



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y

MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

TESIS

Evaluación geoquimiométrica mundial de la composición de Tierras Raras (REE) en rocas de sistemas geotérmicos e identificación de patrones asociados a su evolución geológica

Para obtener el grado de

Licenciada en Ingeniería en Geología Ambiental

PRESENTA

Lilibeth Doñu Hormiga

Director Externo (IER, UNAM):

Dr. Gustavo Santos Raga

Director Interno:

Dr. Enrique Cruz Chávez

Comité tutorial:

Dr. Marius Ramírez Cardona

Dr. David Yáñez Dávila



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 2 de julio de 2026

Número de control: ICBI-D/1203/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Lilibeth Doñu Hormiga**, quien presenta el trabajo de titulación **"Evaluación geoquimiométrica mundial de la composición de Tierras Raras (REE) en rocas de sistemas geotérmicos e identificación de patrones asociados a su evolución geológica"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Màrius Ramírez Cardona

Secretario: Dr. Gustavo Santos Raga

Vocal: Dr. Enrique Cruz Chávez

Suplente: Dr. David Yáñez Dávila

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184

Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

A mis padres,
María Hormiga Tzongua y
Pedro Doñu Ángeles

Agradecimientos

A mis padres María Hormiga Tzongua y Pedro Doñu Ángeles, gracias por todo, pues a pesar de todas las dificultades siempre han estado para mí y mis hermanos, Pedrito y Oswaldo. A ustedes debo este logro.

A mis tíos Teresa, Salomón y Antonia, gracias por recibirme siempre en su casa, alimentarme y apoyarme.

A mis abuelos Clara Hipólita Zongua Demha y Ricardo Apolonio Hormiga Huizache, que son el corazón de mi familia.

A mis compañeros y amigos Emma, Yetla, Dulce, Elian y Azul, gracias por cada canción cantada, cada aventura en campo, cada noche de desvelo, cada comida y por ser mi compañía en este viaje que fue la carrera.

A Dr. Enrique Cruz Chávez, por presentarme la oportunidad de realizar esta tesis, en conjunto con Dr. Gustavo Santos Raga, a quien agradezco su dedicación, y disposición, además de su calidad humana.

Agradezco al proyecto de Ciencia de Frontera SECIHTI (CF-2023-G-490) por el financiamiento para el desarrollo del presente proyecto de tesis.

Índice general

Resumen	1
Capítulo 1: Generalidades	3
1.1 Introducción	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
Capítulo 2: Marco teórico	10
2.1 Energía geotérmica.....	11
2.1.1 Usos directos de la energía geotérmica	12
2.1.2 Generación de energía eléctrica	14
2.2 Clasificación de sistemas geotérmicos.....	15
2.2.1 Clasificación por temperatura.....	15
2.2.2 Clasificación por naturaleza geológica	17
a) Sistemas de agua caliente asociados a yacimientos de gas y petróleo.	17
b) Magmáticos	18
c) Sistemas conductivos sedimentarios	18
d) Sistemas convectivos hidrotermales.....	19
e) Sistemas geotérmicos geopresurizados	19
f) Sistemas geotérmicos radiogénicos	19
g) Sistemas geotérmicos mejorados	20
2.2.3 Catálogo de “plays” geotérmicos.....	20
2.3 Panorama actual de la energía geotérmica en el mundo	25
2.3.1 Energía geotérmica en México.....	30
2.4 Elementos de Tierras Raras	33

2.4.1 Propiedades fisicoquímicas	33
2.5 Estándares de normalización de patrones de Tierras Raras	34
2.5.1 Normalización a condrita.....	35
2.5.2 Otros estándares de normalización	36
2.6 Geoquimiometría	37
Capítulo 3: Metodología de trabajo	39
3.1 Descripción general de la metodología de trabajo.....	40
3.2 Análisis bibliométrico	42
3.3 Revisión sistemática de la literatura, compilación y descripción de BDG_REE y BDG-NORM	43
3.4 Normalización y análisis geoquimiométrico de la BDG_REE	44
Capítulo 4: Resultados y Discusión.....	47
4.1 Resultados del análisis bibliométrico.....	48
4.1.1 Análisis de desempeño	50
4.1.2 Análisis intelectual de la estructura	52
4.2 Resultados del análisis sistemático y compilación de la BDG_REE	52
4.2.1 Representación gráfica de las muestras compiladas en la BDG_REE	60
4.2.2 Distribución por tipo de roca	60
4.2.3 Distribución por sistema geotérmico y ambiente geológico	61
4.3 Resultados de la normalización y análisis geoquimiométrico	62
4.3.1 Normalización y análisis geoquimiométrico.....	63
4.3.2 Diagramas de normalización REE respecto a condritas.....	66
4.4.1 Diagramas de normalización con base en el tipo de roca	67
Capítulo 5: Conclusiones	74
5.1 Conclusiones	75
Referencias	77

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama descriptivo de los principales usos directos y diversos de la energía geotérmica. Tomado de (Dincer & Ezzat, 2018).....	12
Figura 2. Diagrama de uso en cascada de Lindal, representativo de los posibles usos directos de la energía geotérmica con base en la temperatura del fluido. Modificado de (Dincer & Ezzat, 2018).....	13
Figura 3. Plays de sistemas geotérmicos convectivos basado en los controles geológicos de actividad ígnea y ausencia de actividad ígnea, pero con actividad de extensión significativa. (1- Play tipo, 2-Localidad tipo, 3- Configuración tectónica, 4- Hábitat geológico de los reservorios geotérmicos potenciales, 5 – Tipo de transferencia de calor, 6- controles geológicos. Tomado de (Moeck, 2014)	22
Figura 4. Plays de sistemas geotérmicos dominados por conducción, que van desde cuencas intracratónicas a cuencas de antepaís de cinturones orogénicos con sus características zonas de antifosa fondo hasta provincias de basamento (metamórfico o ígneo). Los controles geológicos en plays dominados por conducción son litofacies o biofacies de rocas sedimentarias, así como fallas y fracturas. Típicamente estos tipos de play carecen de fallamiento activo y sismicidad. Tomado de Moeck (2014).....	22
Figura 5. Gráfica de la capacidad global instalada por un grupo de fuente de energías desde el año 2000 hasta el año 2024. Tomada de IRENA Stats Tools (2025).	25
Figura 6. Capacidad instalada de fuentes de energía renovable por tecnología, en el periodo del año 2000 al 2024. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).	26
Figura 7. Factor de capacidad de utilización promedio (CUF) para cada tecnología del año 2000 a 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).	27
Figura 8. Gráfica de la generación de electricidad global por grupo de fuentes de energía del año 2000 al 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).	28
Figura 9. Gráfica de la generación de electricidad de fuentes de energía renovable por tecnología del año 2000 al 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).	28

Figura 10. Gráfica de los 10 países líderes en energía geotérmica por capacidad instalada (MWe). Tomado de Think GeoEnergy, (2025).	30
Figura 11. Gráfica nacional de la capacidad instalada por tecnología (MW) reportada hasta el 31 de diciembre de 2021. Datos tomados de Sener (2022).....	31
Figura 12. Gráfica de la capacidad instalada del total de fuentes de energía renovable en México reportada hasta el 31 de diciembre de 2021. Datos tomados de Sener (2022)....	31
Figura 13. Diagrama de flujo de la metodología general implementada en el presente trabajo de tesis. El flujo de trabajo se subdivide en tres etapas principales: (i) análisis bibliométrico de la literatura; (ii) revisión sistemática, compilación y homogenización de bases de datos bibliográficas y geoquímicas; y (iii) normalización y análisis geoquimiométrico de la BDG_REE.	41
Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología bibliométrica implementada para el análisis de la literatura científica y creación de la base de datos bibliográfica. Tomado de Yáñez-Dávila et al., (2023).....	43
Figura 15. Gráfica de la producción científica anual y suma acumulativa sobre estudios de REE en sistemas geotérmicos en el periodo de 1974 a 2025.	50
Figura 16. Mapa de producción científica por país, las tonalidades más oscuras se relacionan con un mayor número de publicaciones científicas. Las redes de colaboración entre países están representadas por líneas rojas, el grosor de la línea representa los países con mayor número de colaboraciones identificadas.	51
Figura 17. Mapa temático de temas emergentes de investigación. Los cuadrantes cartesianos III y IV, representan a las investigaciones con mayor grado de relevancia expresada en el eje de las abscisas, mientras que el eje de las ordenas representa el grado de desarrollo.	52
Figura 18. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración normalizada respecto a condrita (McDonough & Sun, 1995) de REE de las muestras de roca de la BDG_REE.	59
Figura 19. Representación geográfica de las muestras de roca compiladas con base en el análisis bibliométrico mundial. Todas las muestras forman parte de sistemas geotérmicos	

alrededor del mundo. Los colores representan la clasificación de las muestras, mientras que la densidad numérica de muestras es proporcional al tamaño de la circunferencia del símbolo..... 60

Figura 20. Gráfica circular de la distribución porcentual de las muestras de la BDG_REE 61

Figura 21. Diagrama de barras de los diversos estándares de normalización compilados en la BDG_REE. El eje de las ordenadas representa el número de artículos científicos que los reportaron. 62

Figura 22. Distribución de estándares geoquímicos de normalización referentes a concentraciones de lutitas registrados en la BDG_REE..... 62

Figura 23. Distribución de estándares de normalización referentes a concentraciones en condritas registrados en la BDG_REE 63

Figura 24. Matrices de correlación calculadas con los valores de la BDG_REE: a) matriz de correlación de Pearson; b) matriz de correlación de Spearman. 64

Figura 25. Diagramas de Boxplots para la visualización de valores considerados discordantes dentro de la BDG_REE..... 66

