahat, Malasia. (Gambogi, 2015).

En 3 de los principales yacimientos de REE como se puede apreciar en la Imagen 2 el Ce, el La y el Nd son los principales elementos que se encuentran concordando con los datos de la Tabla 4, en el yacimiento de Lahat en malasia el Er es el elemento dominante, además de encontrarse de manera apreciable en el yacimiento de Mount Weld en Australia.

4.4 PROCESAMIENTO DE MINERALES DE TIERRAS RARAS

El procesamiento de REE consta de seis pasos principales que incluyen exploración de depósitos, minería, beneficio, tratamiento químico, separación, refinación y purificación, como se puede ver en la Imagen 4 (Suli et al., 2017).

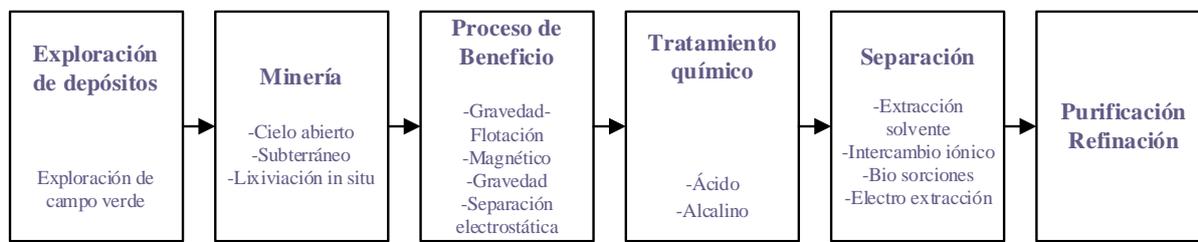


Imagen 4. Esquema de los pasos de procesamiento de REE (Suli et al., 2017).

Cabe destacar que la industria toma los factores económicos, el impacto potencial en la economía y los aspectos ambientales previos a la minería. Los REE puros existen en rocas complejas y pueden recuperarse mediante procesos de beneficio. El tratamiento químico puede tomar el relevo para lixiviar la concentración de REE. Finalmente, el elemento individual se puede extraer mediante el método de hidrometalurgia y generalmente se vende como elemento puro u óxidos metálicos a los consumidores (Suli et al., 2017).

4.4.1 Exploración de depósitos

La mayoría de las REE comienzan con las exploraciones y la identificación de las ubicaciones potenciales de depósitos de RE para extraer minerales valiosos que son altamente valorados en todo el mundo. Cabe destacar que la relativamente mayor demanda de minerales valiosos como oro, cobre, minerales ER, platino, etc. ha incrementado la exploración en procesos mineros. La

mayoría de las empresas suelen comenzar con el muestreo y la gestión de estudios extensos mediante análisis geoquímicos. En este sentido, tienen que emplear la actividad de exploración greenfield como estudio preliminar (Hatch & Saskatchewan Ministry of the Economy, 2012). La Tabla 7 resume la descripción de exploración greenfield y exploración brownfield.

En el método de exploración greenfield, los geólogos están actualmente en busca de evidencia de enriquecimiento de metales que involucre la medición de la gravedad, el magnetismo o la radioactividad. La exploración desde cero puede incluir la detección de radiaciones, la medición de magnetismos, las variaciones en el campo magnético, la fotografía satelital y el mapeo geológico. El primer método consiste en detectar radiactivos, elementos que se consideran adecuados para detectar elementos radiactivos como el uranio y el torio que emiten una fuente radiactiva. El segundo método consiste en medir el magnetismo que ha detectado el mineral magnético mediante el uso de magnetómetros. El tercer método son las variaciones observadas en el campo magnético; este método ayuda a detectar la densidad mineral dentro de la corteza terrestre mediante el uso de gravímetros. El cuarto método es la fotografía satelital en la que el geólogo toma fotos para identificar cierto depósito y luego se usa el satélite para crear el elemento en los mapas. El quinto método es el mapeo geológico que utilizan los geólogos para desarrollar algunas investigaciones sobre depósitos minerales con el fin de encontrar ubicaciones y estructuras del elemento de depósito. Entre los principales equipos necesarios para la minería se encuentran el suministro mecánico (máquina) y el sistema de ventilación, el suministro de energía y agua, y otras instalaciones. La construcción generalmente comienza después de implementar los estándares ambientales y los estándares de seguridad (U.S. Department of Energy, 2011).

4.4.2 Minería

El segundo paso es la minería, que tiene una técnica estándar para desarrollar varios minerales y elementos. La mayoría de las RE se extraen mediante tres técnicas de minería convencionales, a saber, minería a cielo abierto (es decir, minería a cielo abierto), minería subterránea y lixiviación in situ (Mine Planning and Equipment Selection Supply Chain of Rare Earth Elements (REEs), 2014). La técnica a cielo abierto se emplea comúnmente en la separación de RE como la mina Bayan Obo (China), la mina Mountain Pass (Estados Unidos)

y la mina Mount Weld (Australia). Este método consiste en eliminar los minerales de las paredes de los túneles mediante voladura, excavación, seguido por el transporte de los minerales a la superficie para el siguiente proceso. Continuando, la mina a cielo abierto generalmente se extrae a menos de 100 metros de la superficie y se emplean grandes excavaciones abiertas al aire para extraer el mineral antes de procesarlo. En particular, este método es menos costoso, pero deja grandes cicatrices en la superficie de la tierra y es dañino para el medio ambiente. Además de eso, el complejo Lovozero (Rusia) había extraído minerales de RE de roca dura mediante el empleo de ambas técnicas (es decir, a cielo abierto y subterráneo) para extraer REE de Loparite. Las minas subterráneas se consideran más caras y peligrosas en comparación con el tajo abierto. Aparte de eso, los depósitos de adsorción de iones en el sur de China se extraen mediante lixiviación in situ (Suli et al., 2017).

4.4.3 Proceso de beneficio

El proceso de beneficio implica la separación física cuyo propósito es eliminar impurezas no deseadas o mejorar la concentración de un producto deseado (Suli et al., 2017). Los minerales de RE se encuentran generalmente combinados con barita, fluorita, calcita, silicatos y minerales de hierro que pueden ser bastante difíciles de separar entre los minerales de RE de otras asociaciones (J. Lucas, P. Lucas, T. Le Mercier & Davenport, 2015).

Los elementos de tierras raras se recuperan en todo el mundo como coproductos y como subproductos de otros materiales. Cuando los REE se extraen como coproducto, el valor de mercado del producto principal respalda la extracción de las tierras raras, y la recuperación de las tierras raras, a su vez, ayuda a hacer que la recuperación del producto principal sea aún más atractiva. Cuando los REE se recuperan como subproductos, es lo mismo que la producción de un coproducto, excepto que el REE no es un ingrediente principal para hacer que el producto principal sea económicamente viable. Debido a la rareza de un depósito económicamente viable de solo REE, generalmente se extraen como coproducto o como subproductos de otro material. Una de las minas de subproductos REE más importantes del mundo es la mina Bayan Obo en China cuyo producto principal es el mineral de hierro, pero también produce gran parte de los REE del mundo como subproducto que produce 55.000 tonREO/año, más que cualquier otra mina del mundo (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

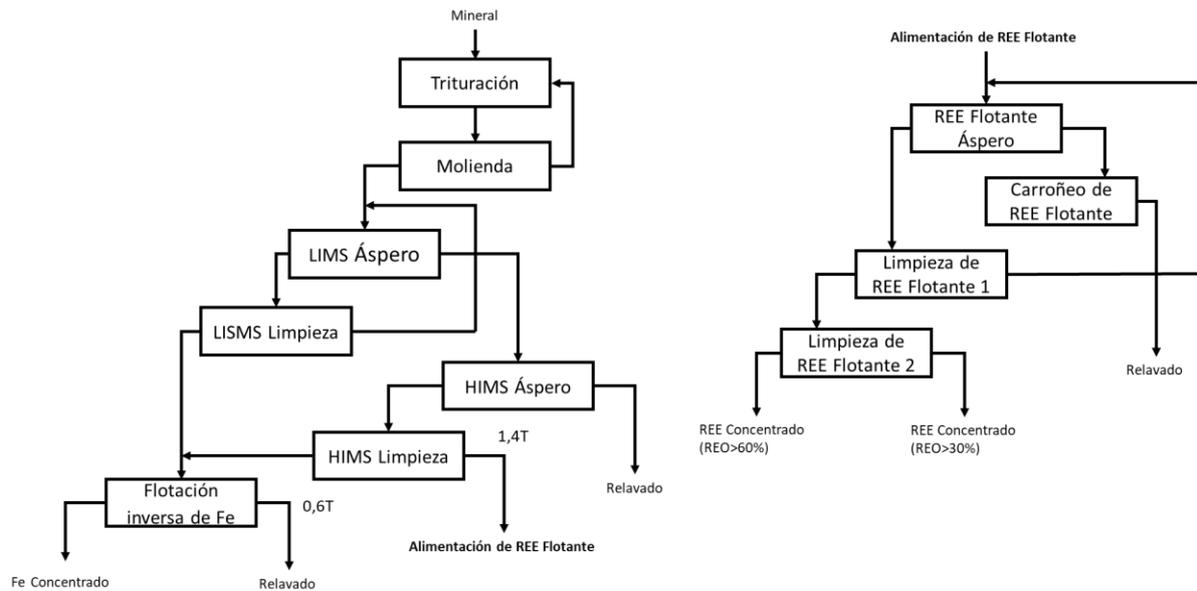


Imagen 5. Diagrama de flujo de beneficio del mineral del depósito de Bayan Obo (Li & Yang, 2014).

El procesamiento principal de los REE en Bayan Obo es por flotación y separación por gravedad (Imagen 5). Primero, el mineral se tritura y se muele a un tamaño específico. Luego, los componentes magnéticos del mineral se separan y el material se envía a flotación después de la flotación selectiva, el concentrado de flotación se mejora mediante separación por gravedad con mesas vibratorias, concentradores en espiral y separadores cónicos. Se utilizan industrialmente tres tipos de diagramas de flujo: el diagrama de flujo de concentración por gravedad, el diagrama de flujo de concentración de gravedad magnética y el diagrama de flujo de flotación por gravedad (Li & Yang, 2014).

4.4.3.1 Separación por gravedad

El mineral se molió al 62% pasando la malla 200 y se clasificó por hidrólisis en fracciones de cuatro tamaños. Las mesas de agitación se utilizaron para procesar las fracciones por separado. Se obtuvieron tres concentrados de bastnaesita de diferentes grados con los grados de 30%, 50% y 60%. La recuperación general fue del 75% (Li & Yang, 2014).

4.4.3.2 Separación por gravedad magnética

Después de triturar el mineral se concentró mediante separación LIMS y HIMS y se obtuvo el concentrado magnético con una ley de 5,64%. La recuperación del circuito magnético fue del 74,2% y el rendimiento del 42%. Y luego, el concentrado magnético se clasificó en fracciones de cuatro tamaños y se procesó por separado mediante mesas de agitación. Se obtuvo el concentrado final con la calificación de REO 52,3%. La recuperación global de RE fue de alrededor del 55% (Li & Yang, 2014).

4.4.3.3 Separación por gravedad-flotación

Como se muestra en la Imagen 6, el mineral se molió principalmente al 50% pasando la malla 200 y se clasificó en cuatro fracciones de tamaño. Las fracciones clasificadas se concentraron por separado en las mesas de agitación. La ley del concentrado por gravedad general fue REO 30% con una recuperación de RE del 74,5%. El concentrado por gravedad se volvió a triturar al 70% pasando malla 200 para flotación. Se utilizaron ácido hidroxímico C₅₋₉ (H₂O₅) y ftalato en una proporción de 1:1, carbonato de sodio, silicato de sodio como reactivos de flotación a pH8-9. Mediante una flotación más rugosa, una limpiadora y una limpiadora, el concentrado con el grado de REO 50-60% se adquirió con una recuperación de RE de 50-60% (Li & Yang, 2014).

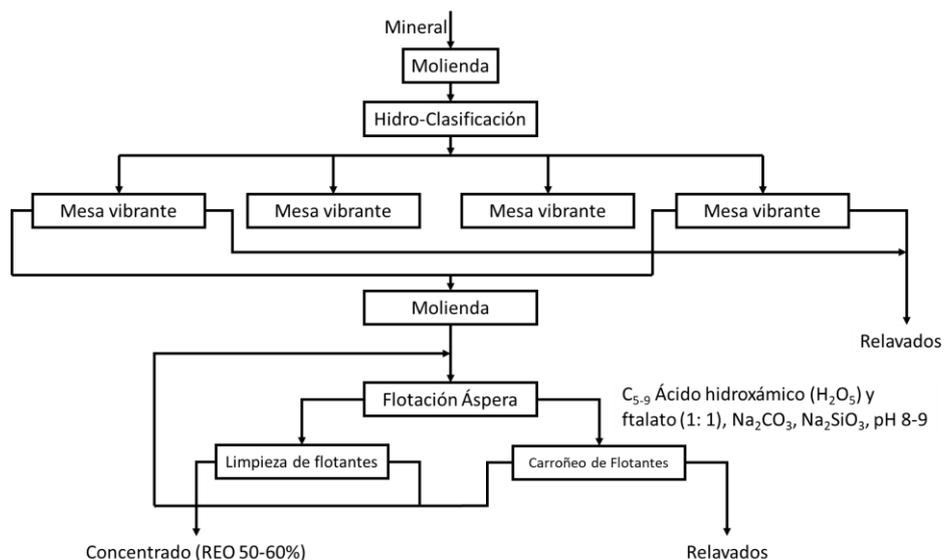


Imagen 6. Proceso de separación-flotación por gravedad en Mianning REE min (Li & Yang, 2014).

4.4.4 Tratamiento químico

El cuarto paso en el procesamiento de RE requiere un tratamiento químico, que se conoce como proceso de craqueo (Navarro & Zhao, 2014). El tratamiento ácido y el tratamiento alcalino son las dos vías del tratamiento químico. Ambas rutas se emplean para aumentar la concentración de REOs con una estimación de pureza del 90% y eliminar impurezas. Con respecto al tratamiento con ácido, la mayoría de las industrias emplean ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el ácido clorhídrico (HCL) y el ácido nítrico (HNO_3), mientras que el NaOH y el Na_2CO_3 se utilizan comúnmente en el tratamiento alcalino. Algunos autores habían señalado que el tratamiento alcalino se aplica principalmente en monazita y bastnasita debido al componente fosfato y carbonato-fluoruro que contienen (Crundwell, 2011; J. Zhang et al., 2016). El tratamiento ácido se aplica actualmente en la mina Bayan Obo en China, mientras que Molycorp aplicó el tratamiento alcalino en la mina Mountain Pass antes de que la empresa cerrara en 2002 (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

Para ilustrar, la monazita se puede manejar mediante tratamiento alcalino (es decir, disolución con hidróxido de sodio) o tratamiento ácido (es decir, digestión con ácido sulfúrico). La solución de lixiviación, que se produce a partir de la digestión del ácido sulfúrico, contiene otros elementos, a saber, uranio (U), torio (Th) y hierro (Fe). En relación al tratamiento ácido, existen 3 formas empleadas para la monacita después de eliminar el torio (Th) y el uranio (U), que incluyen la precipitación con doble sulfato de sodio, la neutralización por hidróxido de amoníaco y la neutralización por oxalato de sodio. Para la monacita después de que los minerales sodio eliminen impurezas y elementos radiactivos, el tratamiento alcalino está disponible de 4 formas, incluida la disolución por HCL, H_2SO y HNO_3 . En el procesamiento de bastnasita, REO fue lixiviado por varias rutas, incluyendo calcita REO entre 800-900°C, proceso de flotación y calcita por 10% de HCL o 30% de HCL a 620oC o disolución de H_2SO_4 a 480°C. (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

En relación con el procesamiento de xenotima, hay 3 formas de lixiviar REO, que incluyen la digestión en un 93% de H_2SO_4 a 190-250°C, tostado de Na_2CO_3 a 900°C y fusión de NaOH a 400°C. Estos métodos se lixivian con agua o se extraen con NH_4CL (Suli et al., 2017).

Debido a que el REE en el mineral ocurre principalmente en el estado de iones hidratados que se adsorben en la superficie de los minerales arcillosos, no se pueden concentrar de manera efectiva mediante métodos físicos convencionales, sino que se pueden extraer mediante el método de intercambio iónico. Los iones REE adsorbidos no se disuelven en agua o alcohol etílico, sino que se disuelven en las soluciones de electrolitos de NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y NH_4Cl por intercambio iónico. Los porcentajes de REE en diferentes fases se muestran en la Tabla 6. Se indica que más del 80% de REE son intercambiables de iones (Li & Yang, 2014).

En la década de 1970, como método de extracción principal, se utilizó NaCl como disolvente de lixiviación para disolver REE mediante intercambio iónico. Pero se requirió una alta concentración de solvente y un largo tiempo de lixiviación. Y el consumo de disolvente y los costes de procesamiento eran elevados. Mientras tanto, el grado del concentrado de RE solo puede alcanzar el 70% de REO. Desde la década de 1980 se ha utilizado $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ para reemplazar al NaCl como disolvente. Se ha logrado un alto grado (REO 92%) de concentrado de RE (Li & Yang, 2014).

El proceso generalmente se ejecuta en un baño de cemento con un volumen de aproximadamente $10\text{-}20\text{ m}^3$. Cuando el baño se llena con el mineral hasta una altura de aproximadamente 1,5 m, se vierte el disolvente de solución de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ con una concentración del 1 al 4% a través del mineral para su lixiviación. El solvente cargado se obtiene en el fondo del baño. El ácido oxálico se utiliza como precipitante para obtener el producto intermedio de ácido oxálico-tierras raras y se procesa adicionalmente por combustión para obtener el producto final de tierras raras ($> \text{REO } 92\%$). El bicarbonato de amonio también se ha utilizado como precipitante competitivo (Li & Yang, 2014). El diagrama de flujo de la técnica de extracción se muestra en la Imagen 7.

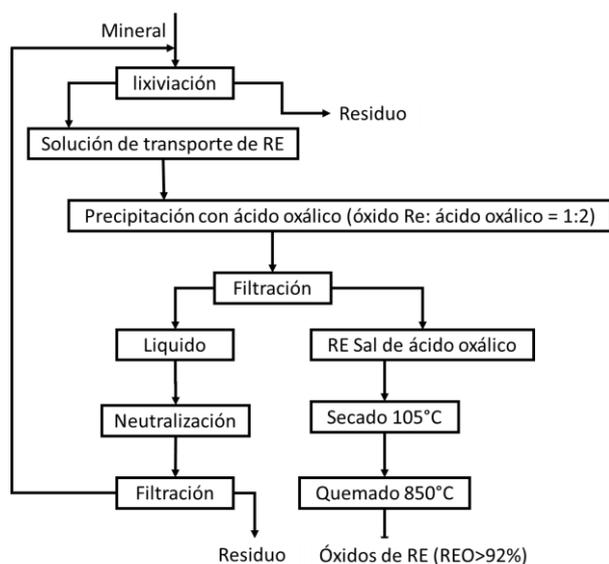


Imagen 7. Técnica de extracción de REE para elución de corteza erosionada - depósito de mineral REE (Li & Yang, 2014).

El proceso de lixiviación in situ también llamado minería de solución fue estudiado desde la década de 1980 para resolver los problemas ambientales ecológicos en la explotación por la tecnología de lixiviación en baños. Los pozos se perforan en el yacimiento natural y se inyecta el reigente de lixiviación. Los iones REE se lixiviaron selectivamente. El lixiviado recolectado se precipita mediante la solución de ácido oxálico o bicarbonato de amonio para obtener productos de óxido de tierras raras. El agua se recicla. Se informó que se deben resolver dos problemas técnicos clave durante el proceso de lixiviación in situ. Una es cómo evitar que la solución de reactivo de lixiviación se esparza por los pozos para causar la contaminación ambiental y la otra es cómo recuperar el lixiviado para optimizar la tasa de lixiviación. La tecnología se ha utilizado en Wenfeng, provincia de Jiangxi. Más de 200t de REE se extraen anualmente con una recuperación de REE del 70% (Li & Yang, 2014).

4.4.5 Proceso de separación

El quinto paso implica el proceso de separación para purificar los REO individuales. Hay cinco métodos comunes para el proceso de separación, a saber, supercrítico, biosorción, electro obtención, extracción con disolventes e intercambio iónico. Entre estos métodos, la extracción con solventes es el método más empleado en las industrias químicas para separar RE en un solo elemento (Pradip & Fuerstenau, 2013). Se requiere que las salidas de minerales REE en forma de fluorocarbonatos y fosfatos se conviertan en carbonatos o cloruros antes del proceso de

separación mediante el uso de intercambio o extracción por solvente (Suli et al., 2017). Con respecto a este proceso, se estimó que REO alcanza el 99% pureza (Gupta & Krishnamurthy, 2016) No obstante, las propiedades químicas y físicas similares dificultan la separación de REE, lo que a su vez puede aumentar tanto el tiempo como el costo de operación (Suli et al., 2017).