Figura 26. Diagrama spider de las concentraciones de REE normalizadas de todas las muestras en la BDG_REE. 67

Figura 27. Diagramas de normalización de REE en riolitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul). 68

Figura 28. Diagramas de normalización de REE en granitos respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul). 69

Figura 29. Diagramas de normalización de REE en andesitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul). 71

Figura 30. Diagramas de normalización de REE en dacitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul). 72

Figura 32. Patrones de normalización de REE de los outliers (muestras con concentraciones atípicas. La línea negra punteada representa la mediana del grupo..... 73

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos en función del rango de temperatura de los fluidos. Modificado de (Dincer & Ozturk, 2021).	17
Tabla 2. Catálogo de plays geotérmicos. Las características de la roca reservorio, tipo de fluido y rango de temperatura se refieren a los ejemplos y no reflejan necesariamente características generales restringidas. Tomado de Moeck (2014).	24
Tabla 3. Resumen de proyectos de usos directos en México. Tomado de (Gutiérrez-Negrin et al., 2023).....	32
Tabla 4. Cadena de palabras claves y booleanos implementados en el proceso de búsquedas avanzadas en los repositorios bibliográficos internacionales de WoS y Scopus.	48
Tabla 5. Integración de palabras claves para la determinación de las búsquedas avanzadas finales en los repositorios bibliográficos de WoS y Scopus.	49
Tabla 6. Top ten de países con mayor número de artículos científicos publicados con respecto a la nacionalidad de la lista de personas coautoras.....	51
Tabla 7. Tabla esquemática general de la Base de Datos Geoquímica de Tierras Raras (BDG-REE); compilada con base en un análisis bibliométrico y sistemático de la literatura mundial sobre estudios teóricos y experimentales de REE en sistemas geotérmicos. La tabla contiene muestras geológicas de distinta naturaleza, como rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas, suelos y minerales.	53
Tabla 8. Ambientes geológicos reportados desde las fuentes bibliográficas originales para los Sistemas geotérmicos compilados en la BDG-REE.....	61

Resumen

Los elementos de Tierras Raras se caracterizan por constituir un grupo geoquímicamente coherente, presente en concentraciones de trazas (de ppb a ppm) en diversas matrices geológicas. Propiedades como su estado de oxidación relativamente estable (3+) pero sensible a altas temperaturas y a cambios en las condiciones redox del ambiente (en el caso del Ce^{4+} y del Eu^{2+}) los convierten en excelentes trazadores de procesos petrogenéticos e hidrotermales presentes en los sistemas geotérmicos. Con base en estas relevantes propiedades, el presente trabajo de tesis desarrolló un análisis bibliométrico, una evaluación sistemática de la literatura y un análisis geoquimiométrico de las concentraciones de REE en rocas asociadas a sistemas geotérmicos. Este robusto planteamiento metodológico se desarrolló con el objetivo de relacionar los patrones de normalización de REE con procesos petrogenéticos en sistemas geotérmicos y de contribuir al entendimiento de su evolución geológica. Mediante la consulta avanzada de repositorios científicos se obtuvo una base de datos bibliográfica (BDB_REE) de trabajos indexados sobre este tema, a la que se le aplicó un análisis bibliométrico con ayuda de software especializado (Bibliometrix). Posteriormente, se procedió a la revisión exhaustiva y a la captura de datos de concentraciones de REE y elementos mayores para la conformación de una base de datos geoquímica (BDG_REE). Finalmente, se realizó el análisis geoquimiométrico de la base geoquímica para el cálculo de los patrones de normalización de REE respecto a condrita (condrita reportada por McDonough & Sun, 1995). Logrando una mejor visualización de los procesos de fraccionamiento y su comparación entre muestras de diferentes orígenes geológicos. Como resultado, el análisis bibliométrico evidenció la relevancia del tema de estudio, a partir del crecimiento exponencial del número de trabajos publicados en los últimos años. Los patrones normalizados obtenidos a partir de los datos de la BDG_REE mostraron una estrecha correlación entre la litología y las firmas geoquímicas observadas, pero también evidenciaron que el fraccionamiento selectivo de los REE permite visualizar cambios en las concentraciones de REE relacionados con procesos geológicos específicos de cada sistema geotérmico. Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación contribuyen al entendimiento de los complejos procesos geológicos y de interacción agua-roca asociados a sistemas geotérmicos y, además, fortalecen el uso de la geoquímica de REE como herramienta de exploración geotérmica.

Palabras clave: Elementos de Tierras Raras, Lantánidos, Patrones de normalización, Geoquimiometría.

Abstract

Rare Earth elements are characterised as a geochemically coherent group present in trace concentrations (ppb to ppm) in various geological matrices. Their relatively stable oxidation state (3+), which is sensitive to high temperatures and changes in ambient redox conditions (in the case of Ce⁴⁺ and Eu²⁺), makes them excellent tracers of petrogenetic and hydrothermal processes in geothermal systems. Based on these relevant properties, this thesis developed a bibliometric analysis, a systematic literature review, and a geochemometric analysis of REE concentrations in rocks associated with geothermal systems. This robust methodological approach was developed with the scope of relating REE normalisation patterns to petrogenetic processes in geothermal systems and contributing to the understanding of their geological evolution. Through advanced research in scientific repositories, a bibliographic database (BDB_REE) of indexed research works on this topic was compiled and subjected to bibliometric analysis using specialised software, such as the Bibliometrix package in R. Subsequently, a thorough review and data collection of REE and major element concentrations were carried out to create a geochemical database (BDG_REE). Finally, a geochemical analysis of the database was performed to calculate normalisation patterns of REE relative to chondrite (as reported by McDonough & Sun, 1995). This enabled better visualisation of fractionation processes and their comparison across samples of different geological origins. As a result, the bibliometric analysis demonstrated the research topic's relevance, based on the exponential growth in published works over recent years. The normalised patterns obtained from the BDG-REE data showed a close correlation between lithology and the observed geochemical signatures. They also demonstrated that selective fractionation of Rare Earth Elements enables visualisation of changes in REE concentrations associated with specific geological processes within each geothermal system. The results of this research contribute to understanding the complex geological and water-rock interaction processes associated with geothermal systems and further strengthen the use of REE geochemistry as a geothermal exploration tool.

Keywords: Rare Earth Elements, Lanthanides, Normalization patterns, Geochemometrics.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Elementos de Tierras Raras (REE, por su acrónimo en inglés) es el nombre comúnmente utilizado en las geociencias para el conjunto de elementos químicos que comprende al Itrio (^{39}Y), el primer elemento de REE en ser descubierto, al Escandio (^{21}Sc) y a la serie de los Lantánidos: Lantano (^{57}La), Cerio (^{58}Ce), Praseodimio (^{59}Pr), Neodimio (^{60}Nd), Prometio (^{61}Pm), Samario (^{62}Sm), Europio (^{63}Eu), Gadolinio (^{64}Gd), Terbio (^{65}Tb), Disproso (^{66}Dy), Holmio (^{67}Ho), Erblio (^{68}Er), Tulio (^{69}Tm), Iterbio (^{70}Yb) y Lutecio (^{71}Lu). La IUPAC (2005) en cambio, les asigna el nombre colectivo de “metales de tierras raras”, diferente al grupo de metales alcalinotérreos, aunque ambos grupos son metales de transición. Derivado de sus propiedades ópticas, magnéticas y electrónicas únicas, este grupo de elementos se ha vuelto indispensable en el desarrollo de avances tecnológicos (Henderson, 1984). Ejemplos de artefactos tecnológicos que requieren de REE para su manufactura, son los teléfonos celulares, computadoras, pantallas, audífonos, bocinas, luces LED y baterías, además de otras aplicaciones menos conocidas en la temática de manufactura, ingeniería y medicina (Balaram, 2019). En este sentido, los metales de REE se han convertido en un recurso crítico en el mundo para mantener el estilo de vida actual, estrechamente ligado al desarrollo tecnológico de diversas disciplinas, entre las que destaca la industria eléctrica global. Por tal motivo, la búsqueda de la transición energética hacia fuentes renovables impone una mayor demanda global de REE, principalmente de elementos como el Neodimio (Nd) y Disproso (Dy); utilizados en la fabricación de imanes permanentes, requerimiento esencial para la construcción de las grandes turbinas eólicas y motores de automóviles eléctricos (Kamran et al., 2023).

Estudios previos como Henderson (1984) mencionan que la diversidad de aplicaciones de las REE se debe principalmente a su singular configuración electrónica, que propicia la coherencia de sus propiedades fisicoquímicas y de su comportamiento geoquímico. Derivado de esta distribución electrónica es que los lantánidos poseen propiedades químicas y físicas muy similares que los distinguen de otros elementos (Wang, 2023). En cuanto al Y, su afinidad es propiciada por su radio iónico trivalente (90 Å) parecido al del Holmio (Ho) y Erblio (Er) cuando su número de coordinación es seis (McLennan, 1989) En contraste, Noriun et al. (1968) mencionan que el Sc a pesar de ocurrir geológicamente junto a las otras REE, tiene un radio iónico mucho menor (0.745 Å), asemejándose más a elementos de transición ferromagnesianos (Fe, V, Cr, Co y Ni). Cabe destacar que, para el presente trabajo de tesis se consideró solo a los elementos lantánidos, derivado de que la

información geoquímica disponible de estos elementos es más comúnmente reportada en la bibliografía científica.

Desde una perspectiva geoquímica, los REE tienen un estado de oxidación en la naturaleza generalmente estable (3^+) y un carácter insoluble que los hace resistentes a la movilidad en procesos geoquímicos como meteorización, diagénesis y metamorfismo (Taylor & McLennan, 1988). El comportamiento redox sensible del Eu (2^+) y del Ce (4^+) permite dilucidar procesos magmáticos y acuosos, lo que los convierte en excelentes trazadores geoquímicos (McLennan & Taylor, 2012). Estos procesos magmáticos e hidrotermales implícitos en los sistemas geotérmicos pueden ser estudiados mediante el análisis de patrones normalizados de REE en muestras de rocas y fluidos. Estas gráficas, mediante el uso de una referencia estándar, permiten comparar las concentraciones de REE en la muestra y detectar anomalías geoquímicas que indiquen procesos de interacción agua-roca, alteraciones hidrotermales, evolución y composición petrológica de las rocas del sistema geotérmico, origen y zonas de recarga de agua, así como las condiciones favorables para la precipitación de minerales secundarios que afectan tanto a la permeabilidad del sistema como a la infraestructura en campos geotérmicos (p. e. Fukuyama & Chen, 2021; Pandarinath et al., 2020; Santos-Raga et al., 2020; Shoedarto et al., 2022; Xiao et al., 2020).

Con base en todo lo anteriormente mencionado, el presente trabajo de tesis focaliza esfuerzos para la creación de una base de datos mundial de geoquímica de rocas de sistemas geotérmicos (BDG_REE) y un análisis estadístico-geoquímico (geoquimiométrico), que coadyuve al entendimiento de los patrones de normalización y principales firmas geoquímicas encontradas, así como su relación con los ambientes geológicos de formación. Detalles sobre los alcances de esta investigación se describen más adelante.

1.2 Antecedentes

Los REE son considerados elementos refractarios, clasificados como litófilos, incompatibles y generalmente inmóviles en la naturaleza (McLennan & Taylor, 2012). Esta serie de elementos, a pesar de lo que podría inferirse con base en su nombre coloquial “Tierras Raras”, son muy comúnmente encontrados en diversas matrices geológicas, aunque en muy bajas concentraciones (ppb a ppt: Haskin & Frey, 1966). Dado su comportamiento químico similar pero sistemático de La a Lu (Möller, 2000), son excelentes trazadores

naturales de procesos petrogenéticos, estudios de la estimación de la composición de la corteza terrestre y estudios de la evolución del sistema solar y el planeta Tierra (Henderson, 1984).

A pesar de las diversas aplicaciones de los estudios de REE en las temáticas anteriormente mencionadas, en lo que concierne a su implementación para el estudio de sistemas geoenergéticos, la movilidad o fraccionamiento de los REE se considera una herramienta relativamente nueva, utilizada para la resolución de problemas de exploración mineral y de recursos geotérmicos (Sturchio et al., 1986; Uysal et al., 2011; Yongliang & Yusheng, 1991).

El estudio de la concentración de REE en sistemas geotérmicos comenzó con los trabajos publicados por Ikeda et al. (1965) e Ikeda & Takahashi (1978) quienes determinaron por primera vez la concentración de algunas REE muestras de rocas de Japón. Sin embargo, en estos primeros esfuerzos, se hizo notoria la ausencia de técnicas analíticas de alta sensibilidad, necesarias para el estudio confiable de estos elementos, presentes en muy bajas concentraciones. A este respecto, trabajos como los publicados por Honda et al. (1988, 1989a, 1989b), se enfocaron en el mejoramiento de la metodología analítica de Análisis de Activación de Neutrones (NAA, por sus siglas en inglés) para la determinación simultánea de REE a muy bajas concentraciones, teniendo como muestras de interés las aguas de manantiales termales. El uso de aguas geotérmicas (preferentemente con pH ácido) como insumo para la calibración y el mejoramiento de la sensibilidad de esta técnica analítica, se debe a que tienden a tener mayores concentraciones de REE que aguas de manantiales con pH neutro o alcalino (Kikawada et al., 1993). En este sentido, Santos-Raga et al. (2021) resaltaron que el desarrollo tecnológico de nuevas técnicas analíticas como Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) o Espectroscopía de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES), así como el establecimiento de estándares de calibración para el análisis de REE en rocas, propició el incremento de estudios de concentraciones de REE como trazadores naturales de procesos de interacción agua-roca.

En lo que respecta a los patrones de normalización de REE, Shakeri et al. (2015) mencionan que estos permiten el entendimiento de procesos de fraccionamiento de REE que ocurren durante la interacción agua-roca (formación de complejos acuosos, transporte coloidal, intercambio de iones y adsorción) y que causan su fraccionamiento en rocas parentales. Este autor, además, señala con base en los patrones normalizados de REE de las rocas andesítica-dacíticas del sistema geotérmico de Taftán y otros sistemas alrededor del

mundo, que sistemas con similitud litológica presentan patrones de normalización muy similares. Así, describieron al patrón conocido como “ala de gaviota”, caracterizado por enriquecimiento de LREE, anomalía negativa de Eu y enriquecimiento de Gd, concluyendo que el tipo de roca huésped influye significativamente en la concentración de REE.

Por otro lado, Uysal et al. (2011) realizaron un estudio enfocado al desarrollo de una guía geoquímica para la exploración de depósitos minerales epitermales y de sistemas geotérmicos ocultos. Para ello, analizaron la composición de elementos traza (por ej. Rb, Cs, Li, Be, U, Th y REE) de depósitos de sínter silíceo, vetas de cuarzo, brechas mineralizadas silicificadas, rocas volcánicas, suelos y sedimentos en la cuenca Drummond, Australia. En este caso, los patrones normalizados de REE de las muestras de sínter y las muestras de roca mostraron anomalías de Ce complementarias, es decir, las muestras de roca se mostraron enriquecidas en Ce como resultado del contacto con fluidos oxidantes y las muestras de sínter, empobrecidas en Ce, lo que sugiere una estrecha relación genética entre las rocas huésped y los productos hidrotermales. De esta manera, la comparación mediante patrones normalizados de diferentes tipos de muestras en un sistema geotérmico permitiría deducir las condiciones fisicoquímicas de la deposición de minerales epitermales en sistemas geotérmicos.

La documentación científica en este interesante tema de investigación es amplia, pero aún muestra la necesidad de estudios actuales que involucren una perspectiva mundial de los patrones de normalización de REE en diferentes ambientes geotérmicos, en especial en muestras de roca, ya que el enfoque principal de la mayoría de los trabajos existentes se centra en los fluidos geotérmicos: tales como ventilas hidrotermales conocidas como black smokers: (James et al., 1995; Klinkhammer et al., 1994; Mills & Elderfield, 1995); flujos dispersos en el fondo oceánico (Bau & Dulski, 1999; Michard et al., 1993; Schmidt et al., 2007), fumarolas (Aggarwal, 1994; Lewis et al., 1998; Möller et al., 2003) y aguas termales (Göb et al., 2013; Möller, 2000; Möller et al., 1998; Sanada et al., 2006; Wood, 2006; Wood & Shannon, 2003). De esta forma se podrá dilucidar de mejor manera la relación estrecha que existe entre los REE y su relación con variables geológicas.

1.3 Justificación

El presente trabajo de tesis se desarrolla en el marco de la geoquímica, la geotermia y las energías renovables, contribuyendo específicamente al desarrollo de herramientas

avanzadas para la exploración y caracterización de sistemas geotérmicos convencionales y no convencionales.

La energía geotérmica representa una de las fuentes de energía renovable más prometedoras para satisfacer la creciente demanda energética mundial. Sus características, como la disponibilidad, la capacidad de producción continua y el bajo impacto ambiental, la convierten en una alternativa sustentable con alto potencial (Stober & Bucher, 2021). Actualmente, aunque existen esfuerzos significativos dirigidos hacia el aprovechamiento de recursos geotérmicos no convencionales, como los sistemas de roca seca caliente y los sistemas geotérmicos mejorados, la generación de energía eléctrica se concentra exclusivamente en yacimientos hidrotermales, donde el calor se encuentra naturalmente disponible en reservorios de agua subterránea. Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, (2010) mencionan que esta limitación refleja tanto las barreras tecnológicas como la falta de herramientas eficaces para la caracterización y evaluación de estos recursos no convencionales, a pesar de su gran potencial energético. Por tanto, el desarrollo de nuevas metodologías geoquimiométricas de exploración es clave para el desarrollo de recursos geotérmicos.

En este contexto, la implementación de la geoquimiometría para analizar patrones normalizados de REE proporcionará información relacionada a los procesos de interacción agua-roca, movilidad elemental y la caracterización geoquímica de los sistemas geotérmicos. Estas metodologías aportarán información geoquímica relevante para la reconstrucción de la evolución geológica de los sistemas, fortaleciendo su comprensión y aprovechamiento, mientras que el análisis bibliométrico actúa como una herramienta fundamental para la compilación de las bases de datos geoquímicas. Con base en lo anterior, se propone las siguientes hipótesis de investigación:

H1: Los patrones de REE normalizados en rocas de sistemas geotérmicos muestran agrupamientos consistentes por litología, por lo cual el análisis de patrones de normalización aporta información relevante con respecto a la naturaleza geológicas de los sistemas.