Se identificaron varios métodos para separar el RE de los minerales, a saber, precipitación química, reducción, bio-sorción, extracción de membrana, membranas líquidas, extracción con solvente, intercambio de iones y electro-obtención. Sin embargo, supercrítico, bioabsorción, electro-obtención, extracción por solvente e intercambio iónico son los 5 métodos más populares para extraer el elemento RE. La creciente cantidad de diversas aplicaciones de REE ha llevado a los investigadores a desarrollar técnicas para la extracción de REE. (Zheng & Xiong, 2011). El método de hidrometalurgia es una técnica empleada para extraer metalurgia que involucra químicos en forma acuosa para recuperar metales preciosos de minerales, concentración de solventes y materiales residuales reciclados. El método hidrometalúrgico depende de la capacidad de los productos químicos para extraer mezclas de RE del componente no deseado cambiando el pH y el ácido / bases utilizados (McLellan et al., 2013). Es un desafío separar los RE individuales entre sí debido al hecho de que tienden a tener propiedades físicas y químicas idénticas (Gupta & Krishnamurthy, 2016). Se han desarrollado procesos de separación que se centran en el intercambio iónico y las técnicas de disolventes para producir soluciones o compuestos de RE individuales de alta pureza (Suli et al., 2017).

4.4.5.1 Extracción de disolventes e intercambio iónico

Actualmente, la extracción por solvente se emplea ampliamente en muchas industrias debido a su capacidad para extraer y purificar productos RE (ZHANG et al., 2008). Varios autores han revisado el proceso de extracción de REE, que empleó químicos y extractantes. La extracción con solvente es un proceso que utiliza químicos orgánicos (es decir, extractantes) para transferir cationes o aniones de una fase acuosa a una fase orgánica inmiscible. REE se inicia separándolos de acuerdo con su grupo como HREE y LREE mediante extracción a contracorriente. La eficacia de la extracción con solvente se logra mediante los cambios en la

diferente naturaleza química entre las fases solvente y acuosa. Por lo tanto, las variables, que incluyen los tipos de extractante, acidez primaria, concentración de minerales y concentración de extractante, pueden contribuir a una separación de RE eficaz (Xie et al., 2014).

El elemento individual deseado de RE, REE de separación con colonos mezcladores de unidades múltiples es una ruta común (Gupta & Krishnamurthy, 2016). El extractante disolvente como fase orgánica y el RE lixiviado como fases acuosas se mezclan en el mezclador, en el que las partículas se sedimentan y separan por la fuerza de la gravedad. Cabe destacar que en algunos casos de la industria se ha diseñado un mezclador con fuerza centrífuga para mezclar tanto la fase orgánica como la orgánica. Varios autores han delineado que la eficiencia del colono está limitada por el tiempo de asentamiento. Aunque el intercambio de iones es otra forma de separación de RE, que se ha empleado para lograr una pureza del 99,99% de REO, esta técnica no se considera económica. La mayoría de las técnicas de intercambio de iones se emplean para obtener productos de RE de alta calidad para aplicaciones electrónicas o analíticas. Algunos autores postularon que hay tres tipos principales de extractantes, a saber, intercambiadores de cationes, intercambiadores de aniones y extractantes solvantes. Entre estos extractantes, el extractante solvatante es el que se usa comúnmente en la mayor parte de la industria. Algunos investigadores afirmaron que los extractantes convencionales, que se emplean ampliamente en la industria, son el ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA o P204) y el éster mono-2-etilhexílico del ácido 2-etilhexilfosfónico (HEH / EHP o P507) (L. Wang et al., 2014).

4.4.5.2 Fluido supercrítico

El método de fluido supercrítico (SCF) es un método empleado para extraer el elemento RE mediante el uso de dióxido de carbono (CO_2). Este método se ocupa del dióxido de carbono, cuya temperatura se elevó y comprimió hasta alcanzar la temperatura y la presión críticas. La mayoría de los investigadores están interesados en REE por técnica SCF, en la que se espera mejorar la extracción de REE mediante el aumento de la transferencia de masa entre CO_2 y REE. La eliminación rápida y completa del soluto del solvente se logra mediante gasificación de dióxido de carbono a presión atmosférica, después de la extracción. Se investigó la extracción de RE de recursos secundarios empleando el método de fluido supercrítico (Erkey,

2000). Se postuló que SCF es adecuado para ser empleado para la recuperación de la serie de actínidos en la minimización de los desechos orgánicos radiactivos acuosos y orgánicos tóxicos. Se ha estudiado la extracción de lantano trivalente y europio de una solución acuosa de ácido nítrico a una fase de CO₂ supercrítico a través de una fase líquida iónica a base de imidazolio. El resultado mostró un 87% logrado en la extracción de lantano y europio (Samsonov et al., 2011).

4.4.5.3 Bioabsorción

El método de biosorción es uno de los métodos biológicos emergentes para secuestrar cationes metálicos de soluciones acuosas diluidas y ha recibido una atención considerable por parte de los investigadores (Xiong et al., 2013). La mayor parte de la investigación se centró en la eliminación de metales pesados de los desechos industriales. Varios investigadores han informado que la ventaja más empírica del uso de la biosorción es la rentabilidad debido a la aplicación de biomasa natural para separar el elemento RE. La Tabla 8 resume los resultados de varias investigaciones realizadas, es decir, entre los principales estudios publicados en REE biosorción. Cabe señalar que la sorción depende del tipo de microorganismo o bioabsorbente, así como de las condiciones experimentales. Según Das y su equipo, hay varios factores que influyen en el proceso de biosorción y estos parámetros son con rangos de pH de 4 a 7, dosis de biosorbente de 15-200mg/L, temperatura de 25-60°C, concentración inicial de metal de 15-300mg/L y tiempo de contacto de 300 a 480 min (Das & Das, 2013).

4.5 PROPIEDADES, DESCRIPCION, HISTORIA Y USOS COMUNES DE LOS REE

4.5.1 Propiedades generales de los REE

Los REE son metales blandos de color plateado que se empañan rápidamente en el aire y tienen altos puntos de fusión. La serie de lantánidos resulta del llenado de la capa de electrones "f" en los átomos, con configuraciones que van desde 5d6s² para La y 4f¹ 5d¹ 6s² para Ce hasta 4f¹⁴5d⁰ 6s² para Lu al final de la serie. Esto da lugar a las propiedades magnéticas y espectroscópicas que hacen que los REE sean tan útiles en muchas aplicaciones. Estos electrones internos están

protegidos y, por lo tanto, mantienen las distintas propiedades elementales en diversas situaciones de enlace. Las propiedades electrónicas dan los REE espectros de absorción y emisión distintos y nítidos, incluidos distintos colores en solución (Tabla 2). La mayoría de los REE son fuertemente paramagnéticos y el fuerte magnetismo que resulta de su combinación con metales de transición como el hierro y el cobalto es una de sus características más importantes (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

Aunque las propiedades físicas y químicas del REE son similares, muchas de sus propiedades cambian sistemática y suavemente a través de la serie de lantánidos. Una de las propiedades más importantes para determinar el comportamiento químico es el tamaño de los cationes y, a la inversa de lo que podría esperarse, el tamaño de los cationes (y átomos) lantánidos disminuye suavemente al aumentar el número atómico (Imagen 8). Este fenómeno se llama contracción de lantánidos y surge porque los electrones f no filtran a los otros electrones de la atracción positiva del núcleo y, por lo tanto, a medida que aumenta el número atómico (y por lo tanto el número de protones en el núcleo), los electrones se tiran, cerca del núcleo. El catión Y^{3+} es más similar en tamaño a Ho (Imagen 8), mientras que Sc^{3+} es mucho más pequeño con solo 0.87\AA (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

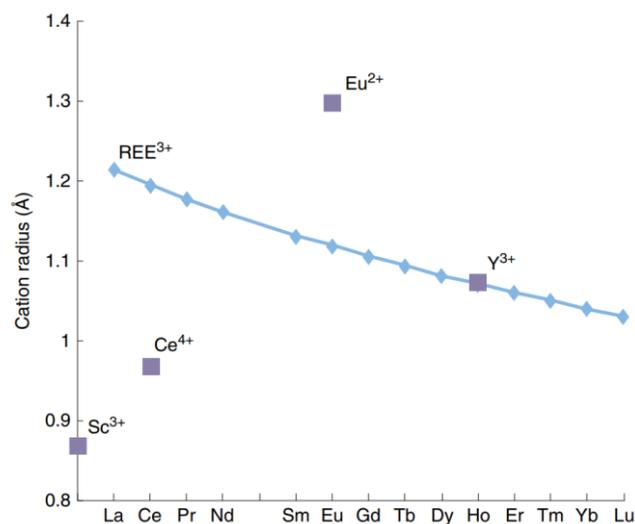


Imagen 8. La contracción del lantánido se demostró trazando los radios de 3+ cationes en nueve coordinaciones. También se muestran los radios de los cationes de los otros estados de oxidación de lantánidos más comunes, al igual que los radios de Y^{3+} y Sc^{3+} (Gupta & Krishnamurthy, 2016).

4.5.2 Lantano (La)

El lantano (La), elemento químico, un metal de tierras raras del Grupo 3 de la tabla periódica, que es el prototipo de la serie de elementos lantánidos. El lantano es un metal blanco plateado dúctil y maleable que es lo suficientemente suave como para cortarlo con un cuchillo. El lantano se concentra comercialmente mediante cristalización de nitrato de amonio y lantano. Los métodos de intercambio iónico y extracción con disolventes se utilizan cuando se desea una alta pureza. El metal se prepara por electrólisis de haluros anhidros fundidos o por reducción metalotérmica de sus haluros por metales alcalinos o alcalinotérreos (por ejemplo, reducción del fluoruro con calcio) (Britannica, 2021g). Imagen e historia en anexos.

4.5.2.1 Propiedades del La

Es el segundo más reactivo de los REE después del europio. El lantano se oxida en el aire a temperatura ambiente para formar La_2O_3 . Reacciona lentamente con el agua y se disuelve rápidamente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF) debido a la formación de una capa protectora de fluoruro (LaF_3) en la superficie del metal. El metal es paramagnético desde -267°C hasta su punto de fusión a 918°C con una susceptibilidad magnética casi independiente de la temperatura entre -269 y 27°C (Britannica, 2021g).

Cuando se combina con hierro y silicio, el lantano forma compuestos intermetálicos cúbicos con una fórmula química general $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_{13}$ que exhiben el efecto magnetocalórico gigante. Cuando esos compuestos se hidrogenan a aproximadamente 1,2–1,5 átomos de hidrógeno por unidad de fórmula, tienen temperaturas de ordenamiento magnético cercanas a la temperatura ambiente y, por lo tanto, son útiles como materiales de refrigeración magnéticos para aplicaciones cercanas a la temperatura ambiente (Britannica, 2021g).

En los compuestos, el lantano presenta un solo estado de oxidación, +3. El radio iónico es el más grande de los iones R^{3+} de tierras raras y, como consecuencia, el óxido blanco La_2O_3 es el óxido de tierras raras más alcalino (Britannica, 2021g). Las propiedades físicas del Lantano resumidas en los anexos.

4.5.2.2 Usos comunes del lantano

Altamente purificado el óxido de lantano es un ingrediente en la fabricación de vidrios de baja dispersión y alta refracción para componentes de lentes. El lantano es utilizado a menudo como LaNi_5 basada en hidrógeno -caja de almacenamiento- aleaciones y níquel recargables de hidruro -metal baterías en automóviles híbridos. El lantano se agrega a las aleaciones ferrosas (para eliminar el oxígeno, el azufre y otras impurezas) y a las aleaciones no ferrosas como las superaleaciones, las aleaciones de magnesio y las aleaciones de aluminio. Los compuestos de lantano se utilizan como huéspedes de fósforos en iluminación fluorescente y detectores de rayos X y en catalizadores de craqueo de petróleo, uno de sus principales usos. El metal misch (típicamente 50 por ciento de cerio, 25 por ciento de lantano, 18 por ciento de neodimio, 5 por ciento de praseodimio y 2 por ciento de otras tierras raras) se usa principalmente para pedernal más liviano y adiciones de aleación (Britannica, 2021g).

4.5.3 Cerio (Ce)

El cerio (Ce), elemento químico, el más abundante de los metales de las tierras raras. El cerio de calidad comercial es de color gris hierro, plateado cuando está en forma pura y tan suave y dúctil como el estaño (Britannica, 2021f). Imagen e historia en anexos

4.5.3.1 Usos comunes del Cerio

Los compuestos de cerio tienen varias aplicaciones prácticas. El dióxido se emplea en la industria óptica para el pulido fino de vidrio, como decolorante en la fabricación de vidrio, en catalizadores de craqueo de petróleo y como catalizador de emisión automotriz de tres vías que hace uso de sus características de valencia dual (3 +/ 4+). Junto con los otros metales de tierras raras, el cerio es un componente de numerosas aleaciones ferrosas para eliminar el azufre y el oxígeno y para nodulizar el hierro fundido. También se utiliza en aleaciones no ferrosas, más comúnmente para mejorar la resistencia a la oxidación a alta temperatura de las superaleaciones. El metal misch (típicamente 50 por ciento de cerio, 25 por ciento de lantano,

18 por ciento de neodimio, 5 por ciento de praseodimio y 2 por ciento de otras tierras raras) se usa principalmente para pedernal más liviano y adiciones de aleación (Britannica, 2021f).

4.5.3.2 Propiedades del cerio

Se oxida en el aire a temperatura ambiente para formar CeO_2 . El metal reacciona lentamente con el agua y se disuelve rápidamente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF) que conduce a la formación del fluoruro protector (CeF_3) capa sobre la superficie del metal. Las virutas de cerio (desde el momento en que el metal se lima, muele o mecaniza) se autoinflama fácilmente en el aire, ardiendo al rojo vivo. Su naturaleza pirofórica explica una de sus importantes aplicaciones metalúrgicas en pedernales más ligeros. El metal debe almacenarse al vacío o en atmósfera inerte (Britannica, 2021f).

Junto con el praseodimio y el terbio, el cerio se diferencia de las otras tierras raras en que forma compuestos en los que su estado de oxidación es +4; es la única tierra rara que exhibe un estado de oxidación +4 en solución. Las sales del ion Ce^{4+} (sales céricas), que son agentes oxidantes potentes pero estables, se utilizan en química analítica para determinar sustancias oxidables como el hierro ferroso (hierro en el estado de oxidación +2). El cerio en su estado de oxidación +3 se comporta como una tierra rara típica (Britannica, 2021f). Las propiedades físicas de Ce están resumidas en anexos.

4.5.4 Praseodimio (Pr)

El praseodimio (Pr), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal blanco plateado moderadamente blando, dúctil y maleable. Este elemento se separa y purifica comercialmente mediante técnicas de extracción líquido-líquido o de intercambio iónico. El metal se prepara por electrólisis de haluros anhidros fundidos o por reducción metalotérmica del fluoruro o cloruro con calcio (Britannica, 2021e). Imagen e historia en anexos.

4.5.4.1 Propiedades del praseodimio

Desplaza rápidamente el hidrógeno del agua en ácidos diluidos (excepto el ácido fluorhídrico [HF]) y se oxida lentamente en el aire, desarrollando una capa de óxido de color verde amarillento con estequiometría compleja y variable que puede expresarse mediante una fórmula genérica PrO_x ($1,5 \leq x \leq 2$). Es mejor almacenar el metal sellado en una cubierta de plástico, ya sea al vacío o en una atmósfera inerte. (Britannica, 2021e).

El praseodimio forma compuestos trivalentes como el óxido verde oliva Pr_2O_3 , que se disuelve fácilmente en ácidos para producir sales verdes trivalentes de praseodimio. Se conoce el dióxido tetravalente púrpura negruzco PrO_2 , pero se desconoce el ion Pr^{4+} en solución acuosa (Britannica, 2021e). Las Propiedades físicas del Praseodimio resumidas en anexos

4.5.4.2 Usos comunes de praseodimio

El praseodimio es un componente menor del metal misch, que se utiliza para hacer pedernales más ligeros y como adiciones de aleación a las aleaciones ferrosas y no ferrosas. El metal también se usa como una adición a las aleaciones de imanes permanentes $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, lo que lleva a una reducción de la cantidad de neodimio requerida. La zirconia estabilizada con praseodimio (ZrO_2) es la base de las gemas sintéticas de color verde. Una mezcla de praseodimio y neodimio es el componente activo del vidrio de didimio, que se utiliza en las gafas protectoras para proteger los ojos de los sopladores de vidrio y los soldadores. Los compuestos de praseodimio también se utilizan para producir colores de verde claro a amarillo en cerámicas y otros vidrios (Britannica, 2021e).

4.5.5 Neodimio (Nd)

El neodimio (Nd), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal blanco plateado dúctil y maleable. El neodimio se encuentra en los minerales monacita y bastnasita y es un producto de la fisión nuclear. Se emplean técnicas de separación líquido-líquido o intercambio de iones para la separación y purificación de

neodimio. El metal en sí se prepara por electrólisis de los haluros fusionados o por reducción metalotérmica del fluoruro con calcio. (Britannica, 2021h). Imagen e historia en anexos.

4.5.5.1 Propiedades del Neodimio

Se oxida fácilmente en el aire para formar un óxido, Nd_2O_3 , que se astilla fácilmente, exponiendo el metal a una mayor oxidación. El metal debe almacenarse sellado en una cubierta de plástico o mantenerse al vacío o en atmósfera inerte. Reacciona gradualmente con los ácidos minerales, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que forma una capa protectora de trifluoruro, NdF_3 (Britannica, 2021h).

El elemento de sus compuestos, como el óxido Nd_2O_3 y el hidróxido $\text{Nd}(\text{OH})_3$, se encuentra casi siempre en el estado de oxidación +3; el ion Nd^{3+} es estable en agua. Sólo se han preparado unos pocos compuestos de neodimio en estado +2, como el diyoduro NdI_2 y el dicloruro NdCl_2 ; el ion Nd^{2+} es inestable en solución acuosa (Britannica, 2021h). Propiedades físicas del Nd en anexos.

4.5.5.2 Usos comunes del Neodimio

La principal aplicación del neodimio es en imanes permanentes de alta resistencia basados en $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ que se utilizan en motores y generadores eléctricos de alto rendimiento, así como en imanes de husillo para discos duros de computadoras y turbinas eólicas. El metal se utiliza en la industria electrónica, en la fabricación de acero y como componente en una serie de ferrosos y no ferrosos. aleaciones, entre ellas el metal misch (15 por ciento de neodimio), que se utilizan para pedernales más ligeros. El metal en sí, y como una aleación con otro lantánido, el erbio, se ha empleado como regenerador en aplicaciones de criofriadores de baja temperatura para proporcionar enfriamiento a $-269\text{ }^\circ\text{C}$. Sus compuestos se utilizan en la industria cerámica para esmaltes y para colorear el vidrio en varios tonos, desde el rosa al morado. El granate de itrio-aluminio estabilizado con neodimio (YAG) es un componente de muchos láseres modernos, y los vidrios de neodimio se utilizan en fibra óptica. Una mezcla de neodimio y praseodimio absorbe la luz en la región de las líneas espectrales dañinas del sodio -D y, por lo tanto, se utiliza en el vidrio de las gafas de soldadores y sopladores de vidrio (Britannica, 2021h).

4.5.6 Prometio (Pm)

El prometio (Pm), elemento químico, el único metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica que no se encuentra en la naturaleza de la Tierra (Britannica, 2021j). Imagen e historia en anexos.

4.5.6.1 Propiedades del prometio

El prometio-147 se separa eficazmente de los otros productos de fisión de tierras raras mediante un método de intercambio de iones. El prometio también se ha preparado mediante bombardeo lento de neutrones del isótopo neodimio -146; el isótopo resultante, neodimio-147, decae por emisión de electrones a prometio-147. El metal en sí se preparó por primera vez en 1963 mediante la reducción del fluoruro, PmF_3 , con litio (Britannica, 2021j). Propiedades físicas resumidas en anexos.

4.5.6.2 Usos comunes del prometio

Los usos conocidos del prometio se deben a su radiactividad. Su suave radiación de partículas beta se puede convertir en electricidad en baterías en miniatura formadas intercalando prometio entre obleas de un semiconductor como el silicio; esas baterías funcionan a temperaturas extremas hasta por cinco años. Otros usos son como fuentes de radiación beta, por ejemplo, en fuentes de luz que utilizan fósforos para absorber la radiación beta y convertirla en luz visible. Las propiedades físicas y químicas del prometio son las de una tierra rara típica. Es trivalente en sus compuestos y soluciones, la mayoría de los cuales son de color rosa (Britannica, 2021j).