H2: Existen firmas geoquímicas recurrentes (enriquecimiento LREE, anomalías de Eu/Ce) vinculadas a ambientes tectónicos/geológicos específicos lo que permitiría asociar los patrones de normalización a sistemas geotérmicos con características particulares.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un análisis bibliométrico y posterior evaluación geoquimiométrica de la composición geoquímica mundial de REE en rocas asociadas a sistemas geotérmicos convencionales (hidrotermales) y no convencionales (roca seca caliente), para la determinación de los principales patrones de normalización asociados con su evolución geológica.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar criterios búsqueda avanzada mediante técnicas de minería de datos para el análisis bibliográfico en los principales repositorios de artículos científicos (Web of Science y Scopus).
2. Crear una base de datos bibliográfica en el estado del arte de los principales estudios asociados al análisis de REE en sistemas geotérmicos (BDB_REE).
3. Realizar un análisis bibliométrico integral de la BDB_REE con software especializado para identificar la evolución temporal del tema de estudio.
4. Generar una base de datos geoquímica mundial de la composición de REE en rocas de sistemas geotérmicos (BDG_REE).
5. Implementar una metodología geoquimiométrica para determinar los patrones de normalización de REE asociados a la BDG_REE.
6. Identificar los procesos de fraccionamiento de REE en muestras de roca.
7. Tipificar la existencia de firmas geoquímicas correlacionadas con la concentración de REE en sistemas geotérmicos alrededor del mundo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía calorífica producida y contenida en el interior de la Tierra, la cual es conducida continuamente hacia la superficie mediante diversos mecanismos de transferencia de calor, como la conducción y la convección (Chamorro & Mondejar, 2024). Como resultado de esta transferencia de calor desde el núcleo hacia la superficie terrestre, se crea una variación de la temperatura dependiente de la profundidad, conocida como gradiente geotérmico (Archer, 2020). Diversas investigaciones reportan un valor de 25°C por kilómetro de profundidad como promedio mundial aceptado (Criss, 2019). Aunque, en algunas ocasiones se han reportado zonas con gradientes de temperatura anormalmente altos, a estas áreas se les conoce como **Sistemas Geotérmicos**.

Moeck (2014), define a un sistema geotérmico, como *“cualquier configuración geológica donde la energía térmica de la tierra puede ser extraída natural o artificialmente”*. Esta definición puede aplicarse a sistemas geotérmicos convencionales (p. ej., hidrotermales y magmáticos, entre otros) y no convencionales (p. ej., sistemas geotérmicos mejorados, roca seca caliente, entre otros). Más detalles sobre la clasificación de sistemas geotérmicos, se discute en la sección 2.2 del presente trabajo de tesis.

En este sentido, es importante resaltar el origen de la fuente de calor de los sistemas geotérmicos. (Gupta & Roy, 2007a), resaltan que esta energía se asocia a diversos procesos naturales que ocurren en el interior de nuestro planeta, como: (i) el enfriamiento del calor residual de la formación de la Tierra, con origen en las capas más profundas (núcleo y manto interior); (ii) la desintegración de isótopos radiactivos de vida media larga (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K) en la corteza continental y, (iii) el ascenso y producción de calor asociado a procesos magmáticos en límites de placas.

Finalmente, la energía geotérmica al igual que la hidroeléctrica, solar, eólica y bioenergía, es clasificada como una fuente de energía renovable que juega un rol importante en la descarbonización del sector energético nacional (von Rosing & Foldager, 2024). El flujo continuo del calor terrestre, las bajas emisiones de gases de efecto invernadero y su capacidad de ser una fuente de carga base, la constituyen como una energía alternativa a los combustibles fósiles (Nkinyam et al., 2025). Su uso se remonta incluso a miles de años de historia, y a pesar de ello, aún falta mucho por descubrir en su aprovechamiento.

2.1.1 Usos directos de la energía geotérmica

El uso directo de la energía calorífica de la tierra es la forma más antigua, versátil y común de utilizar la energía geotérmica (Dickson & Fanelli, 2013). Los usos más conocidos son (i) balneología, (ii) climatización de espacios, (iii) agricultura, (iv) acuicultura, (v) secado de alimentos, entre otras actividades con beneficio directo para la humanidad (Figura 1). Todas estas aplicaciones directas del calor natural de la Tierra son escalables para uso industrial, favoreciendo la disminución del uso de fuentes de energía fósil e indirectamente, el cuidado del medio ambiente (Stober & Bucher, 2021).

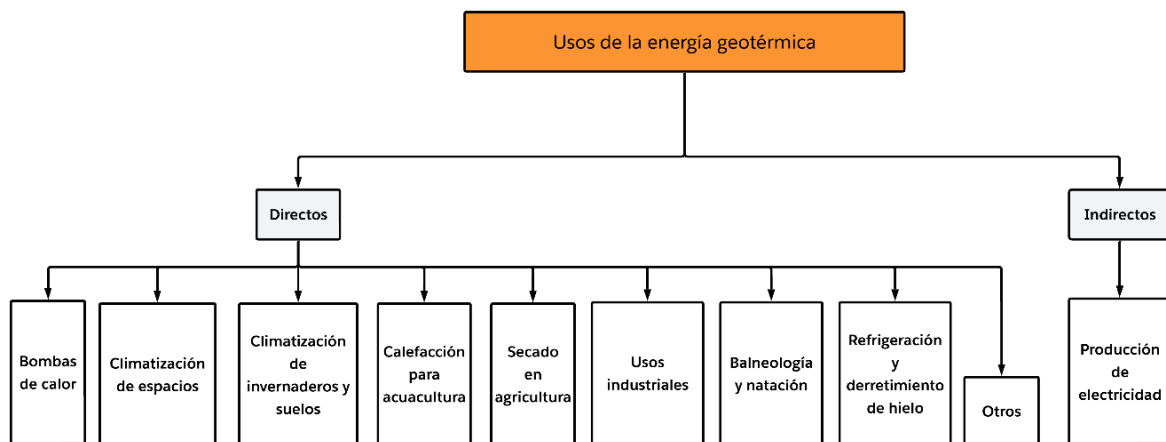


Figura 1. Diagrama descriptivo de los principales usos directos y diversos de la energía geotérmica. Tomado de (Dincer & Ezzat, 2018)

A lo largo de la historia se conoce el uso de las aguas termales, en diferentes civilizaciones alrededor del mundo (p. ej. en países como Roma, Nueva Zelanda, Japón, China, y los nativos americanos), atribuyéndoles propiedades curativas y terapéuticas, además de su uso para cocinar alimentos, baño, aseo personal y calentamiento de espacios (Stober & Bucher, 2021; Uzelli et al., 2024). En su trabajo de revisión literaria sobre la evolución y desarrollo de la energía geotérmica, Soltani et al., (2019), mencionan que esta fuente de energía es parte de la cultura e historia y ha generado actividades comerciales, religiosas y técnicas por miles de años, antes de emerger como un tema de investigación científica e ingenieril, en el marco actual de las energías renovables.

En cuanto a aplicaciones que se dan en la actualidad del calor geotérmico, Lindal (1974) propone un uso en cascada de la energía geotérmica, es decir, evalúa el rol de la temperatura de los recursos geotérmicos en la elección de la aplicación más adecuada

(Dincer & Ezzat, 2018). De esta forma, se logra un uso eficiente del calor residual de los fluidos geotérmicos y se plasma una estrategia de economía circular aplicada al aprovechamiento integral del recurso geoenergético (Figura 2).

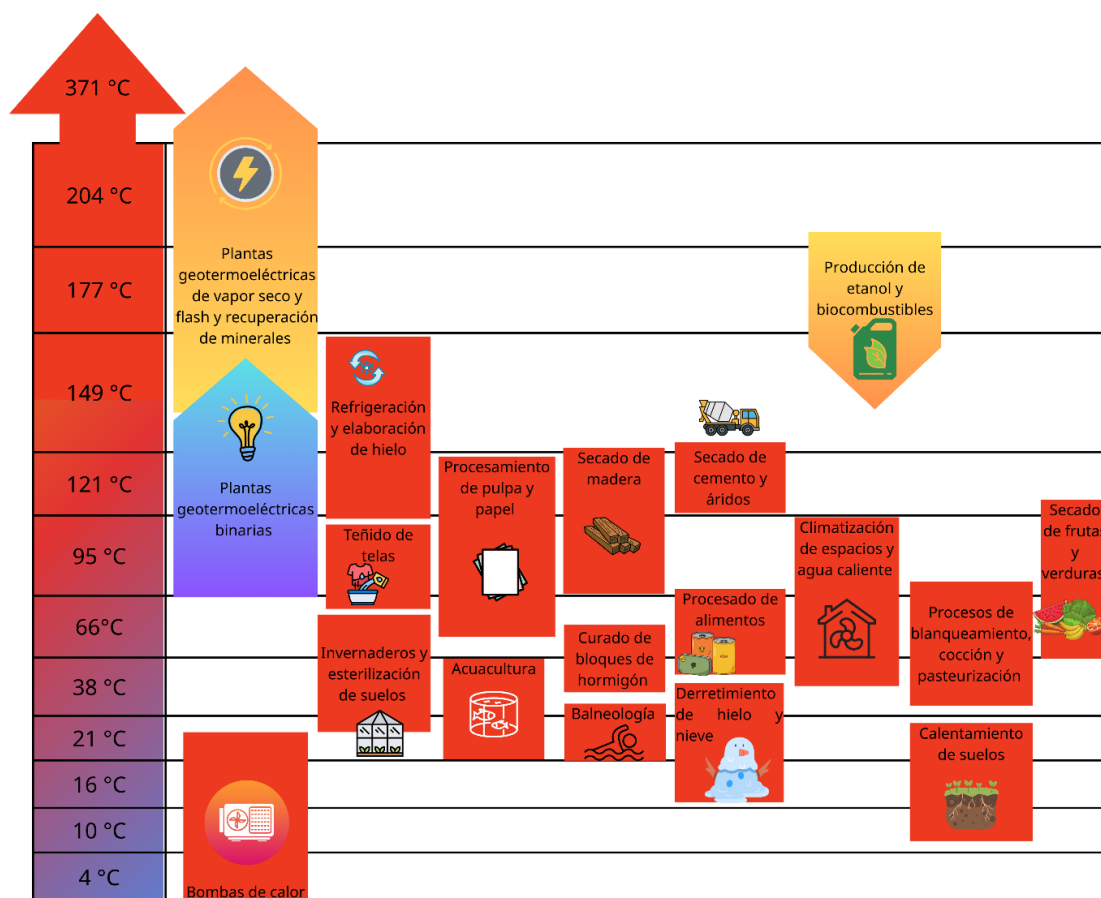


Figura 2. Diagrama de uso en cascada de Lindal, representativo de los posibles usos directos de la energía geotérmica con base en la temperatura del fluido. Modificado de (Dincer & Ezzat, 2018).