4.5.7 Samario (Sm)

El samario (Sm), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. El samario es un metal moderadamente blando, de color blanco plateado. Las técnicas líquido-líquido y de intercambio iónico se utilizan para la separación y purificación

comercial del samario. El metal se prepara convenientemente mediante la reducción metalotérmica de su óxido, Sm_2O_3 , con lantano metálico, seguido de la destilación del samario metálico, que es uno de los elementos de tierras raras más volátiles (Britannica, 2018a). Imagen e historia en anexos

4.5.7.1 Propiedades del samario

El samario existe en tres formas alotrópicas (estructurales). Además de su estado de oxidación +3 más estable, el samario, a diferencia de la mayoría de las tierras raras, tiene un estado de oxidación +2. El ion Sm^{2+} es un poderoso agente reductor que reacciona rápidamente con iones de oxígeno, agua o hidrógeno. Puede estabilizarse por precipitación como el sulfato extremadamente insoluble SmSO_4 . Otras sales de samario en el estado +2 son SmCO_3 , SmCl_2 , SmBr_2 y $\text{Sm}(\text{OH})_2$; son de color marrón rojizo. En su estado de oxidación +3, el samario se comporta como un elemento típico de tierras raras; forma una serie de sales amarillas en soluciones (Britannica, 2018a).

4.5.7.2 Usos comunes del samario

El uso más común del samario es con cobalto en imanes permanentes de alta resistencia basados en SmCo_5 y $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ adecuados para aplicaciones de alta temperatura. El producto energético de los imanes permanentes a base de samario es el segundo después de los basados en neodimio, hierro y boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Debido a su sección transversal de alta absorción para neutrones térmicos (samario-149), el samario se utiliza como complemento en las barras de control de los reactores nucleares y para el blindaje de neutrones. Otros usos son en fósforos para pantallas y pantallas de televisión que utilizan tubos de rayos catódicos, en vidrios especiales luminiscentes y absorbentes de infrarrojos, en catálisis inorgánica y orgánica, y en las industrias de la electrónica y la cerámica (Britannica, 2018a).

4.5.8 Europio (Eu)

El europio (Eu) es un elemento químico, metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es el miembro menos denso, más blando y más volátil de la serie de los

lantánidos. Es un metal puro es plateado, pero incluso después de una breve exposición al aire se vuelve opaco, porque se oxida fácilmente en el aire para formar $\text{Eu}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. El europio generalmente se separa de las otras tierras raras reduciéndolo al estado de oxidación +2 y precipitándolo con iones sulfato. El metal se ha preparado por electrólisis de los haluros fundidos y por reducción de su óxido con lantano metálico seguido de destilación del europio metálico (Britannica, 2021c). Imagen e historia en anexos.

4.5.8.1 Propiedades químicas de Europio

El europio reacciona rápidamente con el agua y los ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que está protegido por una capa de EuF_3 . En su estado de oxidación predominante de +3, el europio se comporta como una típica tierra rara, formando una serie de sales generalmente de color rosa pálido. El Eu^{3+} ion paramagnético es debido a la presencia de no apareados electrones. El europio posee el estado de oxidación +2 más estable y más fácil de producir de las tierras raras. Las soluciones de europio (+3) se pueden reducir con zinc metálico y ácido clorhídrico para dar Eu^{2+} en solución; el ion es estable en ácido clorhídrico diluido si se excluye el oxígeno del aire. Se conocen una serie de sales de europio (+2) de color blanco a amarillo pálido o verde, tales como sulfato, cloruro, hidróxido y carbonato de europio (II). Los haluros pueden prepararse mediante reducción de hidrógeno de los haluros trivalentes anhidros (Britannica, 2021c). Propiedades físicas del Eu resumidas en anexos (Britannica, 2021c).

4.5.8.2 Usos comunes del Europio

El europio se utiliza principalmente en fósforos rojos en pantallas ópticas y pantallas de televisión que utilizan tubos de rayos catódicos y en vidrio para lámparas fluorescentes. También se utiliza en centelladores para tomografía de rayos X y como fuente de color azul en diodos emisores de luz (LED) (Britannica, 2021c).

4.5.9 Gadolinio (Gd)

El gadolinio (Gd), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. El gadolinio es un metal blanco plateado moderadamente dúctil,

moderadamente duro, que es bastante estable en el aire, aunque con el tiempo se empaña en el aire, formando una fina película de Gd_2O_3 en la superficie (Britannica, 2021i). Imagen e historia en anexos.

4.5.9.1 Propiedades del gadolinio

El gadolinio reacciona lentamente con el agua y rápidamente con los ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que se forma una capa protectora estable de GdF_3 que evita que el metal reaccione más. El gadolinio es el único lantánido ferromagnético cerca de la temperatura ambiente; su punto de Curie (orden ferromagnético) es $20^\circ C$. Por encima de esta temperatura, el metal es muy fuerte paramagnético (Britannica, 2021i). Propiedades físicas del Gadolinio resumidas en anexos.

4.5.9.2 Usos de gadolino

Los principales usos de los compuestos de gadolinio incluyen huéspedes para fósforos para lámparas fluorescentes, pantallas intensificadoras de rayos X y centelleadores para tomografía de rayos X, y como agente de contraste para imágenes por resonancia magnética (MRI) (en forma de quelatos solubles en agua). Otros usos son en escudos y barras de control de reactores nucleares (debido a su sección transversal de absorción nuclear muy alto) y como un componente de itrio gadolinio granate, que se emplea en las comunicaciones (Britannica, 2021i).

4.5.10 Terbio (Tb)

El terbio (Tb), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal blanco plateado moderadamente duro que es estable en el aire cuando está en forma pura. Se utilizan técnicas de extracción por solvente-solvente e intercambio iónico para la producción comercial de terbio. El metal se prepara en forma muy pura por reducción metalotérmica del fluoruro anhidro con calcio metal. (Britannica, 2019b). imagen e historia en anexos

4.5.10.1 Propiedades químicas

El metal es relativamente estable en el aire incluso a altas temperaturas, debido a la formación de una capa de óxido oscura y apretada que puede representarse como un óxido mixto compuesto por Tb_2O_3 y TbO_2 . El terbio reacciona fácilmente con ácidos diluidos, pero es insoluble en ácido fluorhídrico (HF) porque la presencia del ión fluoruro protege al metal de reacciones posteriores formando una capa protectora de TbF_3 (Britannica, 2019b).

El terbio es una de las pocas tierras raras que tienen un estado de oxidación +4 y +3; el primero es el resultado de la estabilidad del caparazón 4f medio lleno. El óxido marrón preparado por ignición por aire tiene la fórmula aproximada Tb_4O_7 ; el óxido TbO_2 se obtiene utilizando oxígeno atómico. El tetrafluoruro TbF_4 se prepara fluorando el trifluoruro; el ion Tb^{4+} no se conoce en solución. En otras sales y en solución, el terbio está presente en el estado de oxidación +3 y se comporta como una tierra rara típica. Sus soluciones son de color rosa pálido a incoloras (Britannica, 2019b). Propiedades físicas resumidas en anexos

4.5.10.2 Usos comunes del Terbio

Los compuestos de terbio se utilizan como fósforos verdes en lámparas fluorescentes, monitores de computadora y pantallas de televisión que utilizan tubos de rayos catódicos. Otro uso importante es el disprosio y el hierro en la aleación magnetostrictiva Terfenol-D ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$), que es un componente de actuadores controlados magnéticamente, sistemas de sonar y sensores de presión. Junto con otro lantánido, el gadolinio, el terbio fue utilizado por Geoffrey Green y sus colaboradores en 1990 para construir un prototipo de refrigerador magnético de dos etapas a temperatura ambiente., con gadolinio como etapa de alta temperatura y terbio como etapa de baja temperatura (Britannica, 2019b).

4.5.11 Disprosio (Dy)

El disprosio (Dy), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal relativamente duro y es de color blanco plateado en su forma pura. Es bastante estable al aire, quedando brillante a temperatura ambiente. Las virutas de disprosio

se encienden fácilmente y se queman al rojo vivo. El metal reacciona lentamente con el agua y se disuelve rápidamente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que forma una capa protectora de DyF_3 insoluble. (Britannica, 2019a).

La separación comercial se realiza mediante extracción líquido-líquido o métodos de intercambio iónico. El metal se ha preparado mediante reducción metalotérmica de los haluros anhidros con metales alcalinos o alcalinotérreos. El metal se purifica adicionalmente mediante destilación al vacío. (Britannica, 2019a). Imagen e historia en anexos.

4.5.11.1 Usos comunes

El uso principal del disprosio es como adición de aleación a los materiales de imán permanente de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (en los que parte del neodimio se sustituye por disprosio) para aumentar tanto el punto de Curie como especialmente la coercitividad y, por lo tanto, mejorar la temperatura alta. rendimiento de la aleación. El metal también es un componente del magnetostrictivo Terfenol D ($\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_2$). El disprosio se utiliza en barras de control para reactores nucleares debido a su sección transversal de absorción de neutrones relativamente alta; sus compuestos se han utilizado para fabricar materiales láser y activadores de fósforo, y en lámparas de halogenuros metálicos. Químicamente, el disprosio se comporta como una típica tierra rara trivalente y forma una serie de compuestos de color amarillo pálido en los que su estado de oxidación es +3 (Britannica, 2019a). Propiedades físicas del Disprosio resumidas en anexos

4.5.12 Holmio (Hm)

El holmio (Ho), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal blanco plateado moderadamente duro que es relativamente estable en el aire (Britannica, 2020). Los métodos clásicos de separación y purificación del elemento eran la cristalización fraccionada y la precipitación, pero las tecnologías de extracción por solvente-solvente y de intercambio iónico han puesto a disposición cantidades de kilogramos de óxido de holmio de alta pureza (Britannica, 2020). Imagen e historia en anexos.

4.5.12.1 Propiedades del Holmio

Reacciona fácilmente con ácidos diluidos, pero no reacciona con ácido fluorhídrico (HF) diluido o concentrado, debido a la formación de una capa superficial protectora de HoF_3 (Britannica, 2020).

El holmio y sus compuestos tienen aplicaciones limitadas, excepto para la investigación. El holmio se ha utilizado como componente de algunos dispositivos electrónicos; el ión Ho^{3+} se ha utilizado como catalizador para la conversión de hidrógeno orto-para; y el óxido se ha utilizado como refractario especial. El holmio se comporta como una típica tierra rara. Forma una serie de sales de color marrón amarillento, muchas de las cuales se obtienen en solución disolviendo el óxido Ho_2O_3 en el ácido apropiado (Britannica, 2020). Propiedades físicas del Holmio resumidas en anexos.

4.5.13 Erbio (Er)

El erbio (Er), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es un metal blanco plateado que es relativamente estable en el aire. La purificación comercial se logra mediante métodos de extracción por disolventes líquido-líquido y de intercambio iónico. El metal en sí se prepara mediante reducción metalotérmica del fluoruro anhidro con calcio (Britannica, 2021b). Imagen e historia en anexos.

4.5.13.1 Propiedades del Erbio

Reacciona lentamente con el agua y se disuelve rápidamente en ácidos diluidos, excepto ácido fluorhídrico (HF) debido a la formación de la capa protectora de fluoruro (ErF_3) en la superficie del metal. El erbio se comporta como un elemento típico de las tierras raras, formando compuestos en los que su estado de oxidación es +3, como el óxido rosa Er_2O_3 . El ion Er^{3+} es rosa en solución (Britannica, 2021b). Propiedades físicas resumidas en anexos

4.5.13.2 Usos comunes del Erblio

Cuando se eleva a un estado de alta energía por absorción de luz infrarroja, el ion Er^{3+} emite fotones en longitudes de onda de 1,55 micrómetros, una de las longitudes de onda comúnmente empleadas en la transmisión de señales de fibra óptica. Por lo tanto, el uso principal del erbio se encuentra en las telecomunicaciones de fibra óptica como componente de los amplificadores de señal en cables de datos y teléfonos de larga distancia. Sus compuestos se utilizan en láseres y como colorante rosa para gafas. La zirconia estabilizada con erbio (ZrO_2) produce gemas sintéticas rosas. Otro uso a pequeña escala del erbio es en el compuesto intermetálico Er_3Ni , que tiene una alta capacidad de calor magnético alrededor de 4 K (-269°C o -452°F), que es necesario para un intercambio de calor regenerativo efectivo a bajas temperaturas. y, por tanto, el compuesto se emplea como material regenerador en criofriadores de baja temperatura (Britannica, 2021b).

4.5.14 Tulio (Tm)

Tulio (Tm), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. La producción comercial implica la extracción por solvente-solvente o el intercambio iónico de la monacita. El metal se prepara por reducción de su óxido con lantano metálico seguido de destilación del tulio metálico (Britannica, 2019c). Imagen e historia en anexos.

4.5.14.1 Propiedades químicas del tulio

Se puede disolver fácilmente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que se forma una capa de trifluoruro insoluble (TmF_3) en la superficie del metal, lo que dificulta aún más reacción química (Britannica, 2019c).

4.5.14.2 Usos comunes del tulio

El tulio tiene poco uso práctico más allá de la investigación. El tulio-170 se utiliza en pequeñas fuentes de rayos X portátiles adecuadas para la obtención de imágenes de rayos X médicos y

la evaluación no destructiva de estructuras de paredes delgadas. Junto con el itrio, el tulio es un componente de algunos óxidos superconductores de alta temperatura. El elemento también se emplea como dopante en granate de itrio- aluminio para aplicaciones láser. El tulio se puede preparar en el estado de oxidación +2, como en el diyoduro de color oscuro TmI_2 . El ion Tm^{2+} no es estable en agua; momentáneamente da un color rojo violeta antes de oxidarse al estado predominante +3. El tulio en el estado estable +3 forma una serie de sales de color verde pálido (Britannica, 2019c). Propiedades físicas de Tulio resumidas en anexos.

4.5.15 Iterbio (Yb)

El Iterbio (Yb), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de lantánidos de la tabla periódica. Es el metal de tierras raras más volátil. Es un metal plateado suave y maleable que se empañará un poco cuando se almacene en el aire y, por lo tanto, debe almacenarse al vacío o en una atmósfera inerte cuando se requiera un tiempo de almacenamiento prolongado. El iterbio se separa de los demás elementos de tierras raras mediante técnicas de extracción con disolvente-disolvente o de intercambio iónico. El metal elemental se prepara mediante la reducción metalotérmica de su óxido, Yb_2O_3 , con lantano metálico, seguido de una destilación al vacío para purificar aún más el metal (Britannica, 2021a). Imagen e historia en anexos.

4.5.15.1 Propiedades del Iterbio

Se oxida lentamente en el aire, formando Yb_2O_3 ; el metal se disuelve fácilmente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que se forma una capa protectora de YbF_3 en la superficie e impide una reacción química posterior. El iterbio es débilmente paramagnético y tiene la susceptibilidad magnética más baja de todos los metales de tierras raras. El iterbio, como el europio, es un metal divalente. Un compuesto de iterbio en el estado de oxidación +2 fue preparado por primera vez en 1929 por WK Klemm y W. Schuth, quienes redujeron el tricloruro de iterbio, $YbCl_3$, a dicloruro de iterbio, $YbCl_2$, con hidrógeno. El ion Yb^{2+} también se ha producido por reducción electrolítica o tratamiento de una sal Yb^{3+} con amalgama de sodio. El elemento forma una serie de sales de Yb^{2+} de color verde pálido, como sulfato, dibromuro, hidróxido y carbonato de iterbio. El ion de iterbio verde pálido Yb^{2+} es inestable en solución acuosa y reduce el agua fácilmente, liberando hidrógeno; es menos

estable que el ion europio comparable, Eu^{2+} , y más estable que el ion samario Sm^{2+} . En su estado de oxidación predominante +3, el iterbio forma una serie de sales blancas que incluyen el trisulfato y el trinitrato; el sesquióxido también es blanco (Britannica, 2021a).

4.5.15.2 Usos comunes del Iterbio

El elemento tiene poco uso práctico más allá de la investigación. El isótopo radiactivo Yb-169 es una fuente de rayos X duros útiles en dispositivos radiográficos portátiles. Se utiliza como dopante en una variedad de materiales ópticos, incluidos los lentes. El metal se utiliza en sensores de presión porque su resistividad eléctrica depende en gran medida de la presión (Britannica, 2021a). Propiedades físicas de Iterbio resumidas en anexos

4.5.16 Lutecio (Lu)

El lutecio (Lu), elemento químico, un metal de tierras raras de la serie de los lantánidos de la tabla periódica, es el elemento de tierras raras más denso y de mayor fusión y el último miembro de la serie de los lantánidos. En su forma pura, el lutecio metálico es de color blanco plateado y estable en el aire (Britannica, 2019d). Imagen e historia en anexos.

4.5.16.1 Propiedades químicas de lutecio

El metal se disuelve fácilmente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que se forma una capa protectora de LuF_3 en la superficie y evita que el metal se disuelva más. La separación y purificación se realizan mediante extracción líquido-líquido o técnicas de intercambio iónico. El metal se prepara por reducción metalotérmica de los haluros anhidros por metales alcalinos o alcalinotérreos. El elemento se comporta como una típica tierra rara, formando una serie de compuestos en estado de oxidación +3, como sesquióxido de lutecio, sulfato y cloruro (Britannica, 2019d). Propiedades físicas resumidas en anexos.

4.5.16.2 Usos comunes del Lutecio

El lutecio se utiliza en investigación. Sus compuestos se utilizan como huéspedes para centelleadores y fósforos de rayos X, y el óxido se utiliza en lentes ópticas (Britannica, 2019d).

Propiedades físicas resumidas en anexos

4.5.17 Itrio (Y)

El itrio (Y), elemento químico, un metal de tierras raras del grupo 3 de la tabla periódica. Es un metal dúctil de color blanco plateado, moderadamente blando. Comercialmente, el itrio se separa de las otras tierras raras mediante extracción líquido-líquido o por intercambio iónico, y el metal se produce por reducción metalotérmica del fluoruro anhidro con calcio (Britannica, 2021d). Imagen e historia en anexos.

4.5.17.1 Propiedades del Itrio

Es bastante estable en el aire; la oxidación rápida comienza por encima de aproximadamente 450°C, lo que da como resultado Y_2O_3 . El metal reacciona fácilmente con los ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que la capa protectora insoluble de YF_3 que se forma en la superficie del metal evita una reacción posterior. Las virutas de itrio se encienden fácilmente en el aire, ardiendo al rojo vivo. Su radio iónico está cerca de los radios de disprosio y holmio, lo que dificulta la separación de esos elementos. Además del sesquióxido blanco, el itrio forma una serie de sales casi blancas que incluyen el sulfato, el tricloruro y el carbonato. El itrio se comporta químicamente como un elemento típico de tierras raras que tiene un estado de oxidación de +3. (Britannica, 2021d).

4.5.17.2 Usos comunes del Itrio

El itrio y sus compuestos tienen numerosos usos. Las aplicaciones principales incluyen hosts para fósforos rojos para lámparas fluorescentes, pantallas a color y pantallas de televisión que utilizan tubos de rayos catódicos. El granate de itrio- aluminio (YAG) dopado con otras tierras

raras se utiliza en láseres; El granate de itrio- hierro (YIG) se utiliza para filtros de microondas, radares, comunicaciones y gemas sintéticas; y la zirconia cúbica estabilizada con óxido de itrio se utiliza en sensores de oxígeno, cerámicas estructurales, revestimientos de barrera térmica y diamantes sintéticos. Un uso importante del itrio es en cerámicas superconductoras de alta temperatura, como $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, que tiene una temperatura de transición superconductoras de -180°C para líneas de transmisión de energía eléctrica y superconductores e imanes. El metal se utiliza como adición de aleación a las aleaciones ferrosas y no ferrosas para mejorar la resistencia a la corrosión y la oxidación. Los compuestos de itrio se utilizan en vidrios ópticos y como catalizadores. (Britannica, 2021d). Propiedades físicas del Itrio resumidas en anexos.

4.5.18 Escandio (Cs)

El Escandio (Sc), elemento químico, un metal de tierras raras del Grupo 3 de la tabla periódica. Es un metal moderadamente blando de color blanco plateado. El escandio se separa de las otras tierras raras por precipitación del sulfato de escandio de potasio insoluble o por extracción de tiocianato de escandio con éter dietílico. El metal en sí se preparó por primera vez en 1938 mediante la electrólisis de cloruros de potasio, litio y escandio en una mezcla eutéctica (es decir, una mezcla que tiene el punto de fusión más bajo posible con esos componentes). El escandio ahora se produce principalmente como un subproducto de la extracción de uranio del mineral davidita, que contiene aproximadamente 0,02 por ciento de óxido de escandio. (Britannica, 2018b). Imagen e historia en anexos.