En la Figura 2 se observan las posibles aplicaciones por rango de temperaturas. Iniciando con temperaturas menores a 30 °C que son comúnmente utilizadas en bombas de calor y calefacción de suelos. En el rango de 30 °C a 90 °C de temperatura, la energía calorífica es útil para una gama de procesos diferentes como: (i) pasteurización (ii) actividades agropecuarias, (iii) balneología, (iv) producción de biogás. A partir de los 95 °C los fluidos geotérmicos pueden ser utilizados para la producción de energía eléctrica mediante la implementación de centrales geotermoeléctricas de ciclo binario (Dincer & Ezzat, 2018). Otras formas de aprovechamiento directo de este rango de temperaturas (90 a 180 °C), están enfocadas a procesos industriales, como: (i) refrigeración, (ii) producción de hielo, (iii) procesos de fabricación de papel, (iv) aluminio vía proceso Bayer, (v) refinamiento de

azúcar, (vi) secado de diversos materiales y alimentos, (vii) climatización de espacios, (viii) agua caliente, y otros usos.

Con la identificación de las diversas aplicaciones que requieren rangos de temperaturas específicas en sus procesos, se logra un aprovechamiento eficiente de los recursos, permitiendo proponer proyectos geotérmicos integrales (Dincer & Ezzat, 2018). Esfuerzos enfocados a la creación de estos centros geotérmicos de aprovechamiento integral del calor geotérmico se reportan en México, con la creación de un Sistema Deshidratador Geotérmico de Alimentos, diseñado por el Grupo iiDEA (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energía Alternas) de la UNAM (Aviña et al., 2016). Este proyecto es pionero en el uso directo a recursos geotérmicos de baja entalpía en México, debido a que este tipo de recursos, comúnmente se destinan a actividades de balneología (Aviña & Pérez, 2020). Este sistema utiliza los fluidos geotérmicos residuales de la planta geotermoeléctrica Domo San Pedro, ubicada en San Pedro Lagunillas, Nayarit.

2.1.2 Generación de energía eléctrica

Fue en 1904, en el campo geotérmico de Larderello, Italia, que se logra por primera vez la conversión de energía geotérmica en energía eléctrica (Parri et al., 2016). Larderello, junto con la planta geotérmica de la ciudad de Wairakei en Nueva Zelanda (fundada en 1958), son las plantas geotérmicas más antiguas del mundo. Cabe destacar que ambas centrales de generación siguen en funcionamiento aún después de más de 120 y 68 años de producción ininterrumpida, respectivamente. Actualmente, países como Estados Unidos, China e Islandia son líderes en el uso directo de calor, como principal aprovechamiento de la energía geotérmica. Por otro lado, los países con mayor inversión actual en plantas de energía geotérmica son Indonesia, Turquía y Kenia (Uzelli et al., 2024).

Para el caso particular de México, el uso de la energía geotérmica para la producción de electricidad inició en 1959, con la puesta en marcha de la primera planta geotermoeléctrica del continente americano en Pathé, Hidalgo (DiPippo, 2022). El nombre de este poblado hace referencia a la actividad geotermal conocida desde tiempos prehispánicos, ya que proviene del Hñahñu “pathe” (páthe), que significa “agua caliente” o “aguas termales” (Hernández Cruz et al., 2010). Esta histórica planta geotérmica estuvo en funcionamiento hasta 1972 y tuvo una capacidad instalada de 3.5 MW (Le Bert et al., 2011). La planta geotérmica del Pathé marcó el inicio de la geotermia en México promoviendo la adquisición de conocimiento y capacidades técnicas para el desarrollo de otros campos geotérmicos más grandes con los que se posicionó como uno de los países con mayor capacidad

instalada de esta industria energética (Canet et al., 2021). Actualmente y gracias al avance en las investigaciones para la exploración y explotación de sistemas geotérmicos, el potencial de generación de energía alrededor del mundo se ha incrementado en los últimos años (p. ej. el reporte global publicado por Think Geenergy (2025) menciona que, para el año 2024 se añadieron 389 MWe de capacidad instalada en el mundo, con un promedio de 16 MWe por proyecto). El desarrollo de tecnologías que permiten la mejora de características cruciales como la permeabilidad, la inyección y retorno de fluidos integra los sistemas geotérmicos mejorados como proyectos factibles en el aprovechamiento de energía geotérmica (Moeck, 2014).

2.2 Clasificación de sistemas geotérmicos

Según Archer (2020), los requerimientos esenciales para la existencia de un sistema geotérmico son: (i) una fuente de calor, (ii) un reservorio de roca permeable (porosa o fracturada) que permita el flujo del fluido, (iii) fluido que actúe como transporte de la energía calorífica, (iv) una capa de roca impermeable (esta capa puede ser producto de procesos de "autosellado" en el cual minerales secundarios como sílice o calcita precipitan de los fluidos geotérmicos) y, (v) un mecanismo de recarga en el cual la lluvia (agua meteórica) permee hacia el sistema desde la superficie. Esta serie de requerimientos estructurales tiene lugar en diferentes ambientes geológicos alrededor del mundo, dando origen a sistemas geotérmicos que, aunque en esencia comparten una estructura similar, tienen propiedades únicas. Estas propiedades como la temperatura, entalpía y ambiente tectónico permiten diferenciar entre la gran diversidad de sistemas geotérmicos alrededor del mundo, clasificándolos con base en su objetivo de estudio. Al categorizar estos sistemas, es posible identificar similitudes en su formación y desarrollo en entornos geológicos comparables, facilitando la exploración y el mejoramiento de las tecnologías de aprovechamiento de recursos geotérmicos (Uzelli et al., 2024).

2.2.1 Clasificación por temperatura

La clasificación de sistemas geotérmicos más conocida se basa en la entalpía del fluido de trabajo, debido a que es una clasificación simple, clara y fácil de comprender en contextos geotérmico (Dincer & Ozturk, 2021). Con base en esta propiedad, se puede clasificar a los sistemas geotérmicos como de baja, mediana y alta entalpía, lo que nos permite comprender la cantidad de energía asociada a los diferentes sistemas. Así, diversos autores han reportado intervalos de temperaturas asociados a la clasificación por nivel de entalpía (Tabla 1).

La notoria variación en los rangos de temperaturas asociados a los niveles de entalpía reportados por diversos autores en la bibliografía puede asociarse a los objetivos de investigación de cada trabajo (ver Tabla 1). Por ejemplo, Hochstein (1990) sostiene que todo el intervalo de temperaturas asociadas a los sistemas geotérmicos puede ser utilizado para el desarrollo de pequeñas plantas geotérmicas (usos directos o generación de electricidad). Con base en esto, propone un rango de temperaturas bajas, medias e intermedias considerando los usos que se le puede dar al recurso geotérmico. Las temperaturas bajas ($<125\text{ }^{\circ}\text{C}$) se plantean como adecuadas para usos directos (con un mínimo de 50MWc de capacidad; ver diagrama de Lindal en Figura 2); en cambio, a partir de temperaturas intermedias ($>125 - 225 <^{\circ}\text{C}$) es posible la producción de energía eléctrica (con mínimo 5MWe de capacidad instalada), así como usos directos. Por otro lado, autores como Axelsson & Gunnlaugsson (2000) trabajan con una clasificación de baja y alta temperatura, la cual es una clasificación común en Islandia, dado que la mayoría de sus recursos geotérmicos se encuentran en el rango de entre 150 a 200 $^{\circ}\text{C}$ (Steingrímsson et al., 2022) .

Otra clasificación de baja y alta temperatura propuesta por Nicholson (1993) considera además los usos adecuados para cada rango de temperatura y subdivide la clasificación de acuerdo con el estado de equilibrio del reservorio y tipo de fluido. Williams et al. (2011) mencionan que si bien existen diversos motivos para establecer rangos de temperaturas específicos en la clasificación (u otra propiedad termodinámica), no es el único criterio para considerarse. Con el fin de evitar estas discrepancias proponen el reporte de los rangos de temperaturas en las evaluaciones de recursos geotérmicos particulares, más que el uso de rangos clasificatorios, tomando en cuenta que el avance tecnológico puede modificar los límites y definiciones de los recursos geotérmicos.

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos en función del rango de temperatura de los fluidos. Modificado de (Dincer & Ozturk, 2021).

Entalpía	Rango de temperatura (°C)	Referencia
Baja	< 90	Muffler & Cataldi (1978)
	< 125	Hochstein, (1990)
	< 100	Benderitter & Cormy (1990)
	< 150	Nicholson (1993)
	< 190	Axelsson & Gunnlaugsson (2000)
Media	90 – 150	Muffler & Cataldi (1978)
	125 - 225	Hochstein (1990)
	100 – 200	Benderitter & Cormy (1990)
Alta	> 150	Muffler & Cataldi (1978)
	> 225	Hochstein (1990)
	>200	Benderitter & Cormy (1990)
	>150	Nicholson (1993)
	>190	Axelsson & Gunnlaugsson (2000)

2.2.2 Clasificación por naturaleza geológica

Como se mencionó anteriormente, los sistemas geotérmicos requieren de condiciones geológicas muy específicas para su formación, las cuales pueden ocurrir en diferentes ambientes tectónicos alrededor del mundo. Esta diversidad de zonas geotérmicas promisorias permite clasificar a los sistemas geotérmicos con base en sus características geológicas de formación, las cuales tienen repercusión directa en el tipo de fuente de calor y propiedades térmicas de los sistemas. Con base en lo anterior, Dincer & Ezzat (2018) proporcionan la clasificación descrita a continuación

a) Sistemas de agua caliente asociados a yacimientos de gas y petróleo.