4.5.18.1 Propiedades químicas del Escandio

Es bastante estable en el aire, pero cambiará lentamente su color de un blanco plateado a un aspecto amarillento debido a la formación de óxido Sc_2O_3 en la superficie. El metal se disuelve lentamente en ácidos diluidos, excepto el ácido fluorhídrico (HF), en el que una capa protectora de trifluoruro evita una reacción posterior (Britannica, 2018b).

La química del escandio se parece más a la de los otros elementos de tierras raras en estado de oxidación +3 que a la del aluminio o el titanio. Sin embargo, parte de su comportamiento es atípico de las tierras raras debido a su radio iónico significativamente más pequeño ($1,66 \text{ \AA}$

para el número de coordinación 12) en comparación con el promedio de las tierras raras (1,82 Å para el número de coordinación 12). Por esta razón, el ion Sc^{3+} es un ácido relativamente fuerte y tiene una tendencia mucho mayor a formar iones complejos (Britannica, 2018b).
Propiedades físicas del Cs resumidas en anexos

4.5.18.2 Usos comunes del Escandio

Solo se han desarrollado unos pocos usos de este inusual metal de transición, principalmente debido a la disponibilidad limitada y al alto costo del escandio. Su baja densidad y alto punto de fusión sugieren aplicaciones como agente de aleación para metales ligeros para aplicaciones militares y de alto rendimiento. Los principales usos del escandio son como aditivo de aleación para aleaciones a base de aluminio para artículos deportivos y en lámparas de halogenuros metálicos de alta intensidad. Cuando se alea con aluminio y aleaciones a base de aluminio, el escandio limita el crecimiento de granos a alta temperatura (Britannica, 2018b).

4.6 APLICACIONES INDUSTRIALES DE MATERIALES DE REE, ALGUNOS ESTUDIOS RECIENTES

4.6.1 Lantano (La)

El transistor es la base de la electrónica moderna y entre más pequeños sean estos más se pueden añadir en la misma área y con esto se aumenta el rendimiento de los chips por lo que se sigue investigando tecnología para disminuir cada vez más el tamaño de los transistores (xataka, 2021). La empresa con el proceso de fabricación que puede producir los transistores más pequeños masivamente es taiwanesa TSCM cuyo nodo más avanzado es el de 5nm (TSMC, 2021). Para diseñar dispositivos nano-eléctricos de próxima generación requiere capacitores semiconductores de óxido de metal (MOS) eficientes que tengan un tamaño más pequeño y características eléctricas mejoradas en términos de baja densidad de corriente de fuga y alta densidad de capacitancia sin embargo, el material tradicional basado en SiO_2 usado como material dieléctrico de puerta alcanza su límite por debajo de los 2nm debido a una alta fuga de corriente la cual es aliviada en un estudio en Delhi, India mediante el uso de una bicapa

de ZrO_2/La_2O_3 en condensadores MOS para su uso en futuras aplicaciones de dispositivos nano eléctricos (Mangla & Roy, 2021).

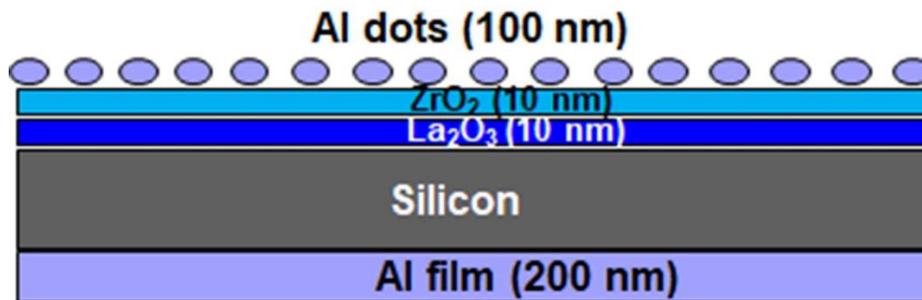


Imagen 9. Esquema del condensador MOS que tiene bicapas de ZrO_2/La_2O_3 . Las dimensiones de los diferentes materiales se muestran entre paréntesis (Mangla & Roy, 2021).

Los condensadores MOS fabricados en la bicapa depositada poseen una baja densidad de corriente de fuga de $\sim 2,89 \times 10^{-10} A/cm^2$ a 1V y una alta densidad de capacitancia de $\sim 2,18 \mu F/cm^2$, que se mejoran en comparación con lo reportado en la literatura. Los parámetros eléctricos se mejoran aún más para que los condensadores MOS basados en bicapa recocidos tengan una densidad de corriente de fuga de $\sim 7,23 \times 10^{-12} A/cm^2$ a 1V y una densidad de capacitancia de $\sim 2,72 \mu F/cm^2$. Las características morfológicas y eléctricas obtenidas de estas bicapas sugieren sus posibles aplicaciones en futuros dispositivos nanoelectrónicos MOS (Mangla & Roy, 2021).

4.6.2 Cerio (Ce)

Cerio en catalizadores para la industria petroquímica

El etileno y el propileno son las principales materias primas de la industria petroquímica y la demanda mundial para su producción está creciendo rápidamente (Chen et al., 2014; Feng et al., 2010) El craqueo térmico de hidrocarburos es el método principal para la producción de olefinas ligeras. Este método no puede satisfacer la creciente demanda del mercado. Además, el craqueo térmico consume una gran cantidad de energía que conduce a una gran cantidad de emisión de CO_2 (Alyani et al., 2012; Nawaz et al., 2013). Existe como alternativa el craqueo catalítico con vapor para producir etileno y propileno a partir de nafta usando óxidos de Cerio

y óxidos de circonio soportados en SAPO-34 el cual es catalizador común, pero al ser modificado se produce un aumento de los sitios ácidos tanto débiles como fuertes. Las medidas de actividad indicaron que el catalizador modificado posee una acidez moderada favoreciendo el rendimiento de etileno y propileno (Varzaneh et al., 2015).

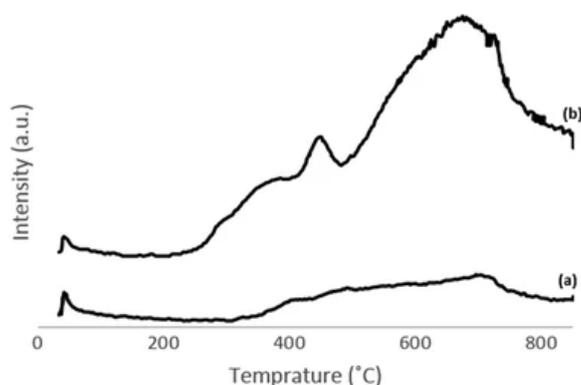


Imagen 10. Perfiles (a) H₂-TPR de un SAPO-34 y (b) SAPO-34 optimizado (Varzaneh et al., 2015).

Los perfiles TPR (Reducción programada de temperatura) del H₂ de SAPO-34 y optimizado SAPO-34 se muestran en la Imagen 10 según los resultados de TPR adquiridos, SAPO-34 no mostró picos significativos en la región de 50–850°C. El perfil de TPR de SAPO-34 promovido exhibió dos picos intensos a 430 y 650°C. El primer pico es atribuible a la reducción del óxido de cerio en la superficie de SAPO-34 según la siguiente reacción (Zhu et al., 2004):



El segundo pico puede estar relacionado con la reducción masiva del cerio mediante la eliminación de los aniones O²⁻ de la red y la formación de Ce₂O₃ (Damyanova et al., 2009; Eltejaei et al., 2012). Este aumento en la reducibilidad es una consecuencia de la interacción apropiada de la mezcla ácida de óxido de circonio y cerio con SAPO-34 que da como resultado una dispersión adecuada de los promotores en el soporte de SAPO-34 (Eltejaei et al., 2012). En el mecanismo protolítico, la reacción procede a través de iones carbonio formados por protonación de alcanos por los sitios ácidos. Luego, los iones carbonio colapsan para dar alcanos o iones hidrógeno y carbenio, que devuelven protones al catalizador para formar olefinas (Jentoft & Gates, 1997; Kotrel et al., 2000). La mejora en la reducibilidad puede promover la formación de olefinas mediante la intensificación del número y la velocidad de transferencia de protones y resultados para mejorar el rendimiento catalítico.

4.6.3 Praseodimio (Pr)

Síntesis de óxido de Praseodimio con uso en estabilización de combustión, pigmentos, catalizadores y componentes de almacenamiento de oxígeno

El óxido de praseodimio, que pertenece a la clase de óxidos de metales de tierras raras, se ha utilizado ampliamente en promotores y estabilizadores en catalizadores de combustión, pigmentos, materiales con mayor conductividad eléctrica, catalizadores y componentes de almacenamiento de oxígeno debido a sus características ópticas y eléctricas específicas y excelentes propiedades (Bernal et al., 1992; Kawabe et al., 1997). El óxido de praseodimio forma una serie homóloga con varios óxidos definidos estequiométricamente: $\text{Pr}_n\text{O}_{2n-2}$, con $n=4, 7, 9, 10, 11, 12\dots$ Pr_6O_{11} es bien conocido como el forma más atractiva, estable y estable de estos óxidos a temperatura y presión ambiente (Abu-Zied et al., 2013). Hasta ahora, se han desarrollado números muy limitados de métodos sintéticos para la fabricación de óxido de praseodimio nanoestructurado, como electrohilado (Hassan et al., 2011), sal fundida (X. Wang et al., 2004), descomposición térmica (Balboul, 2010), hidrotermal (Y. Zhang et al., 2009), electroquímica (Sun et al., 2012), y precipitación (Abu-Zied et al., 2013). La introducción del enfoque reproducible, eficaz y simple para sintetizar el óxido de praseodimio nanoestructurado es importante para los posibles exámenes de sus características. En general, se acepta que las propiedades de los materiales nanoestructurados podrían verse extremadamente afectadas por su forma y tamaño de partícula (Motahari et al., 2014; Zinatloo-Ajabshir & Salavati-Niasari, 2014). Por tanto, presentar métodos apropiados para sintetizar Pr_6O_{11} y controlar su morfología y tamaño de partícula parece necesario e importante (Zinatloo-Ajabshir & Salavati-Niasari, 2015).



Imagen 11. Diagrama esquemático de la síntesis de nanopartículas de óxido de praseodimio (Zinatloo-Ajabshir & Salavati-Niasari, 2015).

Este trabajo presenta una ruta de precipitación fácil para preparar nanopartículas de Pr₆O₁₁ en forma de esfera muy uniformes con tamaño de grano pequeño con la ayuda de TMED y PEG. La aplicación de TMED tanto como agente precipitante como de taponamiento conjunto en presencia de PEG es la novedad de esta investigación. Las nanopartículas de Pr₆O₁₁ preparadas se pueden utilizar como un candidato interesante para aplicaciones fotocatalíticas bajo irradiación con luz ultravioleta en el proceso de eliminación de 2-naftol de las aguas residuales, ya que se encontró que el porcentaje de degradación de 2-naftol era 100 en 12min. La alta pureza de las nanopartículas obtenidas se demostró mediante análisis EDS, XRD y FT-IR. También se examinaron las propiedades ópticas de las nanopartículas recién formadas (Zinatloo-Ajabshir & Salavati-Niasari, 2015).

4.6.4 Neodimio (Nd)

Neodimio en computación cuántica

Los conjuntos de iones de tierras raras dopados en cristales exhiben excelentes propiedades de coherencia cuántica y grandes anchos de línea no homogéneos (Thiel et al., 2011) que son adecuados para la transferencia de información cuántica con fotones de banda ancha en redes de comunicación cuántica óptica de alta velocidad (Northup & Blatt, 2014). Se utilizan en memorias cuánticas ópticas de última generación con potencial para almacenamiento en microondas, (Wolfowicz et al., 2015; M. Zhong et al., 2015) y son candidatos prometedores para la transducción cuántica óptica a microondas (Williamson et al., 2014). Un desafío

importante hacia las interfaces cuánticas de banda ancha basadas en emisores de estado sólido es que la información almacenada en la excitación colectiva del conjunto se descodifica rápidamente debido a un ensanchamiento no homogéneo. Para restaurar la coherencia óptica, se han perfeccionado protocolos basados en técnicas de quema de agujeros espectrales como el peine de frecuencia atómica (AFC) y el ensanchamiento no homogéneo reversible controlado (Hedges et al., 2010). Aunque son efectivos, estos protocolos implican procedimientos de preparación largos (cientos de milisegundos) y complejos que generalmente limitan el ancho de banda de la interfaz. Recientemente, se propuso (Kurucz et al., 2011) esa decoherencia de conjunto puede suprimirse mediante un fuerte acoplamiento a una cavidad. Este fenómeno, llamado protección de la cavidad, se ha observado experimentalmente, aunque no en pleno efecto, en el dominio de microondas con un conjunto de espín de vacío de nitrógeno (Putz et al., 2014). Experimentos anteriores informaron un estrechamiento del ancho de línea de polaritón en las estructuras de los pozos cuánticos, pero aún no es concluyente que esos efectos fueran el resultado de la protección de la cavidad (T. Zhong et al., 2017).

(T. Zhong et al., 2017) demostró una fuerte protección de la cavidad contra la decoherencia en el dominio óptico utilizando un conjunto denso (unos pocos millones) de átomos de neodimio (Nd) acoplados a una cavidad nanofotónica. Aprovechando el mapeo protegido de qubits fotónicos a excitaciones atómicas súper radiantes, logramos una interfaz cuántica de materia luminosa eficiente con un ancho de banda de $\sim 50\text{GHz}$ que podría encontrar aplicaciones en futuras redes cuánticas.

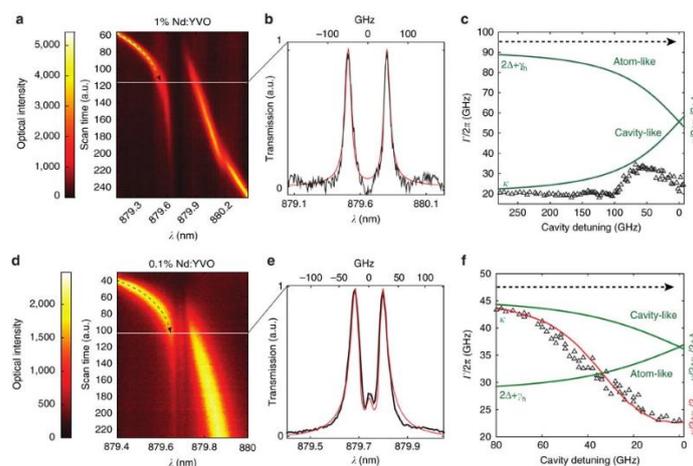


Imagen 12. Protección de la cavidad de los conjuntos Nd contra la decoherencia (T. Zhong et al., 2017).

(a, d) Espectros de transmisión de la cavidad mientras se ajusta su resonancia a través de la transición Nd no homogénea. (b, e) Espectros de transmisión en resonancia que muestran dos polaritones brillantes. Las curvas rojas son el ajuste teórico asumiendo conjuntos gaussianos. (C, f) las tasas de descomposición experimentales extraídos de la trayectoria anti-cruce izquierda (flechas de puntos) en una y d, respectivamente, como una función de desintonización. En c (1% Nd: YVO), el polaritón (21 GHz) es significativamente más estrecho que el ensanchamiento heterogéneo inicial (76 GHz), pero no alcanza el límite de protección total probablemente debido a una forma de conjunto asimétrica no gaussiana. En f (0,1%), el ancho de línea de polaritón disminuye rápidamente hacia la resonancia hasta el límite de protección total ($\kappa/2 + \gamma h/2$). La curva roja traza la desintegración teórica de una distribución gaussiana. Las curvas verdes muestran las desintegraciones teóricas asumiendo un conjunto Lorentziano del mismo Δ .

Si bien esta interfaz asigna eficientemente el qubit fotónico al conjunto, el qubit se disipa a una velocidad de $\kappa/2$. Las mejoras en el factor de calidad de la cavidad a los valores de vanguardia de $Q \sim 10^6$ lograrían un almacenamiento de 1ns (suficiente para realizar 50 volteretas Rabi). La interfaz con anchos de línea de polaritón muy estrechos aún podría mapear un fotón de banda ancha al conjunto, aunque a expensas de la eficiencia. Para permitir el almacenamiento a largo plazo como en una memoria de ondas de espín AFC (Afzelius et al., 2010), el qubit se puede transferir desde la excitación en estado superradiante a un nivel de espín de larga duración aplicando un pulso π dentro del tiempo. Al recordar, otro π El pulso puede transferir el qubit de vuelta a los estados de polaritón y luego un fotón de cavidad. Para un almacenamiento fiel de ondas de espín, se necesitan más estudios espectroscópicos para verificar el tiempo de coherencia de espín en los conjuntos de tierras raras. Además, la frecuencia Rabi de los pulsos impulsores debe exceder los anchos de línea de polaritón, lo cual es alcanzable dado el fuerte confinamiento de luz en los dispositivos de nanohaz actuales. En comparación con las memorias AFC-spin-wave existentes, esta interfaz no requeriría ningún paso de preparación o multiplexación de tiempo para lograr un funcionamiento siempre listo. Aprovechar las plataformas en chip también permite el almacenamiento multiplexado espacial y temporalmente enrutando fotones a una serie de nanocavidades con diferentes retrasos. Más destacado, (Probst et al., 2013) para realizar una transducción cuántica eficiente entre fotones

ópticos y de microondas a través de Zeeman o transiciones hiperfinas en conjuntos de tierras raras (O'Brien et al., 2014; Williamson et al., 2014).

4.6.5 Prometio (Pm)

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor que pertenece a la familia de los óxidos conductores transparentes (TCO). Tiene interesantes propiedades electrónicas, eléctricas y ópticas para aplicaciones optoelectrónicas, particularmente en el campo fotovoltaico. Es estudiado por sus atractivas propiedades fundamentales, además existen avances en las técnicas de síntesis, epitaxias de película fina y semiconductores controlables tipo n y tipo p. (Özgür et al., 2005). El ZnO tiene muchas ventajas que incluyen, baja constante dieléctrica estática, alta estabilidad química, excelentes propiedades piezoeléctricas y fotoeléctricas. Con aplicaciones en el área de dispositivos de ondas acústicas (AWD), 10 electrodos transparentes, emisores de luz azul y ultravioleta (UV) (Battaglia et al., 2011). Todas estas propiedades lo convierten en un buen material, aunque su limitación en el rango UV limita este material con el fin de explotarlo en el rango de la luz visible, particularmente para aplicaciones fotovoltaicas. Por lo tanto, el dopaje con más de un elemento es una forma adecuada de mejorar la absorción, por lo que los elementos magnéticos como los átomos de tierras raras (RE) son muy importantes y, además, pueden dar resultados adecuados (El Hachimi et al., 2019). Se ha informado de ZnO dopado con RE con iones lantánidos como Eu^{3+} , Tb^{3+} , Yb^{3+} , La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} , Sm^{3+} y Nd^{3+} . Los resultados así obtenidos muestran que los compuestos resultantes se pueden emplear en las aplicaciones optoelectrónicas y espintrónicas (Kumar et al., 2017; X. J. Zhang et al., 2014).

(El Hachimi et al., 2019) estudiaron, empleado cálculos DFT para dar algunos resultados precisos con la función de correlación de intercambio mBJ. Elegieron una supercélula de $2 \times 2 \times 2$ de anfitrión de óxido de zinc, y después de eso elegieron un elemento apropiado primero dopando con un solo átomo: RE = Eu y Pm, y segundo usando un método de codopaje, con el fin de mejorar sus propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas. Por último, demostraron que las RE como las codopaciones de Eu, Pm y Eu, Pm en ZnO mejoran significativamente sus propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas. La introducción de la codificación de Eu y Pm conduce a un aumento de la banda prohibida. Los electrones pueden transitar fácilmente desde la banda de valencia a la banda de conducción, lo que da como resultado una mejora de la

absorción de luz visible en un rango de absorción más amplio. Los espectros de absorción alcanzan un valor elevado en las regiones de luz visible e infrarroja. Con la importancia de los resultados obtenidos, los compuestos estudiados pueden potencialmente encontrar aplicaciones espintrónicas y optoelectrónicas.

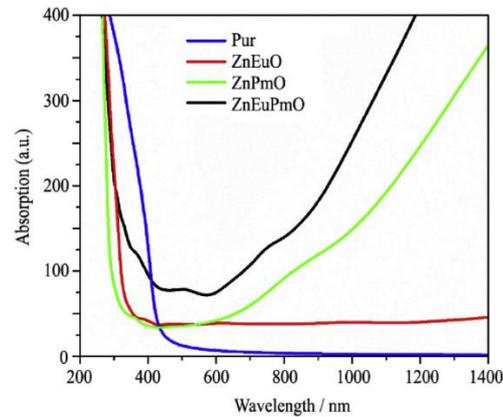


Imagen 13. Coeficiente de absorción para ZnO no dopado, ZnO dopado con átomo de Eu, ZnO dopado con átomo Pm y ZnO dopado con Eu, Pm codopado (El Hachimi et al., 2019).

En la imagen 55, el gráfico muestra la reflectividad en función del rango de longitud de onda. Observamos una pequeña reflectividad para todos los compuestos dopados, mientras que el ZnO puro tiene la reflectividad más importante en todo el rango. El ZnO codopado con impurezas dobles muestra valores más pequeños de reflectividad en el rango entre $\lambda = 600\text{--}800$ nm. Sin embargo, cuando λ es superior a 800 nm, la reflectividad aumenta y alcanza un valor alto en la región del infrarrojo cercano (El Hachimi et al., 2019).

4.6.6 Samario (Sm)

Los últimos años demostraron que las mayores propiedades de resistencia de las aleaciones de magnesio a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente o superiores (hasta $250\text{--}300$ ° C) se logran si se alean con metales de tierras raras (REM) (J. Wang et al., 2007). La introducción simultánea de diferentes elementos del grupo REM en el magnesio proporciona su mejor endurecimiento (L. L. Rokhlin, 2004; Luk'Yanova et al., 2013).

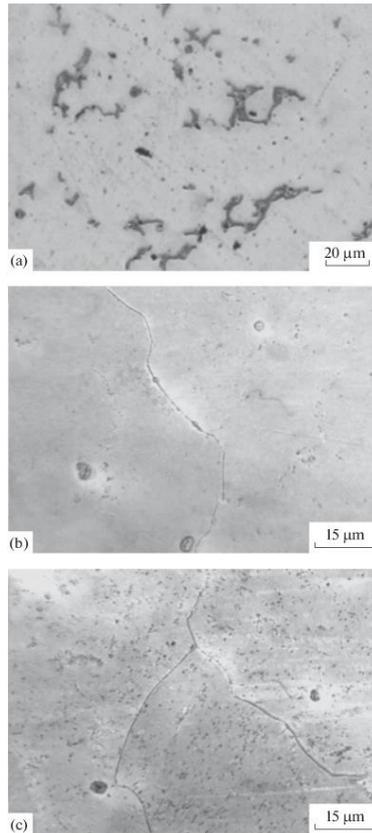


Imagen 14. Microestructura (MO) de las aleaciones (a) Mg fundido – 12% Gd – 1,4% Sm; (b) Mg – 12% Gd después del tratamiento térmico, que incluyó homogeneización a 515 ° C, enfriamiento + envejecimiento de 64 horas a +200°C recocido de 32 horas a 250°C para la aleación en (b) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

Las aleaciones de magnesio que contienen REM exhiben la mayor resistencia después del tratamiento térmico realizado para descomponer una solución sólida sobresaturada (envejecimiento). Sin embargo, el calentamiento a baja temperatura a corto plazo de las aleaciones envejecidas provoca la disolución inversa de los REM en magnesio sólido (recuperación), que se acompaña de ablandamiento y limita la aplicación práctica de estas aleaciones. La investigación de la recuperación en aleaciones binarias de Mg-REM mostró que la tendencia a la recuperación aumentó gradualmente con el número atómico de REM desde el grupo del cerio hasta la mitad del grupo del itrio de la serie del lantano. Teniendo en cuenta esta dependencia de las aleaciones de magnesio con diferentes REM, podemos esperar que la adición de metales del grupo cerio a las aleaciones de magnesio que contienen REM del grupo itrio pueda debilitar su tendencia a la recuperación sin reducir sus típicas propiedades de alta resistencia (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

El estudio de la recuperación en aleaciones ternarias Mg–Y–Sm y Mg–Gd–Sm (Rokhlin, Dobatkina, Tabachkova, et al., 2021) a diferentes proporciones de contenido de cada uno de los dos REM y en su contenido total cercano a la solubilidad máxima en la solución sólida de magnesio confirmó la suposición esperada. El objetivo de este estudio es continuar investigando la recuperación en aleaciones de Mg-Gd-Sm con un contenido constante de gadolinio del 12% para asegurar un alto nivel de propiedades de resistencia y un nivel aceptable de ductilidad (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

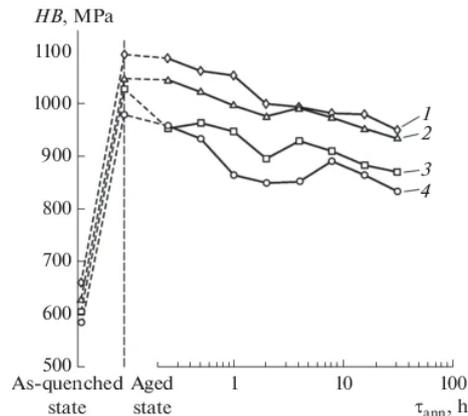


Imagen 15. La dureza de las aleaciones de Mg-Gd-Sm y Mg-Gd (1 - 4 son las mismas que en la Fig.1) tras el recocido isotérmico a 250 ° C para la recuperación después del endurecimiento por envejecimiento a 200 ° C durante 64 h (τ_{ann} es el recocido tiempo) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

El contenido del segundo componente, el samario, se incrementó gradualmente desde cero hasta el contenido máximo correspondiente a la solución sólida de magnesio a la posible temperatura de enfriamiento según el diagrama de fase ternario Mg-Gd-Sm para formar una solución sólida sobresaturada (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

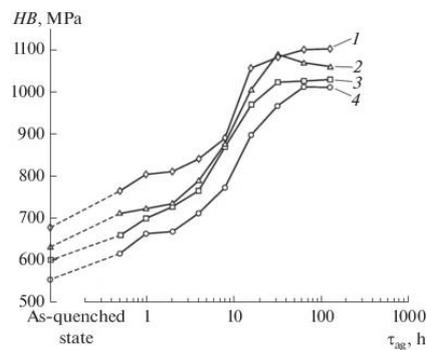


Imagen 16. Dureza HB de las aleaciones de magnesio templadas al envejecer a 200 ° C: (1) Mg – 12% Gd – 2,1% Sm, (2) Mg – 12% Gd – 1,4% Sm, (3) Mg – 12% Gd– 0,7% Sm y (4) Mg – 12% Gd (τ_{ag} es el tiempo de envejecimiento) (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

La recuperación (ablandamiento) en aleaciones de magnesio con gadolinio (grupo de itrio REM) y en estas aleaciones adicionalmente aleadas con samario (grupo de cerio REM) se estudia después del endurecimiento por envejecimiento y posterior recocido a corto plazo realizado a una temperatura ligeramente superior. Se encuentra que el endurecimiento inducido por el envejecimiento disminuye a una temperatura de recocido alta, a la que se produce la recuperación. La recuperación de las aleaciones de magnesio-gadolinio disminuye al aumentar el contenido de samario en ellas. Se ha demostrado que los pequeños aditivos de samario aumentan las propiedades de resistencia y, simultáneamente, disminuyen la recuperación de las aleaciones de Mg-Gd durante el calentamiento accidental a corto plazo cuando las aleaciones se utilizan como materiales estructurales ligeros en la práctica (Rokhlin, Dobatkina, Tarytina, et al., 2021).

4.6.7 Itrio (Y)

Demostración del potencial del electrolito de circonato de bario dopado con itrio para las pilas de combustible de alto rendimiento

Para reducir las altas temperaturas de funcionamiento ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) de las pilas de combustible de óxido sólido, el uso de cerámicas protónicas como material electrolítico alternativo es atractivo debido a su alta conductividad y baja energía de activación en un régimen de baja temperatura ($\leq 600^{\circ}\text{C}$). Entre muchas cerámicas protónicas, el circonato de bario dopado con itrio ha atraído la atención debido a su excelente estabilidad química, que es el principal problema en las pilas de combustible de cerámica protónica. Sin embargo, la mala sinterización del circonato de bario dopado con itrio desalienta su fabricación como un electrolito de película delgada y su integración en soportes de ánodos porosos, los cuales son esenciales para lograr un alto rendimiento (Bae et al., 2017).

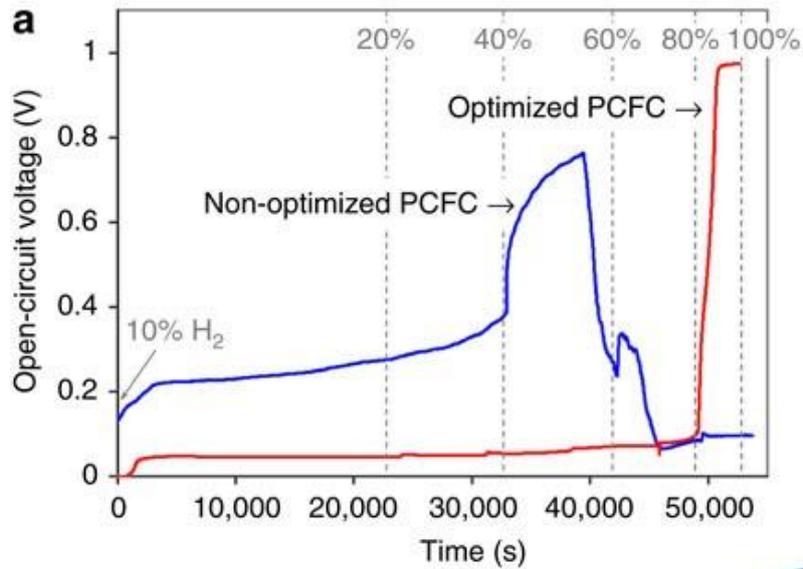


Imagen 17. El nano-AFL optimizado se fabricó mediante recocido posterior a 1300°C durante 1h después de PLD con una composición volumétrica de 50:50(Ni: BZY), mientras que el nano-AFL no optimizado mediante recocido posterior a 1200°C durante 1 h. (a) Perfiles de OCV obtenidos durante la reducción del ánodo en los que la concentración de H₂ se varió del 0% al 100% con N₂ equilibrado en el gas de alimentación en el lado del ánodo (Bae et al., 2017).

Para fabricar PCFC (celdas de combustible de cerámica protónica) altamente eficientes y física/químicamente estables, en el estudio actual se demuestra una configuración de celda de combustible con soporte de ánodo basada en películas delgadas BZY (zirconato de bario dopado con itrio). Se confirma que la estructura del ánodo de múltiples escalas con reducción de tamaño de grano y poro proporciona una superficie plana favorable a la deposición de películas delgadas y mejora la integración física. En los ánodos, por medio de PLD (deposición por láser pulsado) se fabricó con éxito un electrolito BZY columnar sin límites de grano con un espesor significativamente reducido. Se cree que este electrolito BZY delgado reduce sustancialmente la resistencia óhmica en comparación con las de las BZY-PCFC citadas en la bibliografía, que es la razón principal de la mejora del rendimiento de la celda. Los electrodos nano-porosos claramente mostrados por las imágenes TEM también fueron suficientes para implementar una resistencia de baja polarización, proporcionando sitios de reacción crecientes en ambos lados del electrolito. Como resultado, se obtuvieron salidas de potencia significativamente mejoradas a partir de la configuración de la celda de combustible con la densidad de potencia máxima de 740 mWcm⁻² a 600°C que no se ha logrado con los otros PCFC basados en BZY hasta ahora. Esta mejora del rendimiento con BZY brinda una oportunidad para el uso práctico de los PCFC que potencialmente resuelven los desafíos

conflictivos entre el alto rendimiento y la estabilidad química que se han enfrentado en los PCFC hasta ahora (Bae et al., 2017).

4.6.8 Escandio (Cs)

Escandio decorado C_{24} fullereno como material de almacenamiento de hidrógeno reversible de alta capacidad: conocimientos de las simulaciones de la teoría funcional de la densidad

Debido al continuo agotamiento de las limitadas fuentes de energía de combustibles, el fuerte aumento de la población mundial y la contaminación ambiental, la comunidad científica está buscando fuentes de energía alternativas (Hoel & Kverndokk, 1996). El hidrógeno se considera una de las alternativas destacadas de las fuentes de combustibles fósiles porque tiene la energía más alta por unidad de peso, una alta abundancia natural y un comportamiento respetuoso con el medio ambiente (Sinigaglia et al., 2017). Existen muchas limitaciones en el almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones prácticas de combustible (Yang et al., 2010). Se necesitan tanques grandes y de alta presión para el almacenamiento de hidrógeno en forma gaseosa, y el transporte de estos tanques voluminosos no es una tarea fácil. La seguridad también es una de las principales preocupaciones. La forma líquida del hidrógeno no es asequible debido al costo adicional de licuefacción. El almacenamiento de hidrógeno en forma sólida es ideal, siempre que las moléculas de hidrógeno tengan una energía de adsorción, una temperatura de desorción y un porcentaje en peso gravimétrico (% en peso) adecuados. La energía de adsorción del hidrógeno debe estar entre $-0,2\text{eV}$ y $-0,7\text{eV}$, y al menos un 6,5% en peso gravimétrico de hidrógeno debe almacenarse en un medio de almacenamiento de hidrógeno según las directrices del departamento de energía de Estados Unidos (DOE-US)(Bellosta von Colbe et al., 2019).

El uso de primeros principios simulaciones Teoría del funcional de la densidad, hemos observado que el escandio decorado C_{24} fullereno puede adsorber hasta seis moléculas de hidrógeno con una energía media de adsorción de $-0,35\text{eV}$ por H_2 y la temperatura promedio de desorción de 451K. El gravimétrico% en peso de El hidrógeno para el sistema de fullereno C_{24} decorado con escandio es 13,02%, que es suficientemente superior a la demanda del Departamento de Energía de Estados Unidos. La estructura electrónica, las interacciones

orbitales y los mecanismos de transferencia de carga se explican mediante la densidad de estados, las gráficas de diferencia de densidad de carga espacial y el análisis de carga de Bader. Una cantidad total de transferencia de carga de 1,44e desde los orbitales 3d y 4s del escandio a los orbitales de carbono 2p del C_{24} fullereno. Las moléculas de hidrógeno se unen al fullereno C_{24} decorado con escandio mediante interacciones del tipo Kubas. Los cálculos de la barrera de energía de difusión predicen que la existencia de una barrera de energía suficiente evitará el agrupamiento metal-metal. Las simulaciones de dinámica molecular ab-initio (AIMD) confirman la solidez de la estructura a la temperatura de desorción más alta. Por lo tanto, creemos que el sistema de fullereno C_{24} decorado con escandio es un dispositivo de almacenamiento de hidrógeno de alta capacidad reversible y prometedor termodinámicamente estable (Mahamiya et al., 2022).

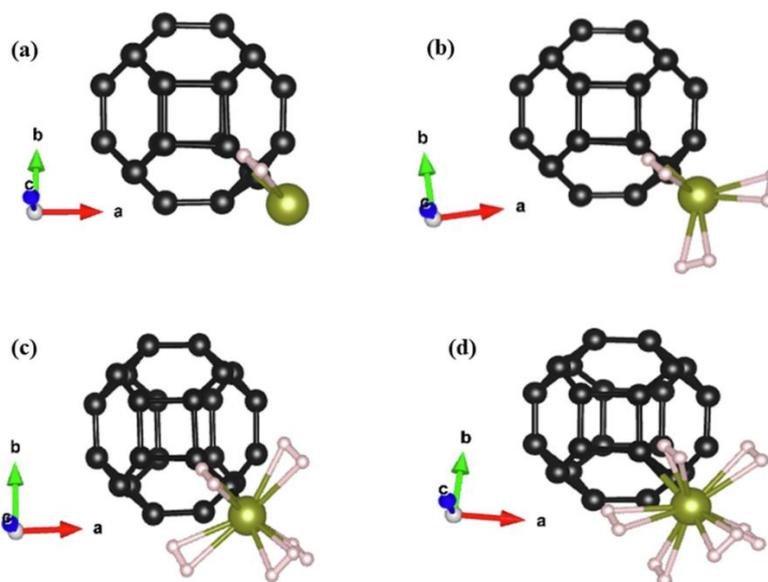


Imagen 18. Estructura optimizada de (a) $C_{24}+Sc+H_2$ (b) $C_{24}+Sc+3H_2$ (c) $C_{24}+Sc+5H_2$ (d) $C_{24}+Sc+6H_2$ composiciones (Mahamiya et al., 2022).

Hemos informado de la alta capacidad de almacenamiento de hidrógeno del fullereno C_{24} decorado con escandio utilizando cálculos de la teoría funcional de la densidad. El átomo de escandio está fuertemente unido al fullereno C_{24} (-3,44 eV) debido a la transferencia de carga del átomo de escandio a los átomos de carbono del fullereno C_{24} . El fullereno C_{24} decorado con escandio puede adsorber un número máximo de 6 moléculas de hidrógeno con una energía de adsorción promedio de -0,35 eV y una temperatura de desorción promedio de 451K. La energía de adsorción promedio y la temperatura de desorción del hidrógeno son adecuadas para

aplicaciones de pilas de combustible y la absorción de hidrógeno es del 13,02% para nuestro sistema. El % en peso gravimétrico de hidrógeno es mucho más alto que los requisitos del DOE-US. Hemos realizado cálculos de barrera de energía de difusión, lo que indica que la agrupación metal-metal puede no tener lugar, lo que garantiza la viabilidad práctica de la estructura. Hemos comprobado la solidez de la estructura a la temperatura de desorción más alta mediante la realización de simulaciones de dinámica de la molécula b-initio. Creemos que el fullereno C₂₄ decorado con escandio es un candidato de almacenamiento de alto contenido de hidrógeno prácticamente viable (Mahamiya et al., 2022).

ACTIVIDAD	Semanas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	x											
2		x	x									
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
4							x	x	x	x	x	
5												x

Actividad 1 Elaboración de la introducción el planteamiento y la justificación.

Actividad 2 Planteamiento de los objetivos generales y específicos.

Actividad 3 Revisión bibliográfica.

Actividad 4 Escritura del estado del arte.

Actividad 5 Realización de las conclusiones.

5. CONCLUSIONES

- Se mostraron los principales minerales que contienen los REE la Bastnaesita, la Monacita entre otros, los principales yacimientos y producción a nivel mundial liderada principalmente por China en las últimas décadas además de los diferentes pasos en el procesamiento de REE (Exploración, minería, Proceso de beneficio, Tratamiento químico, Separación y purificación).
- Se estudiaron las propiedades que aportan cada uno de los REE en diversos materiales como la mejora en las prestaciones de chips, aumento en rendimiento en catalizadores, transferencia de información cuántica con fotones de banda ancha en redes de comunicación cuántica óptica de alta velocidad, uso en optoelectrónica y espintrónica, uso en electrolitos para pilas de combustible de alto rendimiento y materiales para el almacenamiento de hidrogeno en estado sólido.
- Se mencionaron las aplicaciones de cada uno de los REE en la industria como el La en la fabricación vidrios y lentes de alta tecnología, el Pr en las gafas de soldadora, el Pr en obleas de semiconductores, el Eu en la luz azul de los LED, el Tb en sistemas de sonar, el Ho como catalizador orto-para para producir hidrogeno o el Itrio en gemas sintéticas.
- Se evidencio la necesidad tecnológica de los REE en la industria a través de sus usos en diversas aplicaciones tanto presentes mediante la investigación en usos comunes como futuras mediante la búsqueda de artículos recientes sobre sus usos en diversos materiales novedosos.

6. ANEXOS

Tabla 2. Algunas propiedades de REE; pm (picómetros)(Gupta & Krishnamurthy, 2016).

Nombre del Elemento	Símbolo Químico	Numero Atómico	Masa Atómica	Densidad a 25 °C (kg/m ³)	Punto de Fusión (°C)	Radio de Cation (pm)	Color de +3 cation en solución
Escandio	Sc	21	44.96	2992	1541	87.0	Incoloro
Itrio	Y	39	88.91	4475	1522	107.5	Incoloro
Lantano	La	57	138.91	6174	918	121.6	Incoloro
Cerio	Ce	58	140.12	6711	798	119.6	Incoloro
Praseodimio	Pr	59	140.91	6779	931	117.9	Amarillo-Verde
Neodimio	Nd	60	144.24	7000	1021	116.3	Rosa
Prometio	Pm	61	144.91	7220	1042	–	Rosado
Samario	Sm	62	150.36	7536	1074	113.2	Amarillo
Europio	Eu	63	151.96	5248	822	112.0	Incoloro
Gadolinio	Gd	64	157.25	7870	1313	110.7	Incoloro
Terbio	Tb	65	158.93	8267	1356	109.5	Rosa pálido
Disprosio	Dy	66	162.50	8531	1412	108.3	Verde-Amarillo pálido
Holmio	Ho	67	164.93	8797	1474	107.2	Amarillo
Erbio	Er	68	167.26	9044	1529	106.2	Rosado
Tulio	Tm	69	168.93	9325	1545	105.2	Tinte verdoso
Yterbio	Yb	70	173.04	6966	819	104.2	Incoloro
Lutecio	Lu	71	174.97	9842	1663	103.2	Incoloro

Tabla 3. Minerales primarios portadores de REE y sus fórmulas (Dostal, 2017).