Los pozos petroleros perforados a grandes profundidades y considerando el gradiente geotérmico natural de la Tierra, pueden ser productores de fluidos de alta temperatura. Esta posibilidad de aprovechamiento geotérmico de pozos petroleros se enfoca principalmente en aquellos cuya vida útil de producción se encuentre en su etapa final. En estos pozos, la producción de agua llega a superar a la producción de hidrocarburo, lo que eleva los costos de operación y los vuelve inviables económicamente. En cuestiones térmicas, estos sistemas se caracterizan por su baja entalpía, con temperaturas que usualmente no superan los 121 °C (Elders & Moore, 2016; Raos et al., 2019). La investigación para su aprovechamiento vislumbra una oportunidad para países con recursos petroleros y con

potencial geotérmico como México y Alemania, este último con recursos geotérmicos de difícil acceso (Michalzik et al., 2016). El agua caliente extraída de estos pozos es susceptible a ser utilizada mediante tecnología de usos directos, como la calefacción de espacios, conservación de alimentos entre otras aplicaciones mencionadas en la sección 2.1.1 del presente trabajo de tesis. Elders & Moore (2016) mencionan que es a partir de los 80°C que los fluidos geotérmicos son viables para su uso en la generación de energía eléctrica mediante la implementación de plantas geotermoeléctricas basadas en el ciclo orgánico de Rankine.

Algunos ejemplos de proyectos de investigación para el uso de la energía geotérmica en campos petroleros activos se hicieron en Estados Unidos, China y Colombia (Céspedes et al., 2022; Reinhardt et al., 2011; Xin et al., 2012). El primer paso hacia este objetivo se dio en el *Naval Petroleum Field No. 3*, desarrollado por el *Rocky Mountain Oilfield Testing Center*, del Departamento de Energía de Estados Unidos. El proyecto se dividió en dos fases que sumaron un tiempo total de tres años y medio en funcionamiento, generando en ese periodo una suma cumulativa de 2120 MWh a partir de 1.36 millones de m³ de agua caliente, lo suficiente para proveer electricidad a 120 hogares (Cano et al., 2022).

b) Magmáticos

Constituyen los recursos geotérmicos de mayor temperatura, abundantes en zonas de límites de placas donde las erupciones volcánicas ocurren con mayor frecuencia (Gupta & Roy, 2007b). Uno de los retos para su explotación consiste en la recuperación del agua inyectada a presión en el pozo perforado a través del magma, que transporte el calor a la superficie para ser aprovechado en plantas de energía geotérmica (DiPippo, 2008).

c) Sistemas conductivos sedimentarios

Las cuencas sedimentarias producen recursos geotérmicos de baja y mediana temperatura (20 a 150 °C) gracias a condiciones como su alto gradiente geotérmico (>30 °C/Km) y la conductividad térmica baja de las rocas (Lund et al., 2008). Requieren una perforación profunda para asegurar suficiente temperatura del agua. Sin embargo, no están disponibles comercialmente, pese a que se están haciendo esfuerzos para su promover su explotación en cuencas sedimentarias con alto flujo de calor en Australia. Otros ejemplos se extienden sobre la Formación Madison de Dakota Norte, Dakota Sur y el área de Wyoming al Norte de Estados Unidos, y la cuenca Pannonian de Europa Central (Dincer & Ezzat, 2018).

d) Sistemas convectivos hidrotermales

En este tipo de sistemas geotérmicos, el agua transporta el calor por convección desde la fuente de calor hacia el reservorio y en muchos casos se transporta por la roca fracturada y permeable hacia la superficie, dando lugar a manifestaciones térmicas como los géiseres y manantiales termales. De acuerdo con sus características de temperatura, química del fluido y estructura geológica, los sistemas geotérmicos convectivos pueden subdividirse en vapor y líquido dominantes (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010; White, 1973). Cabe resaltar que este tipo de sistemas son también conocidos como sistemas geotérmicos convencionales, dado que actualmente son comercialmente explotados alrededor del mundo, con aplicaciones tanto para la generación de energía eléctrica, como para usos directos.

e) Sistemas geotérmicos geopresurizados

Los sistemas geotérmicos geopresurizados se forman en cuencas con una tasa de sedimentación muy rápida y constante, atrapando agua a muy altas presiones. El primer sistema de este tipo reportado en la literatura mundial se localizó en el Golfo de México, bajo una gran cantidad de capas sedimentarias con una profundidad de entre 6 y 8 Km, una presión de 130 MPa y un rango de temperatura entre 150 a 180 °C (Gupta & Roy, 2007b). Las principales características que convierten a los sistemas geopresurizados en recursos geotérmicos atractivos son: (i) la alta presión, (ii) temperaturas elevadas (> 230 °C) y (iii) la presencia de metano disuelto en agua (DiPippo & Renner, 2014). Estos sistemas representan un recurso energético de gran potencial, aunque para su aprovechamiento comercial, es necesario que el sistema cumpla con ciertas condiciones, como: (i) presencia de rocas con permeabilidad primaria y un reservorio de grandes dimensiones; (ii), limitado estructuralmente por fallas que permitan la recarga del sistema, pero con rocas encajonantes con bajo fracturamiento para evitar la subsidencia del sistema y (iii) grandes cantidades de metano disuelto que permita la extracción, venta o reutilización en una planta de generación híbrida (DiPippo, 2016). Estas condiciones son difíciles de encontrar, de modo que no existen proyectos comerciales para su explotación, aunque la investigación sigue vigente.

f) Sistemas geotérmicos radiogénicos

El calor de los sistemas radiogénicos es generado por intrusiones graníticas posicionadas cerca de la superficie, en la corteza terrestre, a través de procesos de decaimiento de isótopos radiactivos de vida media larga como el ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K . El calor generado

por el decaimiento de estos isótopos aumenta la temperatura de los acuíferos regionales y locales alojados en este tipo de roca, en un rango de entre 30 a 150 °C (Dincer & Ezzat, 2018). La mayoría de los sistemas geotérmicos de roca seca caliente (HDR, por sus siglas en inglés) tienen como una de sus principales fuentes de calor a la actividad radiogénica, dada la naturaleza de la composición de la corteza terrestre. De acuerdo con el catálogo de Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS, por sus siglas en inglés) realizado por (Kong et al., 2021), solo 3 de los 35 proyectos de EGS que se han puesto en marcha, son exclusivamente de fuente radiogénica. En este trabajo se concluye que a pesar de que los sistemas radiogénicos tienen un atractivo flujo de calor (100 a 120 Mw/m²), el fracturamiento hidráulico es difícil debido al espesor de la corteza, pues estos sistemas se localizan intraplaca. Los tres sistemas geotérmicos radiogénicos mencionados son: Cooper Basin, y Paralana, Australia y Rosemanowes, Reino Unido.

g) Sistemas geotérmicos mejorados

Los EGS son sistemas geotérmicos en los que se implementan técnicas que permiten asegurar la permeabilidad y circulación de fluidos (Bendall et al., 2014). Los HDR son los sistemas geotérmicos en los que más comúnmente se han implementado técnicas de fracturamiento hidráulico, enfocado al aumento de la permeabilidad e interconexión entre pozos inyectores y productores (Tenzer, 2001). La principal ventaja de la implementación de tecnologías de vanguardia a sistemas geotérmicos no convencionales radica en la diversificación de posibles fuentes de energía geotérmica. Los sistemas HDR son mucho más abundantes que los sistemas geotérmicos convencionales explotados alrededor del mundo, por lo que son una potencial fuente de energía geotérmica no convencional (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

Algunos proyectos EGS piloto son: Soultz-sous-Forêt (II) en Francia, a una profundidad de 5 km con fluidos de hasta 150 °C con una potencia de salida de 1 MW; en Landau, Alemania se ha implementado un sistema EGS a 2.5 km de profundidad, con fluidos a temperaturas de 160 C° y una potencia de salida de 1.5 MW; y finalmente, en Habanero, Australia, el sistema EGS instalado está compuesto por pozos de hasta 4.25 km de profundidad y con temperaturas de hasta 212 °C, con una potencia de salida de 1.5 MW (Glassley, 2014).

2.2.3 Catálogo de “plays” geotérmicos

El primero en describir y catalogar sistemas geotérmicos fue (Hochstein, 1988), donde revisó la clasificación de los recursos geotérmicos según la temperatura en los pozos productores. En este sentido, presentó un enfoque para la evaluación del “potencial de

productividad de los yacimientos geotérmicos” con la finalidad de proveer los posibles esquemas de utilización del recurso geotérmico, principalmente para aquellos de baja temperatura. Finalmente, aplicó el modelado propuesto a diferentes sistemas geotérmicos en explotación, con lo que demostró la viabilidad de esta metodología en la mayoría de los tipos de yacimientos geotérmicos. Más recientemente, Moeck (2014) propuso un nuevo catálogo de plays¹ geotérmicos basado en sus características geológicas, en su régimen de transferencia de calor (convectivo o conductivo (Figuras. 3 y 4) y en la génesis de la fuente térmica (ígneas o no magmáticas).