Mineral	Fórmula
Alanita	$(Y, La, Ca)_2 (Al, Fe^{3+})_3 (SiO_4)_3 (OH)$
Apatito	$(Ca, La)_5 (PO_4)_3 (F, Cl, OH)$
Bastnaesita	$(La, Y) (CO_3) F$
Eudialyte	$Na_4 (Ca, La)_2 (Fe^{2+}, Mn^{2+}, Y) ZrSi_8 O_{22} (OH, Cl)_2$
Fergusonita	$(La, Y) NbO_4$
Gittinsite	$CaZrSi_2O_7$
Limoriita	$Y_2 (SiO_4) (CO_3)$
Kainosita	$Ca_2 (Y, La)_2 Si_4O_{12} (CO_3) H_2O$
Loparita	$(La, Na, Ca) (Ti, Nb) O_3$
Monacita	$(La, Ju) PO_4$
Mosandrita	$(Na, Ca)_3 Ca_3 La (Ti, Nb, Zr) (Si_2O_7)_2 (O, OH, F)_4$
Parisita	$Ca (La)_2 (CO_3)_3 F_2$
Pirocloro	$(Ca, Na, La)_2 Nb_2 O_6 (OH, F)$
Rinkita (Rinkolita)	$(Ca, La)_4 Na (Na, Ca)_2 Ti (Si_2O_7)_2 (O, F)_2$
Steenstrupine	$Na_{14} La_6 Mn_2 Fe_2 (Zr, Th) (Si_6O_{18})_2 (PO_4)_7 \cdot 3H_2O$
Synchysite	$Ca (La) (CO_3)_2 F$
Xenotime	YPO_4
Circón	$(Zr, La) SiO_4$

Tabla 4. Fuentes minerales primarias de monacita y su contenido de tierras raras (porcentaje del óxido total de tierras raras) por depósitos a nivel mundial (Hedrick et al., 1999), (Kumari et al., 2015).

Elementos de Tierras Raras	Monocita					
	North Capel, West Australia	North Stradbroke Island, Queensland, Australia	Green Cove Springs, USA	Nangang, Guangdong, China	East Coast, Brazil	Mount Weld, Australia
Cerium	46.0	45.8	43.7	42.7	47.0	51.0
Lanthanum	23.9	21.5	17.5	23.0	24.0	26.0
Neodymium	17.4	18.6	17.5	17.0	18.5	15.0
Praseodymium	5.0	5.3	5.0	4.1	4.5	4.0
Samarium	2.5	3.1	4.9	3.0	3.0	1.8
Europium	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.4
Gadolinium	1.5	1.8	6.6	2.0	1.0	1.0
Terbium	0.0	0.3	0.3	0.7	0.1	0.1
Dysprosium	0.7	0.6	0.9	0.8	0.4	0.2
Erbium	0.2	0.2	Trazas	0.3	0.1	0.2
Yttrium	2.4	2.5	3.2	2.4	1.4	Trazas
Holmium	0.1	0.1	0.1	0.1	Trazas	0.1
Thulium	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Ytterbium	0.1	0.1	0.2	2.4	0.0	0.1
Lutetium	Trazas	0.0	Trazas	0.1	ND	Trazas
TOTAL	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla 5. Países productores y reservorios de REE (King, 2020).

Producción y reservas mundiales de minas de REE (estimaciones para 2020)		
País	Producción (toneladas métricas)	Reservas (toneladas métricas)
Estados Unidos	38.000	1,500,000
Australia	17.000	4.100.000
Brasil	1.000	21.000.000
Birmania	30.000	No disponible
Burundi	500	No disponible
Canadá	-	830.000
China	140.000	44.000.000
Groenlandia	-	1,500,000
India	3000	6,900,000
Madagascar	8.000	No disponible
Rusia	2700	12.000.000
Sudáfrica	-	790.000
Tanzania	-	890.000
Tailandia	2.000	No disponible
Vietnam	1.000	22.000.000
Otros países	100	310 000
Total, mundial (redondeado)	240.000	120.000.000

Tabla 6. Abundancia, recursos y producción de REE y Cobre (Haque et al., 2014)

Elemento	Abundancia de la corteza en ppm	Toneladas de recursos	Toneladas de producción	Años de reserva
Lantano (La)	32	22.600.000	12.500	1.800
Cerio (Ce)	68	31.700.000	24.000	1.300
Praseodimio (Pr)	9.5	4.800.000	2400	2.000
Neodimio (Nd)	38	16.700.000	7.300	2.300
Prometio (Pm)	N / A	N / A	N / A	N/A
Samarium (Sm)	7,9	2.900.000	700	4.100
Europio (Eu)	2.1	244.333	400	610
Gadolinio (Gd)	7.7	3.622.143	400	9.100
Terbio (Tb)	1.1	566.104	10	57.000
Disprosio (Dy)	6	2.980.000	100	29.800
Holmio (Hm)	1.4	N / A	10	10
Erbio (Er)	3.8	1.850.000	500	3.700
Tulio (Tm)	0,48	334.255	50	6.700
Yterbio (Yb)	3.3	1.900.000	50	38.000
Lutecio (Lu)		395.000	N / A	N/A
Yttrio (Y)	30	9.000.000	8900	1011
Escandio (Sc)	22	N / A	400 kg de producción primaria	1600 kg / año de existencias rusas
Cobre (Cu)	60–70	1.615.000.000	17.000.000	Muy abundante

Tabla 7. Resumen sobre exploración greenfield y exploración brownfield (Suli et al., 2017).

Categoría	Descripción
Exploración Greenfield	<p>La actividad de exploración greenfield se basa más en la predicción de nuevas áreas. Dos tipos:</p> <p>1) Proyecto de exploración de base: El geólogo tiene la intención de ubicar el depósito de minerales y gastar el costo en el estudio del mineral, lo que implica medir la gravedad, el magnetismo o la radiactividad. El costo puede ser de más de 10 millones de dólares.</p> <p>2) Proyecto de exploración avanzada: El geólogo había confirmado el depósito mineral y procedió a la actividad de perforación. El costo alcanzó los 100 millones de dólares.</p>
Exploración Brownfield	<p>La actividad de exploración de terrenos abandonados es diferente a la actividad de nuevos terrenos. Los geólogos continúan con la mina existente o la mina de operación de proximidad. La actividad de exploración de terrenos abandonados es mucho más interesante debido al bajo riesgo y bajo costo que implica esta actividad.</p>

Tabla 8. Resumen de diferentes tipos de adsorbentes para proceso de bioabsorción (Suli et al., 2017).

No.	REM	Adsorbentes	Capacidad de adsorción (mg/ g)
1	La	Biomasa de sargazo	40,28
		Sargassum fluitans	101,4
		Pseudomonas sp.	120
		Agrobacterium sp. HNI	35,27
		Polvo de hoja de platamus orientalis	28,65
		Carbón activado de cáscaras de arroz	175,4
		Carbón de bambú	120
		Resina D113-III	232
2	Nd	Monoraphidium sp.	1511
		Penicillium sp., Carbón activado	178
		levadura de panadería	313
		Carbón activado	61
		Kluyveromyces marxianus, Candida	12
		Colliculaosa, Debaromyces hansenii	10
		Resina D113-III	232
3	Ce	Polvo de hoja de platamus orientalis	32,05
		Agrobacterium sp. HNI	34,59
4	Er	Resina D113-III	250
		Carbón activado de cáscaras de arroz	250
5	Eu	Biomasa de sargazo	62,3
6	Sm	Biomasa de sargazo	105
7	Pr	Biomasa de sargazo	98
8	Yd	Biomasa de sargazo	48,45
		Resina D113-III	265,8

Tabla 9. Propiedades físicas del lantano (AZO Materials, 2021a).

Nombre	Lantano
Símbolo	La
Número atómico	57
Peso atómico	138.90547 (7) uma
Estado estándar	sólido a 298 K
ID de registro CAS	7439-91-0
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6 (lantanoide)
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	918°C
Punto de ebullición	3464 °C
Densidad	6,15 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido
Energía de ionización	5.577 eV
Estado de oxidación	3

Tabla 10. Propiedades físicas del Ce (AZO Materials, 2021f).

Material:	Cerio		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0168	0.0172	m ³ / kmol
Densidad	6.6	6,75	Mg / m ³
Contenido energético	100	300	MJ / kg
Módulo de volumen	16	24	GPa
Fuerza compresiva	90	110	MPa
Ductilidad	0,15	0,3	
Límite elástico	90	110	MPa
Límite de resistencia	50	78	MPa
Tenacidad a la fractura	30	55	MPa.m ^{1/2}
Dureza	175	425	MPa
Coefficiente de pérdida	0,003	0,005	
Módulo de ruptura	90	110	MPa
El coeficiente de Poisson	0,24	0,255	
Módulo de corte	10	dieciséis	GPa
Fuerza de Tensión	100	155	MPa
El módulo de Young	28	35	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	32	44	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	320	400	K
Punto de fusión	1060	1074	K
Temperatura mínima de servicio	0	0	K
Calor específico	180	215	J / kg.K
Conductividad térmica	10	12	W / mK
Expansión térmica	6	9	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	75	100	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 11. Propiedades físicas de praseodimio (AZO Materials, 2012c).

Nombre	Praseodimio
Símbolo	Pr
Número atómico	59
Peso atómico	140,9 uma
Estado estándar	Sólido a 298 K
ID de registro CAS	7440-10-0
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	Blanco plateado, tinte amarillento
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1204 K (931 ° C o 1708 ° F)
Punto de ebullición	3793 K (3520 ° C o 6368 ° F)
Densidad	6,77 g / cm ³
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 12. Neodimio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021h).

Material:	Neodimio		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0205	0.0207	m ³ / kmol
Densidad	7	7.01	Mg / m ³
Contenido energético	100	400	MJ / kg
Módulo de volumen	28	38	GPa
Fuerza compresiva	150	180	MPa
Ductilidad	0.015	0.12	
Límite elástico	150	180	MPa
Límite de resistencia	60	105	MPa
Tenacidad a la fractura	25	55	MPa.m ^{1/2}
Dureza	250	475	MPa
Coefficiente de pérdida	0.0017	0.0022	
Módulo de ruptura	150	180	MPa
El coeficiente de Poisson	0.28	0.31	
Módulo de corte	14	18	GPa
Fuerza de Tensión	155	210	MPa
El módulo de Young	37.5	41.5	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	49	75	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	390	480	K
Punto de fusión	1285	1297	K
Temperatura mínima de servicio	0		K
Calor específico	190	210	J / kg.K
Conductividad térmica	13	16.5	W / mK
Expansión térmica	6	7.5	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	63	70	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 13. Europio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021g).

Material:	Europio - Propiedades físicas		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0289	0.0291	m ³ / kmol
Densidad	5.2	5.3	Mg / m ³
Contenido energético	1100	2600	MJ / kg
Módulo de volumen	6	16	GPa
Fuerza compresiva	60	80	MPa
Ductilidad	0.3	0.5	
Límite elástico	60	80	MPa
Límite de resistencia	45	80	MPa
Tenacidad a la fractura	30	50	MPa.m ^{1/2}
Dureza	180	240	MPa
Coefficiente de pérdida	0.005	0.009	
Módulo de ruptura	60	80	MPa
El coeficiente de Poisson	0.15	0.29	
Módulo de corte	4	10	GPa
Fuerza de Tensión	120	160	MPa
El módulo de Young	14.5	18.5	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	60	75	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	320	400	K
Punto de fusión	1080	1096	K
Temperatura mínima de servicio	0	0	K
Calor específico	170	190	J / kg.K
Conductividad térmica	13	14	W / mK
Expansión térmica	31	33	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	90	100	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 14. Gadolinio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021e).

Material:	Gadolinio - Propiedades físicas		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0289	0.0291	m ³ / kmol
Densidad	5.2	5.3	Mg / m ³
Contenido energético	1100	2600	MJ / kg
Módulo de volumen	6	16	GPa
Fuerza compresiva	60	80	MPa
Ductilidad	0.3	0.5	
Límite elástico	60	80	MPa
Límite de resistencia	45	80	MPa
Tenacidad a la fractura	30	50	MPa.m ^{1/2}
Dureza	180	240	MPa
Coefficiente de pérdida	0.005	0.009	
Módulo de ruptura	60	80	MPa
El coeficiente de Poisson	0.15	0.29	
Módulo de corte	4	10	GPa
Fuerza de Tensión	120	160	MPa
El módulo de Young	14.5	18.5	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	60	75	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	320	400	K
Punto de fusión	1080	1096	K
Temperatura mínima de servicio	0	0	K
Calor específico	170	190	J / kg.K
Conductividad térmica	13	14	W / mK
Expansión térmica	31	33	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	90	100	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 15. Propiedades físicas del Terbio (AZO Materials, 2012d).

Nombre	Terbio
Símbolo	Tuberculosis
Número atómico	sesenta y cinco
Peso atómico	158,92535 (2)
Estado estándar	Sólido a 298 K
ID de registro CAS	7440-27-9
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6 (lantanoide)
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	Blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1629 K (1356 ° C o 2473 ° F)
Punto de ebullición	3503 K (3230 ° C o 5846 ° F)
Densidad	8,23 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 16. Disproσιο - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021b).

Material:	Disproσιο - Propiedades físicas		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0188	0.0192	m ³ / kmol
Densidad	8.5	8.6	Mg / m ³
Contenido energético	200	500	MJ / kg
Módulo de volumen	36	44	GPa
Fuerza compresiva	200	360	MPa
Ductilidad	0.02	0.08	
Límite elástico	200	360	MPa
Límite de resistencia	85	235	MPa
Tenacidad a la fractura	40	95	MPa.m ^{1/2}
Dureza	400	950	MPa
Coefficiente de pérdida	0.0006	0.0013	
Módulo de ruptura	200	360	MPa
El coeficiente de Poisson	0.232	0.247	
Módulo de corte	24	26	GPa
Fuerza de Tensión	220	470	MPa
El módulo de Young	61	64	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	100	110	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	500	620	K
Punto de fusión	1675	1685	K
Temperatura mínima de servicio	0	0	K
Calor específico	165	180	J / kg.K
Conductividad térmica	10	10.7	W / mK
Expansión térmica	8	11	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	60	120	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 17. Propiedades físicas del Holmio (AZO Materials, 2012b).

Nombre	Holmio
Símbolo	Ho
Número atómico	67
Peso atómico	164,9 uma
Estado estándar	Sólido a 298 K
ID de registro CAS	7440-60-0
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	Blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1747 K (1474 ° C o 2685 ° F)
Punto de ebullición	2973 K (2700 ° C o 4892 ° F)
Densidad	8,8 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 18. Erbio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021c).

Material:	Erbio - Propiedades físicas		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0183	0.0186	m ³ / kmol
Densidad	9	9.1	Mg / m ³
Contenido energético	300	800	MJ / kg
Módulo de volumen	42	50	GPa
Fuerza compresiva	250	320	MPa
Ductilidad	0.03	0.08	
Límite elástico	250	320	MPa
Límite de resistencia	100	175	MPa
Tenacidad a la fractura	55	90	MPa.m ^{1/2}
Dureza	400	1200	MPa
Coefficiente de pérdida	0.0007	0.001	
Módulo de ruptura	250	320	MPa
El coeficiente de Poisson	0.23	0.24	
Módulo de corte	26	32	GPa
Fuerza de Tensión	260	345	MPa
El módulo de Young	69	75	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	95	110	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	540	660	K
Punto de fusión	1794	1804	K
Temperatura mínima de servicio	0	0	K
Calor específico	160	175	J / kg.K
Conductividad térmica	13.5	14.5	W / mK
Expansión térmica	8.5	10	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	88	100	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 19. Propiedades físicas del Tulio (AZO Materials, 2012e).

Nombre	Tulio
Símbolo	Tm
Número atómico	69
Peso atómico	168,93421 (2)
Estado estándar	Sólido a 298 K
ID de registro CAS	7440-30-4
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6 (lantanoide)
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	Blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1818 K (1545 ° C o 2813 ° F)
Punto de ebullición	2223 K (1950 ° C o 3542 ° F)
Densidad	9,32 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 20. Propiedades físicas de Iterbio (AZO Materials, 2021j).

Nombre	Iterbio
Símbolo	Yb
Número atómico	70
Peso atómico	173.054
Estado estándar	Sólido a 298 K
ID de registro CAS	7440-64-4
Nombre del grupo	Lantanoide
Período en la tabla periódica	6
Bloque en tabla periódica	f-bloque
Color	Blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1092 K (819 ° C o 1506 ° F)
Punto de ebullición	1469 K (1196 ° C o 2185 ° F)
Densidad	6,90 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 21. Propiedades físicas del Lutecio (AZO Materials, 2012a).

Nombre	Lutecio
Símbolo	Lu
Número atómico	71
Peso atómico	174,9 uma
Estado estándar	sólido a 298 K
ID de registro CAS	7439-94-3
Grupo en tabla periódica	3
Período en la tabla periódica	6
Bloque en tabla periódica	bloque d
Color	blanco plateado
Clasificación	Metálico
Punto de fusión	1936 K (1663 ° C o 3025 ° F)
Punto de ebullición	3675 K (3402 ° C o 6156 ° F)
Densidad	9,84 g / cm 3
Fase a temperatura ambiente	Sólido

Tabla 22. Itrio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021i).

Material:	Itrio - Propiedades físicas		
Composición:	> 99% Ce		
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0198	0.02	m ³ / kmol
Densidad	4.4	4.55	Mg / m ³
Contenido energético	100	800	MJ / kg
Módulo de volumen	35	39	GPa
Fuerza compresiva	50	415	MPa
Ductilidad	0.02	0.15	
Límite elástico	50	415	MPa
Límite de resistencia	45	255	MPa
Tenacidad a la fractura	40	100	MPa.m ^{1/2}
Dureza	300	1500	MPa
Coefficiente de pérdida	0.0008	0.0075	
Módulo de ruptura	50	415	MPa
El coeficiente de Poisson	0.26	0.27	
Módulo de corte	25	26	GPa
Fuerza de Tensión	115	505	MPa
El módulo de Young	64	68	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	185	200	kJ / kg
Temperatura máxima de servicio	540	660	K
Punto de fusión	1790	1796	K
Temperatura mínima de servicio	0		K
Calor específico	285	310	J / kg.K
Conductividad térmica	16	17.2	W / mK
Expansión térmica	10	11.5	10 ⁻⁶ / K
Potencial de avería			MV / m
Constante dieléctrica			
Resistividad	57	60	10 ⁻⁸ ohmios

Tabla 23. Escandio - Propiedades físicas (AZO Materials, 2021d)

Material:	Escandio - Propiedades físicas		
Composición: <99% Sc			
Propiedad	Valor mínimo (SI)	Valor máximo (SI)	Unidades (SI)
Volumen atómico (promedio)	0.0149	0.0152	m ³ /kmol
Densidad	2.95	3.05	Mg/m ³
Contenido energético	2100	5200	MJ/kg
Módulo de volumen	52	62	GPa
Fuerza compresiva	100	125	MPa
Ductilidad	0.1	0.15	
Límite elástico	100	125	MPa
Límite de resistencia	65	105	MPa
Tenacidad a la fractura	60	85	MPa.m ^{1/2}
Dureza	750	950	MPa
Coefficiente de pérdida	0.001	0.003	
Módulo de ruptura	100	125	MPa
El coeficiente de Poisson	0.27	0.28	
Módulo de corte	28	32	GPa
Fuerza de Tensión	170	210	MPa
El módulo de Young	74	80	GPa
Temperatura del vidrio			K
Calor latente de fusión	350	360	kJ/kg
Temperatura máxima de servicio	540	670	K
Punto de fusión	1805	1814	K
Temperatura mínima de servicio	0		K
Calor específico	550	575	J/kg.K
Conductividad térmica	15	16	W/m.K
Expansión térmica	9.5	12.5	10 ⁻⁶ /K
Potencial de avería			MV/m
Constante dieléctrica			
Resistividad	61	70	10 ⁻⁸ ohm.m

Tabla 24. Descubrimiento y origen en la tierra de los REE

Imagen de REE	Descubrimiento y origen mineral
<p>Lantano (La)</p>  <p>Imagen 19. 1,5 gramos de lantano puro. Tamaño original en cm: 1 x 1, almacenado en una ampolla de vidrio llena de argón (Images of Elements, 2016f).</p>	<p>El elemento fue descubierto como óxido (lantana) en 1839 por Carl Gustaf Mosander, quien lo distinguió del óxido de cerio (ceria). Su nombre se deriva del griego lanthanein, que significa "estar oculto", lo que indica que es difícil de aislar. El lantano se encuentra en los minerales de tierras raras monacita y bastnasita. Es tan abundante como el cobalto en la corteza continental superior de la Tierra (Britannica, 2021g).</p>
<p>Cerio (Ce)</p>  <p>Imagen 20. Cerio ultrapuro bajo argón, 1,5 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1 (Images of Elements, 2016a).</p>	<p>El Ce como óxido (ceria) fue descubierto en 1803 por los químicos suecos Jöns Jacob Berzelius y Wilhelm Hisinger, trabajando juntos e independientemente por el químico alemán Martin Klaproth. Recibió su nombre del asteroide Ceres, que fue descubierto en 1801. El cerio se encuentra en la bastnasita, la monacita y muchos otros minerales. También se encuentra entre los productos de fisión del uranio, plutonio y torio. El cerio es casi tan abundante como el cobre y casi tres veces más abundante que el plomo en las rocas ígneas de la corteza terrestre (Britannica, 2021f).</p>

Praseodimio (Pr)



Imagen 21. Piezas de praseodimio ultrapuras bajo argón, 1,5 gramos. Tamaño original en cm: 0,5 – 1 (Images of Elements, 2016h).

El praseodimio se descubrió en la didimia, una mezcla de varios óxidos de tierras raras. A partir de él, por cristalización fraccionada repetida de nitrato de amonio didimio, químico austriaco Carl Auer von Welsbach en 1885 separó las sales de los elementos praseodimio (la fracción verde) y neodimio (la fracción rosa). El praseodimio se encuentra en minerales como la monacita y la bastnasita y como uno de los productos de la fisión nuclear (Britannica, 2021e).

Neodimio (Nd)



Imagen 22. Neodimio ultrapuro bajo argón, 5 gramos. Longitud original de la pieza grande en cm (Britannica, 2021h).

El químico austriaco Carl Auer von Welsbach descubrió el neodimio en 1885 al separar el nitrato de amonio y didimio preparado a partir de didimio (una mezcla de óxidos de tierras raras) en una fracción de neodimio y una fracción de praseodimio mediante cristalización repetida. De las tierras raras, solo el itrio, el lantano y el cerio son más abundantes que el neodimio. En las rocas ígneas de la corteza terrestre, que es más de dos veces tan abundante como el plomo y aproximadamente la mitad tan abundantes como el cobre (Britannica, 2021h).

Prometio (Pm)



Imagen 23. Prometio puro (Indiamart, 2021)

La prueba química concluyente de la existencia de prometio, el último de los elementos de tierras raras por descubrir, fue obtenida en 1945 (anunciada hasta 1947) por químicos estadounidenses. Jacob A. Marinsky, Lawrence E. Glendenin y Charles D. Coryell, quien aisló los isótopos radiactivos a partir de productos de fisión de uranio en Clinton Laboratories en Tennessee. La identificación se estableció firmemente mediante cromatografía de intercambio iónico. (Investigadores anteriores pensaron que habían encontrado el elemento con número atómico 61 en tierras raras naturales y lo habían llamado prematuramente illinium y florentium) (Britannica, 2021j).

Samario (Sm)



Imagen 24. Samario ultrapuro sublimado, 2 gramos. Tamaño original en cm: 0,8 x 1,5 (Images of Elements, 2016i).

El samario fue aislado como un óxido impuro e identificado espectroscópicamente como un nuevo elemento en 1879 por un químico francés Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran. El samario se encuentra en muchos otros minerales de tierras raras, pero se obtiene casi exclusivamente de bastnasita; también se encuentra en productos de fisión nuclear. En la corteza terrestre, samario es tan abundante como el estaño (Britannica, 2018a).

Europio (Eu)



Imagen 25. Europio débilmente oxidado, por lo tanto, ligeramente amarillento. 1,5 gramos, pieza grande 0,6 x 1,6 cm (Images of Elements, 2016d).

El elemento fue descubierto en 1901 por un químico francés. Eugène-Anatole Demarçay y llamado así por Europa. Uno de las menos abundantes tierras raras (su concentración en la corteza terrestre es casi el mismo que el bromo), se produce en pequeñas cantidades en muchos minerales de tierras raras tales como monacita y bastnasita y también en los productos de la fisión nuclear (Britannica, 2021c).

Gadolinio (Gd)



Imagen 26. Gadolinio amorfo ultrapuro, 12 gramos. Tamaño original en cm: 1,5 x 2 (Images of Elements, 2016e).

El gadolinio fue descubierto por Jean-Charles Galissard de Marignac y Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran. Marignac separó (1880) una nueva tierra rara (óxido metálico) del mineral samarskita, y Lecoq de Boisbaudran obtuvo (1886) una muestra bastante pura de la misma tierra, que con el consentimiento de Marignac denominó gadolinia, en honor a un mineral en el que se encuentra. que a su vez lleva el nombre del químico finlandés Johan Gadolin. El gadolinio se encuentra en muchos minerales junto con otras tierras raras, pero se obtiene principalmente de la bastnasita. También se encuentra en productos de fisión nuclear. En la corteza terrestre gadolinio es tan abundante como el níquel y el arsénico (Britannica, 2021i).

Terbio (Tb)



Imagen 27. Terbio puro, 3 gramos. Tamaño original: 1 cm (Images of Elements, 2016k).

El elemento fue descubierto en 1843 por un químico sueco Carl Gustaf Mosander en una fracción pesada de tierras raras llamada itria, pero su existencia no se confirmó durante al menos 30 años, y los compuestos puros no se prepararon hasta 1905. El terbio se encuentra en muchos minerales de tierras raras, pero se obtiene casi exclusivamente de bastnasita y de arcillas de intercambio iónico de laterita. También se encuentra en los productos de la fisión nuclear. El terbio es una de las tierras raras menos abundantes; su abundancia en la corteza terrestre es aproximadamente el mismo que el talio (Britannica, 2019b).

Disproso (Dy)



Imagen 28. Dendritas de disproso ultrapuras. Tamaño original en cm: 2 x 2 (Images of Elements, 2016b).

El Químico francés Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran encontró por primera vez este elemento (1886) asociado con holmio y otros lantánidos pesados; Químico francés Georges Urbain más tarde (1906) pudo preparar una fracción razonablemente pura. Algunas fuentes minerales importantes de disproso son las arcillas iónicas de laterita, xenotima, fergusonita, gadolinita, euxenita, policrasa y blomstrandina. También ocurre en los productos de la fisión nuclear (Britannica, 2019a).

Holmio (Ho)



Imagen 29. Holmio ultrapuro, 17 gramos. Tamaño original 1.5 x 2.5 cm (Images of Elements, 2016b)

El holmio fue descubierto espectroscópicamente (1878) por los químicos suizos Jacques-Louis Soret y Marc Delafontaine e independientemente (1879) por el químico sueco Per Teodor Cleve, quien lo separó químicamente del erbio y el tulio. Cleve nombró al elemento por su ciudad natal de Estocolmo, su nombre latinizado es Holmia. El holmio se encuentra asociado con otras tierras raras en arcillas de laterita y en los minerales xenotima, euxenita y muchos otros; también ocurre en los productos de la fisión nuclear (Britannica, 2020).

Erbio (Er)



Imagen 30. Erbío ultrapuro con trazas cortadas, 25 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 2 x 2 (Images of Elements, 2016c).

El elemento fue descubierto en 1842 como óxido por Carl Gustaf Mosander, quien originalmente lo llamó terbia; en la confusión que surge de la similitud en las propiedades de los elementos de las tierras raras, los nombres de dos, terbio y erbio, se intercambiaron (c. 1860). El elemento se encuentra en muchos minerales de tierras raras; entre las más importantes se encuentran las arcillas iónicas de laterita, xenotime y euxenita. El erbio también se encuentra en los productos de la fisión nuclear. En la corteza de la tierra es tan abundante como tantalio y tungsteno (Britannica, 2021b).

Tulio (Tm)

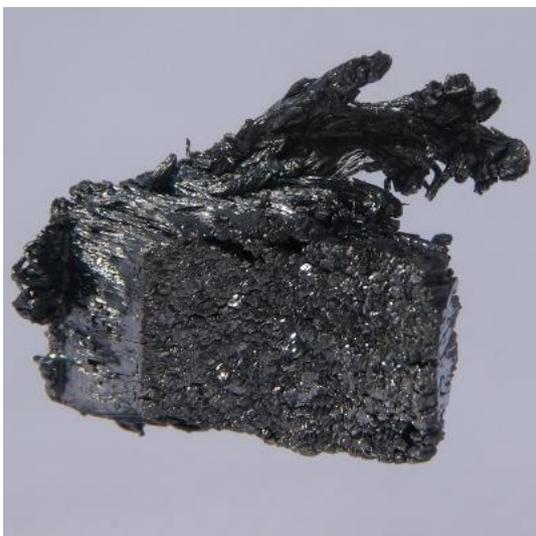


Imagen 31. Tulio cristalino ultrapuro, 22,3 gramos. Tamaño original en cm: 2,5 x 3 (Images of Elements, 2017a).

El tulio es un metal blanco plateado moderadamente duro que es estable en el aire, El tulio fue descubierto en 1879, junto con el holmio, por Per Teodor Cleve, quien nombró al óxido thulia por un nombre antiguo de Escandinavia. Se encuentra en pequeñas cantidades en minerales de tierras raras como arcillas iónicas de laterita, xenotima y euxenita y en productos de fisión nuclear. El tulio es uno de los elementos de tierras raras más raros. Su abundancia en la corteza terrestre es casi lo mismo que los de antimonio y yodo (Britannica, 2019c).

Iterbio (Yb)



Imagen 32. Iterbio ultrapuro, 2 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1,5 (Images of Elements, 2017b).

El primer concentrado de iterbio fue obtenido en 1878 por un químico suizo Jean-Charles Galissard de Marignac y nombrado por él por la ciudad de Ytterby, Suecia, donde se encontró (y el primer elemento de tierras raras descubierto, el itrio). Químico francés Georges Urbain y el químico austriaco Carl Auer von Welsbach demostró de forma independiente en 1907-08 que la tierra de Marignac estaba compuesta de dos óxidos, que Urbain llamó neoytterbia y lutetia. Los elementos ahora se conocen como iterbio y lutecio. El iterbio se encuentra entre las tierras raras menos abundantes. Ocurre en cantidades mínimas en muchos minerales de tierras raras como arcillas de laterita, xenotima y euxenita y también se encuentra en productos de fisión nuclear. (Britannica, 2021a).

Lutecio (Lu)



Imagen 33. Pieza ultrapura de lutecio, 3 gramos. Tamaño original en cm: 1 x 1 (Images of Elements, 2016g)

Fue descubierto en 1907-08 por un químico austriaco Carl Auer von Welsbach y Georges Urbain, trabajando de forma independiente. Urbain derivó el nombre del elemento de Lutetia, el antiguo nombre romano de París, en honor a su ciudad natal. El nombre lutecio se aceptó ampliamente, excepto en Alemania, donde se lo llamó comúnmente casiopeio hasta la década de 1950. Una de las tierras raras más raras, el lutecio se encuentra en minerales de tierras raras como arcillas de laterita, xenotima y euxenita. Aunque el lutecio contiene sólo trazas (menos del 0,1 por ciento en peso) de los minerales de importancia comercial bastnasita y monacita, se ha demostrado que es factible extraer el metal como subproducto. El lutecio también se encuentra en los productos de fisión nuclear (Britannica, 2019d).

Itrio (Y)



Imagen 34 Cristal de itrio ultrapuro por dos caras. Tamaño original en cm: 2 x 3 (Images of Elements, 2016l).

En 1794 químico finlandés Johan Gadolin aisló itria, una tierra nueva u óxido metálico, de un mineral encontrado en Ytterby, Suecia. La itria, la primera tierra rara que se descubrió, resultó ser una mezcla de óxidos de la cual, en un lapso de más de un siglo, nueve elementos: itrio, escandio y los metales pesados lantánidos del terbio al lutecio, se separaron. El itrio se encuentra especialmente en los minerales pesados de tierras raras, de los cuales las arcillas de laterita, gadolinita, euxenita y xenotima son las más importantes. En las rocas ígneas de la corteza terrestre, este elemento es más abundante que cualquiera de los otros elementos de tierras raras excepto cerio y es dos veces tan abundante como el plomo. El itrio también se encuentra en productos de fisión nuclear (Britannica, 2021d).

Escandio (Sc)



Imagen 35. Escandio cristalino ultrapuro, 5 gramos. Tamaño original en cm: 2 (Images of Elements, 2016j).

Después de que el químico ruso Dmitry Ivanovich Mendeleev en 1871 predijo la existencia de este elemento, llamándolo provisionalmente ekaboron, químico sueco Lars Fredrik Nilson en 1879 descubrió su óxido, escandia, en los minerales de tierras raras gadolinita y euxenita, y un químico sueco Per Teodor Cleve más tarde en 1879 identificó al escandio como el hipotético ekaboron. El escandio se encuentra en pequeñas proporciones, generalmente menos del 0,2 por ciento, en muchos de los minerales pesados de lantánidos y en muchos minerales de estaño, uranio y tungsteno. La thortveitita (un silicato de escandio) es el único mineral que contiene grandes cantidades de escandio, alrededor del 34 por ciento, pero desafortunadamente este mineral es bastante raro y no es una fuente importante de escandio. La abundancia cósmica de escandio es relativamente alta. Aunque es solo el 50° elemento más abundante en la Tierra (su abundancia es similar a la del berilio), es aproximadamente el 23° elemento más abundante en el Sol (Britannica, 2018b).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Zied, B. M., Mohamed, Y. A., & Asiri, A. M. (2013). Fabrication, characterization, and electrical conductivity properties of Pr₆O₁₁ nanoparticles. *J. Rare Earths*, 31(7), 701. [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(12\)60345-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(12)60345-7)
- Afzelius, M., Usmani, I., Amari, A., Lauritzen, B., Walther, A., Simon, C., Sangouard, N., Minář, J., De Riedmatten, H., Gisin, N., & Kröll, S. (2010). Demonstration of atomic frequency comb memory for light with spin-wave storage. *Phys. Rev. Lett.*, 104(4), 040503. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.104.040503>
- AHRENS, L. H. (1983). The Rare Earth Elements. In *Ionization Potentials* (pp. 23–28). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-025274-2.50011-x>
- Alyani, M., Mohamadalizadeh, A., Towfighi, J., & Hosseini, N. (2012). Thermal catalytic cracking of naphtha over multi wall carbon nanotube catalysts. *J Anal Appl Pyrol*, 98, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.002>
- AZO Materials. (2021a). *Lanthanum – Properties and Applications*. Lanthanum – Properties and Applications. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6064>
- AZO Materials. (2021b). *Properties: An Introduction to Dysprosium*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1125>
- AZO Materials. (2021c). *Properties: An Introduction to Erbium*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1127>
- AZO Materials. (2021d). *Properties: An Introduction to Scandium*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1452>
- AZO Materials. (2021e). *Properties: An Overview of Gadolinium*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1131>
- AZO Materials. (2021f). *Properties: Cerium - Cerium (Ce) Properties and Applications*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=592>
- AZO Materials. (2021g). *Properties: Europium - Properties and Applications*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1128>
- AZO Materials. (2021h). *Properties: Neodymium - History, Properties and Applications*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1595>
- AZO Materials. (2021i). *Properties: Yttrium - History, Occurrence, Properties and Applications*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1638>

- AZO Materials, G. P. T. (2012a, December 12). *Lutetium (Lu) - Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Lutetium*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7921>
- AZO Materials, G. P. T. (2012b, December 17). *Holmium (Ho) - Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7916>
- AZO Materials, G. P. T. (2012c, December 17). *Praseodymium (Pr) - Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Praseodymium*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7939>
- AZO Materials, G. P. T. (2012d, December 17). *Terbium (Tb) - Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Terbium*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7961>
- AZO Materials, G. P. T. (2012e, December 17). *Thulium (Tm) - Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Thulium*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7960>
- AZO Materials, G. P. T. (2021j). *Ytterbium (Yb)-Discovery, Occurrence, Production, Properties and Applications of Ytterbium*.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7950>
- Bae, K., Jang, D. Y., Choi, H. J., Kim, D., Hong, J., Kim, B. K., Lee, J. H., Son, J. W., & Shim, J. H. (2017). Demonstrating the potential of yttrium-doped barium zirconate electrolyte for high-performance fuel cells. *Nature Communications* 2017 8:1, 8(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1038/NCOMMS14553>
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285–1303.
<https://doi.org/10.1016/J.GSF.2018.12.005>
- Balboul, B. A. A. (2010). Synthesis course and surface properties of praseodymium oxide obtained via thermal decomposition of praseodymium acetate: Impacts of the decomposition atmosphere. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 88(2), 192.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.04.006>
- Battaglia, C., Escarré, J., Söderström, K., Charrière, M., Despeisse, M., Haug, F. J., & Ballif, C. (2011). Nanomoulding of transparent zinc oxide electrodes for efficient light trapping in solar cells. *Nature Photonics*, 5(9), 535–538.

<https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2011.198>

Bellosta von Colbe, J., Ares, J. R., Barale, J., Baricco, M., Buckley, C., Capurso, G., Gallandat, N., Grant, D. M., Guzik, M. N., Jacob, I., Jensen, E. H., Jensen, T., Jepsen, J., Klassen, T., Lototsky, M. V., Manickam, K., Montone, A., Puszkiel, J., Sartori, S., ... Dornheim, M. (2019). Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(15), 7780–7808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.104>

Bernal, S., Botana, F. J., Cifredo, G., Calvino, J. J., Jobacho, A., & Rodriguez-Izquierdo, J. M. (1992). Preparation and characterization of a praseodymium oxide to be used as a catalytic support. *J. Alloys Compd.*, *180*(1–2), 271. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(92\)90392-m](https://doi.org/10.1016/0925-8388(92)90392-m)

Britannica, T. E. of E. (2018a, January 24). *Samarium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/samarium>

Britannica, T. E. of E. (2018b, January 24). *scandium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/scandium>

Britannica, T. E. of E. (2019a, March 11). *dysprosium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/dysprosium>

Britannica, T. E. of E. (2019b, April 15). *terbium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/terbium>

Britannica, T. E. of E. (2019c, April 15). *thulium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/thulium>

Britannica, T. E. of E. (2019d, April 16). *lutetium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/lutetium>

Britannica, T. E. of E. (2020, November 4). *holmium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/holmium>

Britannica, T. E. of E. (2021a, April 21). *ytterbium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/ytterbium>

Britannica, T. E. of E. (2021b, April 27). *erbium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/erbium>

Britannica, T. E. of E. (2021c, April 27). *Europium*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/europium>

Britannica, T. E. of E. (2021d, May 9). *yttrium*. *Encyclopedia Britannica*.