En este catálogo se considera que son los regímenes tectónicos los que gobiernan las propiedades clave presente en la diversidad de plays geotérmicos existentes, por ejemplo: (i) régimen de transferencia de calor (convectivo o conductivo); (ii) fuente de calor: de origen magmático/plutónico o no magmático; (iii) y finalmente, controles geológicos como la litología, fallas, fracturas, campo de esfuerzos, diagénesis, mecánica de rocas, química de fluidos y geoquímica. Estas últimas (punto iii), influyen directamente en el comportamiento de la permeabilidad, porosidad, flujo o ausencia de fluidos (vapor y/o agua caliente) y la distribución lateral y vertical de la temperatura en el reservorio.

En esta clasificación, Moeck (2014) integra los sistemas geotérmicos convencionales, sistemas actualmente utilizados para producir energía eléctrica o en usos directos (p. ej., sistemas geotérmicos convectivos). Además, considera a los EGS como recursos geotérmicos que pueden ser económicamente explotados, independientemente de la ausencia de alguna de las características de temperatura, permeabilidad y presencia de fluidos de los recursos geotérmicos actualmente explotables. A continuación, se hace una breve descripción de los tipos de sistemas convencionales y no convencionales que integran a este catálogo, como los sistemas convectivos y conductivos. Los sistemas convectivos tienen una entalpía alta, se caracterizan por la presencia natural de fluidos y se encuentran en áreas tectónicamente activas. La fuente de calor puede ser ígnea, relacionada a vulcanismo activo/ plutonismo reciente, o de origen no magmático (en áreas de extensión con alto flujo de calor debido al adelgazamiento cortical). Por el contrario, los sistemas geotérmicos conductivos se caracterizan por la ausencia de fluidos que transporten el calor, consecuencia de la presencia de rocas no permeables como areniscas compactas,

¹ Término aplicado a la exploración de recursos naturales del subsuelo, fundamental en la evaluación de recursos, pues describe ambientes geológicos genéricos que hospedan recursos explotables a nivel económico (Moeck et al., 2020).

carbonatos o rocas cristalinas. Por este motivo, en este tipo de sistemas es necesaria la implementación de tecnologías de fracturamiento hidráulico e inyección de fluidos para la viabilidad de su explotación comercial.

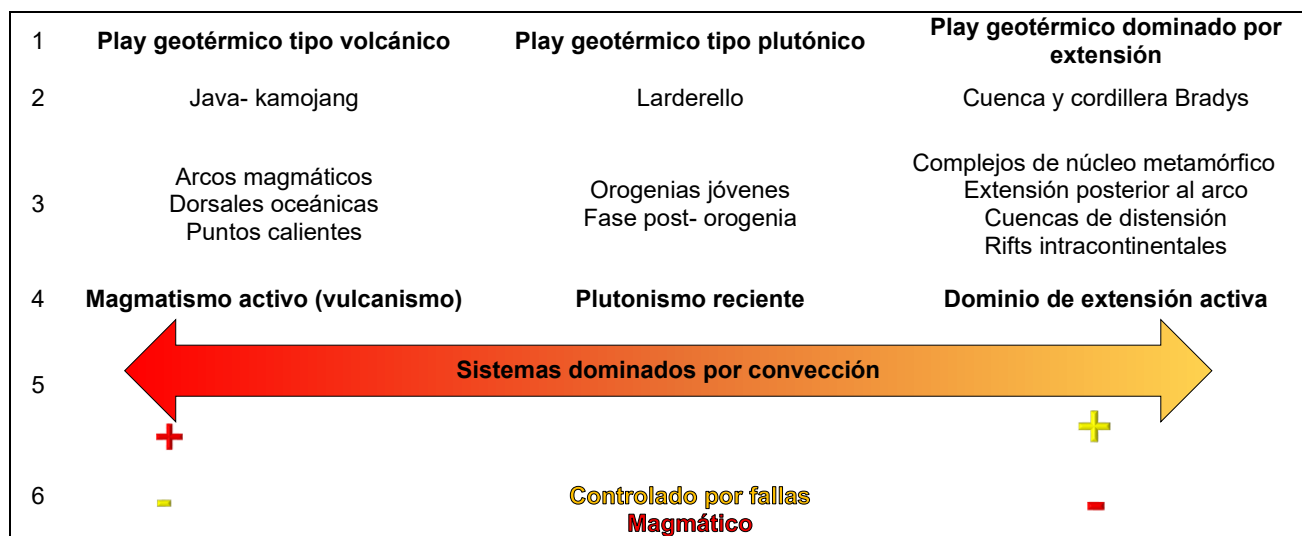


Figura 3. Plays de sistemas geotérmicos convectivos basado en los controles geológicos de actividad ígnea y ausencia de actividad ígnea, pero con actividad de extensión significativa. (1- Play tipo, 2-Localidad tipo, 3- Configuración tectónica, 4- Hábitat geológico de los reservorios geotérmicos potenciales, 5 – Tipo de transferencia de calor, 6- controles geológicos. Tomado de (Moeck, 2014)

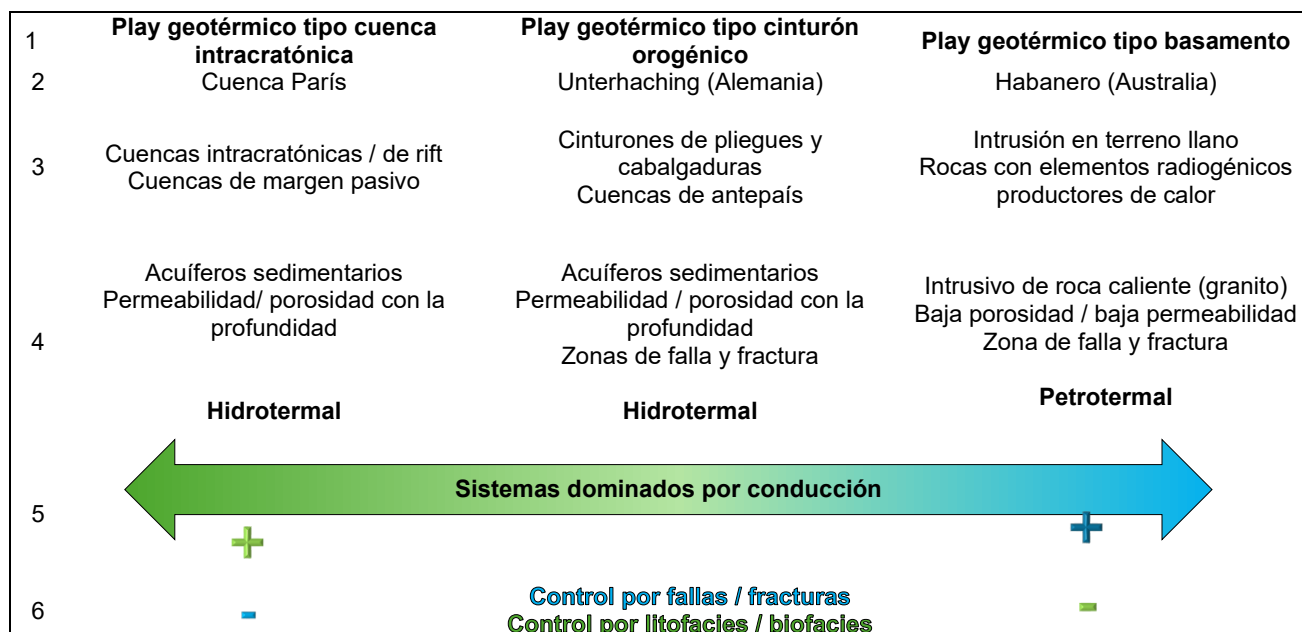


Figura 4. Plays de sistemas geotérmicos dominados por conducción, que van desde cuencas intracratónicas a cuencas de antepaís de cinturones orogénicos con sus características zonas de antefosa fondo hasta provincias de basamento (metamórfico o ígneo). Los controles geológicos en plays dominados por conducción son litofacies o biofacies de rocas sedimentarias, así como fallas y fracturas. Típicamente estos tipos de play carecen de fallamiento activo y sismicidad. Tomado de Moeck (2014).

Finalmente, en cuanto a los plays de tipo ígneo, la transferencia de calor puede ser tanto de tipo convectivo, como de tipo conductivo. La cámara magmática como fuente de calor, mientras que en los plays ígneos conductivos, la fuente de calor se encuentra en o cerca de rocas intrusivas ricas en elementos radiogénicos productores de calor (Moeck, 2014). La Tabla 2 muestra el catálogo de plays geotérmicos que incorpora la clasificación de recursos geotérmicos y su relación con el contexto geológico-estructural y tectónico. Además, reporta los mecanismos de transporte de energía, almacenamiento de calor, estructura de la permeabilidad (Moeck, 2014) y finalmente, proporciona ejemplos de sistemas geotérmicos muy bien estudiados y utilizados actualmente en la producción de energía eléctrica. Cabe destacar que, el principal objetivo del catálogo propuesto por Moeck se enfoca en hacer más eficiente y rentable el proceso de exploración y evaluación de recursos geotérmicos, en un contexto en el que la demanda de energías renovables va en incremento y el desarrollo de tecnología de mejoramiento de sistemas geotérmicos ha ampliado la cantidad de sistemas geotérmicos explotables a nivel económico para la producción de energía.

Tabla 2. Catálogo de plays geotérmicos. Las características de la roca reservorio, tipo de fluido y rango de temperatura se refieren a los ejemplos y no reflejan necesariamente características generales restringidas. Tomado de Moeck (2014).