- <https://www.britannica.com/science/yttrium>
- Britannica, T. E. of E. (2021e, May 11). *Praseodymium*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/praseodymium>
- Britannica, T. E. of E. (2021f, May 16). *Cerium*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/cerium>
- Britannica, T. E. of E. (2021g, May 16). *lanthanum*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/lanthanum>
- Britannica, T. E. of E. (2021h, May 16). *Neodymium*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/neodymium>
- Britannica, T. E. of E. (2021i, May 23). *gadolinium*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/gadolinium>
- Britannica, T. E. of E. (2021j, May 24). *Promethium*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/promethium>
- Chen, S., Ma, F., Xu, A., Wang, L., Chen, F., & Lu, W. (2014). Study on the structure, acidic properties of V-Zr nanocrystal catalysts in oxidative dehydrogenation of propane. *Appl Surf Sci*, 289, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.158>
- Coint, N., Dahlgren, S., & Norway, G. S. of. (2019). Rare earth elements (REE) in two long drill-cores from the Fen Carbonatite Complex, Telemark, Norway (preliminary version). In *NGU report: Vol. 2019.008*.
https://www.researchgate.net/publication/331438895_Rare_earth_elements_REE_in_two_long_drill-cores_from_the_Fen_Carbonatite_Complex_Telemark_Norway_Title_Rare_earth_elements_REE_in_two_long_drill-cores_from_the_Fen_Carbonatite_Complex_Telemark_Norway_
- Crundwell, F. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals - Frank Crundwell, Michael Moats, Venkoba Ramachandran, Timothy Robinson, W. G. Davenport*. Elsevier.
https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=yx5L85iuOicC&oi=fnd&pg=PP2&dq=F.K.+Crundwell,+M.+Michael,+and+V.+Ramachandran.+—Extractive+metallurgy+of+nickel,+cobalt+and+platinum+group+metals.&ots=4534QBNgpQ&sig=jgJZZPPF1rikR3CC-tgs26Xt0KA&redir_esc=y#v
- Damyanova, S., Pawelec, B., Arishtirova, K., Huerta, M. V. M., & Fierro, J. L. G. (2009). The

- effect of CeO₂ on the surface and catalytic properties of Pt/CeO₂-ZrO₂ catalysts for methane dry reforming. *Appl Catal B*, 89(1–2), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.11.035>
- Das, N., & Das, D. (2013). Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview. *Journal of Rare Earths*, 31(10), 933–943. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(13\)60009-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(13)60009-5)
- Dostal, J. (2017). Rare Earth Element Deposits of Alkaline Igneous Rocks. *Resources 2017*, Vol. 6, Page 34, 6(3), 34. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES6030034>
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeyasinghe, B., Ratnayake, N., & Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. In *Ore Geology Reviews* (Vol. 122, p. 103521). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- El Hachimi, A. G., Ould NE, M. L., El Yousfi, A., Benyoussef, A., & El Kenz, A. (2019). Enhancing optical absorption in visible light of ZnO co-doped with europium and promethium by first-principles study through modified Becke and Johnson potential scheme. *Journal of Rare Earths*, 37(4), 416–421. <https://doi.org/10.1016/J.JRE.2018.08.011>
- Eltejaei, H., Reza Bozorgzadeh, H., Towfighi, J., Reza Omidkhah, M., Rezaei, M., Zanganeh, R., Zamaniyan, A., & Zarrin Ghalam, A. (2012). Ghalam, Methane dry reforming on Ni/Ce_{0.75}Zr_{0.25}O₂-MgAl₂O₄ and Ni/Ce_{0.75}Zr_{0.25}O₂- γ -alumina: effects of support composition and water addition. *Int J Hydrog Energy*, 37(5), 4107–4118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.128>
- Erkey, C. (2000). Supercritical carbon dioxide extraction of metals from aqueous solutions: a review. *The Journal of Supercritical Fluids*, 17(3), 259–287. [https://doi.org/10.1016/S0896-8446\(99\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0896-8446(99)00047-9)
- Feng, X., Jiang, G., Zhao, Z., Wang, L., Li, X., Duan, A., Liu, J., Xu, C., & Gao, J. (2010). Highly effective F-modified HZSM-5 catalysts for the cracking of naphtha to produce light olefins. *Energy Fuels*, 24(8), 4111–4115. <https://doi.org/10.1021/ef100392d>
- Ferron, C. J., Bulatovic, S. M., & Salter, R. S. (1991). Beneficiation of Rare Earth Oxide Minerals. *Materials Science Forum*, 70–72, 251–270. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.70-72.251>

- Gambogi, J. (2015). Rare Earths Statistics and Information. *Mineral Commodity Summaries*, 703, 128–129. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>
- Gupta, G. K., & Krishnamurthy, N. (2016). Extractive Metallurgy of Rare Earths - Nagaiyar Krishnamurthy, Chiranjib Kumar Gupta. *International Materials Reviews*, 37(1), 197–248. <https://doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.197>
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., & Vernon, C. (2014). Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. In *Resources* (Vol. 3, Issue 4, pp. 614–635). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/resources3040614>
- Hassan, M. S., Kang, Y. S., Kim, B. S., Kim, I. S., Kim, H. Y., & Khil, M. S. (2011). Synthesis of praseodymium oxide nanofiber by electrospinning. *Superlattices Microstruct.*, 50(2), 139. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.05.010>
- Hatch, & Saskatchewan Ministry of the Economy. (2012). *Potash Mining Supply Chain Requirement Guide - Greenfield Mine Lifecycle Costs*.
- Hedges, M. P., Longdell, J. J., Li, Y., & Sellars, M. J. (2010). Efficient quantum memory for light. *Nature*, 465(7301), 1052–1056. <https://doi.org/10.1038/nature09081>
- Hedrick, J. L., Labadie, J. W., Volksen, W., & Hilborn, J. G. (1999). Nanoscopically Engineered Polyimides. *Advances in Polymer Science*, 147, 61–112. https://doi.org/10.1007/3-540-49196-1_2
- Hoel, M., & Kverndokk, S. (1996). Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming. *Resource and Energy Economics*, 18(2), 115–136. [https://doi.org/10.1016/0928-7655\(96\)00005-X](https://doi.org/10.1016/0928-7655(96)00005-X)
- Ignacio, J., Cortés, M., Viridiana, A., & Giles, D. V. (2014). *Las tierras raras: un sector estratégico para el desarrollo tecnológico de China*. <http://www.economia.unam.mx/cechimex/cuadernostrabajo.html>
- Images of Elements. (2016a, March 5). *Chemical Elements - Cerium*. <https://images-of-elements.com/cerium.php>
- Images of Elements. (2016b, March 5). *Chemical Elements - Dysprosium*. <https://images-of-elements.com/dysprosium.php>
- Images of Elements. (2016c, March 5). *Chemical Elements - Erbium*. <https://images-of-elements.com/erbium.php>
- Images of Elements. (2016d, March 5). *Chemical Elements - Europium*. <https://images-of-elements.com/europium.php>

- elements.com/europium.php
- Images of Elements. (2016e, March 5). *Chemical Elements - Gadolinium*. <https://images-of-elements.com/gadolinium.php>
- Images of Elements. (2016f, March 5). *Chemical Elements - Lanthanum*. <https://images-of-elements.com/lanthanum.php>
- Images of Elements. (2016g, March 5). *Chemical Elements - Lutetium*. <https://images-of-elements.com/lutetium.php>
- Images of Elements. (2016h, March 5). *Chemical Elements - Praseodymium*. <https://images-of-elements.com/praseodymium.php>
- Images of Elements. (2016i, March 5). *Chemical Elements - Samarium*. <https://images-of-elements.com/samarium.php>
- Images of Elements. (2016j, March 5). *Chemical Elements - Scandium*. <https://images-of-elements.com/scandium.php>
- Images of Elements. (2016k, March 5). *Chemical Elements - Terbium*. <https://images-of-elements.com/terbium.php>
- Images of Elements. (2016l, March 5). *Chemical Elements - Yttrium*. <https://images-of-elements.com/yttrium.php>
- Images of Elements. (2017a, March 5). *Chemical Elements - Thulium*. <https://images-of-elements.com/thulium.php>
- Images of Elements. (2017b, March 5). *Chemical Elements - Ytterbium*. <https://images-of-elements.com/ytterbium.php>
- Indiamart. (2021). *Promethium Metal at Rs 250000/kilogram | Rare Earth Metals | ID: 8707697148*. <https://www.indiamart.com/proddetail/promethium-metal-8707697148.html>
- IUPAC. (2007). Nomenclature of inorganic chemistry - IUPAC recommendations 2005. *Chemistry*, 16(6), 561–568. <https://doi.org/10.1515/ci.2005.27.6.25>
- J. Lucas, P. Lucas, T. Le Mercier, A. R., & Davenport, W. G. (2015). Rare Earths: Science, Technology, Production and Use Jacques Lucas, Pierre Lucas, Thierry Le Mercier, Alain Rollat, and William Davenport. *MRS Bulletin*, 40(5), 452–453. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.109>
- Jentoft, F. C., & Gates, B. C. (1997). Solid acid catalyzed alkane cracking mechanisms: evidence from reactions of small probe molecules. *Top Catal*, 4(1–2), 1–13.

<https://doi.org/10.1023/a:1019184004885>

- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, 408–412, 1339–1343. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.033>
- Kawabe, M., Ono, H., Sano, T., Tsuji, M., & Tamaura, Y. (1997). Thermochemical oxygen pump with praseodymium oxides using a temperature-swing at 403–873 K. *Energy*, 22(11), 1041. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(97\)00044-3](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(97)00044-3)
- King, H. (2020). REE - Rare Earth Elements - Metals, Minerals, Mining, Uses. *Geology.Com*. <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/>
- Kotrel, S., Knözinger, H., & Gates, B. C. (2000). The Haag–Dessau mechanism of protolytic cracking of alkanes. *Microporous Mesoporous Mater*, 35–36, 11–20. [https://doi.org/10.1016/s1387-1811\(99\)00204-8](https://doi.org/10.1016/s1387-1811(99)00204-8)
- Kumar, D. R., Ranjith, K. S., Nivedita, L. R., & Kumar, R. T. R. (2017). Effect of samarium doping on structural, optical and magnetic properties of vertically aligned ZnO nanorod arrays. *Journal of Rare Earths*, 35(10), 1002–1007. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)61005-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)61005-6)
- Kumari, A., Panda, R., Kumar Jha, M., Rajesh Kumar, J., & Lee, J. Y. (2015). *Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.05.003>
- Kurucz, Z., Wesenberg, J. H., & Mølmer, K. (2011). Spectroscopic properties of inhomogeneously broadened spin ensembles in a cavity. *Phys. Rev. A*, 83(5), 053852. <https://doi.org/10.1103/physreva.83.053852>
- L. L. Rokhlin, T. V. D. V. N. T. I. E. T. (2004). Decomposition of the supersaturated solid solution in a Mg–Nd–Y ternary alloy. *Phys. Met. Metallogr.*, 97, 68–74.
- Lal, R. (2019). Rare Earth Elements. In *Encyclopedia of Soil Science, Third Edition* (pp. 1891–1895). <https://doi.org/10.1081/e-ess3-120015983>
- Li, L. Z. H. I., & Yang, X. (2014). China's Rare Earth Ore Deposits and Beneficiation Techniques. *1st European Rare Earth Resources Conference*, 26–36.
- Mine Planning and Equipment Selection Supply Chain of Rare Earth Elements (REEs), Mine Planning and Equipment Selection 1419 (2014). https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_136
- Long, K. R., Gosen, B. S. Van, Foley, N. K., & Cordier, D. (2012). The Principal Rare Earth

- Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*, 131–155. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8679-2_7
- Luk'Yanova, E. A., Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V., & Tabachkova, N. Y. (2013). Study of the decomposition of the magnesium-based solid solutions in Mg–Sm–Tb alloys. *Phys. Met. Metallogr.*, *114*(7), 604–615. <https://doi.org/10.1134/s0031918x13050049>
- Mahamiya, V., Shukla, A., & Chakraborty, B. (2022). Scandium decorated C₂₄ fullerene as high capacity reversible hydrogen storage material: Insights from density functional theory simulations. *Applied Surface Science*, *573*, 151389. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2021.151389>
- Mangla, O., & Roy, S. (2021). Bilayer of zirconium oxide/lanthanum oxide high- κ dielectric fabricated for metal-oxide-semiconductor nano-electronic device applications. *Materials Letters*, *301*, 130242. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130242>
- McLellan, B. C., Corder, G. D., & Ali, S. H. (2013). Sustainability of Rare Earths—An Overview of the State of Knowledge. *Minerals 2013, Vol. 3, Pages 304-317*, *3*(3), 304–317. <https://doi.org/10.3390/MIN3030304>
- Metalpedia. (2021). *Rare earths: uses, applications-Metalpedia*. Web Page. http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/application.shtml
- Motahari, F., Mozdianfard, M. R., Soofivand, F., & Salavati-Niasari, M. (2014). NiO nanostructures: Synthesis, characterization and photocatalyst application in dye wastewater treatment. *RSC Adv.*, *4*(53), 27654. <https://doi.org/10.1039/c4ra02697g>
- Navarro, J., & Zhao, F. (2014). Life-cycle assessment of the production of rare-earth elements for energy applications: A review. *Frontiers in Energy Research*, *2*(NOV), 45. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2014.00045/BIBTEX>
- Nawaz, Z., Baksh, F., Zhu, J., & Wei, F. (2013). Dehydrogenation of C₃–C₄ paraffin's to corresponding olefins over slit-SAPO-34 supported Pt-Sn-based novel catalyst. *J Ind Eng Chem*, *19*(2), 540–546. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.024>
- Northup, T. E., & Blatt, R. (2014). Quantum information transfer using photons. *Nat. Photon.*, *8*(5), 356–363. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.53>
- O'Brien, C., Lauk, N., Blum, S., Morigi, G., & Fleischhauer, M. (2014). Interfacing superconducting qubits and telecom photons via a rare-earth-doped crystal. *Phys. Rev. Lett.*, *113*(6), 063603. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.063603>

- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S. J., & Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- Pandey, B. D. (2011). *Rare Metals Extraction from Non-ferrous Resources in India: Present Status and Prospects of R&D*. <http://eprints.nmlindia.org/4266>
- Pradip, P., & Fuerstenau, D. W. (2013). Design and development of novel flotation reagents for the beneficiation of Mountain Pass rare-earth ore. *Minerals and Metallurgical Processing*, 30(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/bf03402335>
- Probst, S., Rotzinger, H., Wunsch, S., Jung, P., Jerger, M., Siegel, M., Ustinov, A. V., & Bushev, P. A. (2013). Anisotropic rare-earth spin ensemble strongly coupled to a superconducting resonator. *Phys. Rev. Lett.*, 110(15), 157001. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.157001>
- Putz, S., Krimer, D. O., Amsüss, R., Valookaran, A., Nöbauer, T., Schmiedmayer, J., Rotter, S., & Majer, J. (2014). Protecting a spin ensemble against decoherence in the strong-coupling regime of cavity QED. *Nat. Phys.*, 10(10), 720–724. <https://doi.org/10.1038/nphys3050>
- Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V., Tabachkova, N. Y., Tarytina, I. E., & Lukyanova, E. A. (2021). Phenomenon of reversion after aging in magnesium alloys with gadolinium and samarium. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 12(2), 320–327. <https://doi.org/10.1134/s207511332102043x>
- Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V., Tarytina, I. E., Luk'yanova, E. A., & Temralieva, D. R. (2021). Effect of Samarium on the Recovery in Gadolinium-Containing Magnesium Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021(7), 816–820. <https://doi.org/10.1134/S0036029521070107/FIGURES/6>
- Samsonov, M. D., Shadrin, A. Y., Shafikov, D. N., Kulyako, Y. M., & Myasoedov, B. F. (2011). Supercritical fluid extraction in modern radiochemistry. *Radiochemistry 2011* 53:2, 53(2), 111–122. <https://doi.org/10.1134/S1066362211020019>
- Sinigaglia, T., Lewiski, F., Santos Martins, M. E., & Mairesse Siluk, J. C. (2017). Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(39), 24597–24611. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.063>
- Suli, L. M., Ibrahim, W. H. W., Aziz, B. A., Deraman, M. R., & Ismail, N. A. (2017). A Review

- of Rare Earth Mineral Processing Technology. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19, 20. <https://doi.org/10.3329/ceerb.v19i0.33773>
- Sun, X., Zhai, T., Lu, X., Xie, S., Zhang, P., Wang, C., Zhao, W., Liu, P., & Tong, Y. (2012). Facile synthesis of Pr(OH)₃ nanostructures and their application in water treatment. *Mater. Res. Bull.*, 47(7), 1783. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.03.024>
- Thiel, C. W., Bttger, T., & Cone, R. L. (2011). Rare-earth-doped materials for applications in quantum information storage and signal processing. *J. Lumin.*, 131(3), 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.12.015>
- Thompson, W., Lombard, A., Santiago, E., & Singh, A. (2012). Mineralogical Studies in Assisting Beneficiation of Rare Earth Element Minerals from Carbonatite Deposits. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*, 665–672. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27682-8_80
- TSMC. (2021). *5nm Technology - Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited*. 2021. https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_5nm
- U.S. Department of Energy. (2011). *Critical Materials Strategy*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOECMS2011FINALFull.pdf>
- USGS. (2013). *Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology | USGS Fact Sheet 087-02*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>
- Varzaneh, A. Z., Towfighi, J., Kootenaeei, A. H. S., & Mohamadizadeh, A. (2015). Effect of cerium and zirconium nanoparticles on the structure and catalytic performance of SAPO-34 in steam cracking of naphtha to light olefins. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 115(2), 719–740. <https://doi.org/10.1007/S11144-015-0862-Z/FIGURES/8>
- Verplanck, P. L., Van Gosen, B. S., Seal, R. R., & McCafferty, A. E. (2014). A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion-Related Rare Earth Element Deposits. *Mineral Deposit Models for Resource Assessment*, 58 p. <https://doi.org/10.3133/SIR20105070J>
- Voncken, J. H. L. (2016). *The Rare Earth Elements*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5>
- Wall, F. (2013). Rare earth elements. In *Critical Metals Handbook* (pp. 312–339). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch13>
- Wang, J., Meng, J., Zhang, D., & Tang, D. (2007). Effect of Y for enhanced age hardening response and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zr alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 456(1–2), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.096>

- Wang, L., Huang, X., Yu, Y., & Long, Z. (2014). Kinetics of rare earth pre-loading with 2-ethylhexyl phosphoric acid mono 2-ethylhexyl ester [HEH(EHP)] using rare earth carbonates. *Separation and Purification Technology*, *122*, 490–494. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.12.007>
- Wang, X., Zhuang, J., & Li, Y. (2004). Pr₆O₁₁ Single-Crystal Nanotubes from a Molten-Salt Synthetic Method. *European Journal of Inorganic Chemistry*, *2004*(5), 946–948. <https://doi.org/10.1002/EJIC.200300652>
- Williamson, L. A., Chen, Y. H., & Longdell, J. J. (2014). Magneto-optic modulator with unit quantum efficiency. *Phys. Rev. Lett.*, *113*(20), 203601. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.203601>
- Wolfowicz, G., Maier-Flaig, H., Marino, R., Ferrier, A., Vezin, H., Morton, J. J. L., & Goldner, P. (2015). Coherent storage of microwave excitations in rare earth nuclear spins. *Phys. Rev. Lett.*, *114*(17), 170503. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.170503>
- Xaba, S. M., Nete, M., & Purcell, W. (2018). Concentration of rare earth elements from monazite by selective precipitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *430*(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/430/1/012006>
- xataka. (2021, June 6). *Qué son los nanómetros y por qué son tan importantes para los procesadores*. <https://www.xatakamovil.com/procesadores/que-nanometros-que-importantes-para-procesadores>
- Xie, F., Zhang, T. A., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2014). A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, *56*, 10–28. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2013.10.021>
- Xiong, C., Jia, Q., Chen, X., Wang, G., & Yao, C. (2013). Optimization of polyacrylonitrile-2-aminothiazole resin synthesis, characterization, and its adsorption performance and mechanism for removal of Hg(II) from aqueous solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(14), 4978–4986. https://doi.org/10.1021/IE3033312/SUPPL_FILE/IE3033312_SI_001.PDF
- Yang, J., Sudik, A., Wolverton, C., & Siegel, D. J. (2010). High capacity hydrogen storage materials: Attributes for automotive applications and techniques for materials discovery. *Chemical Society Reviews*, *39*(2), 656–675. <https://doi.org/10.1039/B802882F>
- Zhang, J., Zhao, B., & Schreiner, B. (2016). Separation hydrometallurgy of rare earth elements. *Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements*, 1–259. <https://doi.org/10.1007/978->

- Zhang, X. J., Mi, W. B., Wang, X. C., & Bai, H. L. (2014). First-principles prediction of electronic structure and magnetic ordering of rare-earth metals doped ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*, *617*, 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.218>
- Zhang, Y., Han, K., Yin, X., Fang, Z., Xu, Z., & Zhu, W. (2009). Synthesis and characterization of single-crystalline PrCO₃OH dodecahedral microrods and its thermal conversion to Pr₆O₁₁. *J. Cryst. Growth*, *311*(15), 3883. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.06.024>
- ZHANG, Y., LI, J., HUANG, X., WANG, C., ZHU, Z., & ZHANG, G. (2008). Synergistic extraction of rare earths by mixture of HDEHP and HEH/EHP in sulfuric acid medium. *Journal of Rare Earths*, *26*(5), 688–692. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(08\)60164-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60164-7)
- Zheng, Z., & Xiong, C. (2011). Adsorption behavior of ytterbium (III) on gel-type weak acid resin. *Journal of Rare Earths*, *29*(5), 407–412. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60469-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60469-3)
- Zhong, M., Hedges, M. P., Ahlefeldt, R. L., Bartholomew, J. G., Beavan, S. E., Wittig, S. M., Longdell, J. J., & Sellars, M. J. (2015). Optically addressable nuclear spins in a solid with a six-hour coherence time. *Nature*, *517*(7533), 177–180. <https://doi.org/10.1038/nature14025>
- Zhong, T., Kindem, J. M., Rochman, J., & Faraon, A. (2017). Interfacing broadband photonic qubits to on-chip cavity-protected rare-earth ensembles. *Nature Communications* *2017* *8:1*, 8(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/NCOMMS14107>
- Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals* *2017*, Vol. 7, Page 203, 7(11), 203. <https://doi.org/10.3390/MIN7110203>
- Zhu, H., Qin, Z., Shan, W., Shen, W., & Wang, J. (2004). Pd/CeO₂–TiO₂ catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H₂ and CO as reducing agents. *J Catal*, *225*(2), 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2004.04.006>
- Zinatloo-Ajabshir, S., & Salavati-Niasari, M. (2014). Synthesis of pure nanocrystalline ZrO₂ via a simple sonochemical-assisted route. *J. Ind. Eng. Chem.*, *20*(5), 3313. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.013>
- Zinatloo-Ajabshir, S., & Salavati-Niasari, M. (2015). Preparation and characterization of nanocrystalline praseodymium oxide via a simple precipitation approach. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *26*(8), 5812–5821.

<https://doi.org/10.1007/S10854-015-3141-X/TABLES/2>