Transferencia de calor	Controles geológicos	Configuración de placas tectónicas	Tipo de play geotérmico	Índice	Ejemplos	Características		
						Roca del reservorio	Fluido	Temperatura (°C)
Dominado por convección (CV)	Cámara de magma en campos volcánicos activos	Regiones de arcos volcánicos en zonas de subducción Dorsales oceánicas Plumas del manto (Puntos calientes)	Tipo volcánico	CV1	Java-Kamojang (Indonesia) Taupo – NZ Reykjanes- Islandia Hawaii- EUA	Andesitas Riolitas Basalto	Fluidos corticales mezclados con infiltración (meteórica, agua marina)	70 - 320
	Magma cristalizado, Intrusiones + fallamiento activo, Fallamiento activo (sismicidad natural)	Vulcanismo decreciente en terrenos escarpados en cinturones orogénicos jóvenes	Tipo plutónico	CV2	Landerello, Italia Los Géysers, Estados Unidos	Sedimentos, Granito, gabro	Infiltración y fluidos corticales	100 - 350
		Complejos de núcleos metamórficos Cuencas de separación Cuencas tras arco Rifts intracontinentales (graben)	Tipo dominio de extensión	CV3	Gran Cuenca (Range and Basin), EUA Oeste de Turquía Soultz – sous. Forêt (Francia)	Roca sedimentaria volcánica	Variable	150 - 240
Dominado por conducción (CD)	Litofacies (tamaño de grano, mineralogía)	Cuencas de rift intracontinentales	Tipo cuenca intracratónica (Hidrotermal)	CD1	Cuenca norte de Alemania	Sedimentos fluviales de baja y alta permeabilidad	Fluidos de cuenca	<150
	Biofacies (contenido fósil) - Litofacies /biofacies+fallas/fracturas	Cuencas de margen pasivo Cinturones de pliegues y cabalgaduras Cuencas antepaís	Tipo cinturón orogénico (Hidrotermal)	CD2	Cuenca Molasse (Sur de Alemania)	Sedimentos marinos de alta y baja permeabilidad	Fluidos de infiltración (Posibles fluidos de cuenca)	< 160
	Fallas/fracturas	Intrusiones intracontinentales en terrenos planos	Tipo basamento (Petrotermal, roca seca caliente)	CD3	Cuenca Cooper (Australia)	Granito con alta producción de calor radiogénico	-	150 - 320

2.3 Panorama actual de la energía geotérmica en el mundo

A la par del crecimiento de la población y el desarrollo tecnológico, la demanda mundial de energía se encuentra en incremento. Sumado a esto, la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero de los combustibles fósiles, sustenta a las energías renovables como una alternativa idónea para la producción de energía (Soltani et al., 2019). Para fines de describir la situación de la demanda y producción de energía eléctrica mundial, se utilizan los términos de “capacidad instalada” y “generación eléctrica”. La capacidad instalada (medida en MW) se refiere a la potencia activa máxima que puede suministrarse de una forma continua, y la generación de energía (GWh) se refiere a la electricidad producida, incluyendo la generación conectada a la red y la generación aislada, así como la electricidad de autoconsumo en las industrias energéticas en un periodo de tiempo (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2025). Según datos publicados por la Agencia Internacional de Energías Renovables, actualmente la capacidad instalada global para la producción de energía eléctrica es de 9.6 TW. De este total, 5.1 TW (53.6 %) corresponden a fuentes no renovables (p. ej. combustibles fósiles, 4.5 TW; energía nuclear, 399 GW; almacenamiento por bombeo, 142 GW, entre otras) y 4.4 TW corresponden a fuentes renovables (46.4 %: Figura 5).

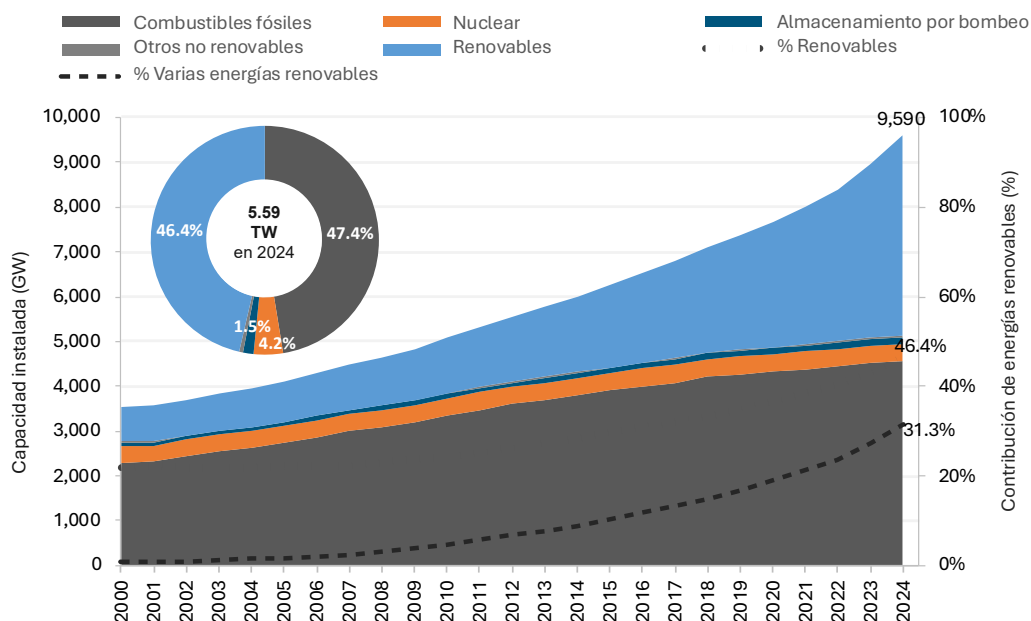


Figura 5. Gráfica de la capacidad global instalada por un grupo de fuente de energías desde el año 2000 hasta el año 2024. Tomada de IRENA Stats Tools (2025).

Esta gráfica muestra una tendencia de crecimiento de la capacidad instalada para las fuentes de energía renovable en comparación con las fuentes convencionales. Para 2024 la tasa de crecimiento de las energías renovables fue de 15.1 %, mientras que para las fuentes convencionales fue apenas del 0.9 %.

En la Figura 6 se muestra de manera gráfica la capacidad instalada a nivel mundial de fuentes de energías renovables, concerniente al periodo de tiempo comprendido del año 2000 y 2024 (IRENA, 2025). Se puede observar que las energías con mayor capacidad instalada en 2024 fueron la energía solar, hidroeléctrica y la energía eólica con una capacidad instalada de 1,866 GW; 1,283 GW; y 1,133 GW, respectivamente. Es importante destacar que, a partir de 2010, las energías con mayor crecimiento en su capacidad instalada son la energía solar y la energía eólica. En cuanto a la energía geotérmica, la capacidad instalada global es menor respecto a las demás energías, con unos 15, 427 MW en el año 2024 (IRENA, 2025). Por otro lado, el reporte mundial publicado por Think GeoEnergy (Think GeoEnergy, 2025) informa que la capacidad global instalada aumentó a 16, 873 MW debido a la adición de 14 nuevas plantas geotérmicas. Cabe resaltar que se plantea la adición de 3 plantas geotérmicas más para inicios de 2025, con un total de 17 nuevas plantas de generación de electricidad que aportarían 389 MW de capacidad añadida.

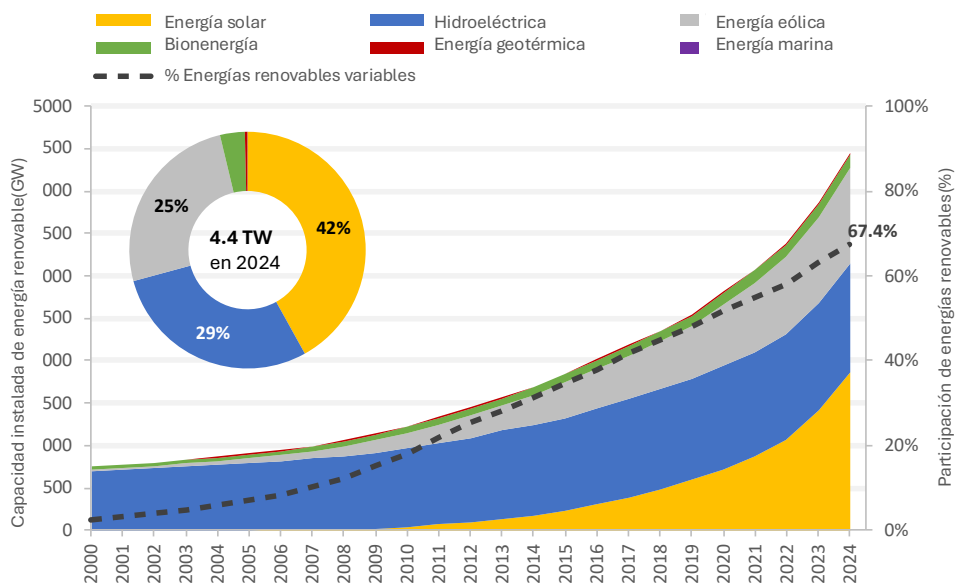


Figura 6. Capacidad instalada de fuentes de energía renovable por tecnología, en el periodo del año 2000 al 2024. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).

Con respecto a la generación de electricidad, la energía geotérmica tiene uno de los CUF (Factor de capacidad de utilización, por su acrónimo en inglés) más altos reportados para una fuente de energía renovable. El factor de capacidad de utilización se refiere a la relación entre la energía realmente generada con el equipo instalado y la producción potencial que podría generarse si se utilizara el total de su capacidad en un periodo de tiempo determinado, usualmente un año (Chaudhari et al., 2016; U.S. Energy Information Administration, 2025). En este contexto y con base en lo reportado por IRENA (2025), la energía geotérmica puede alcanzar valores de hasta el 76% (Figura 7). Otros datos refieren que este parámetro se ha mantenido en un promedio aproximado de 69% en un periodo de 43 años (de 1980 a 2023), con un mínimo de 63% reportado en 1995 y con un valor máximo de 71% reportado en el 2005 (Bertani, 2015; Gutiérrez-Negrín, 2024; Hutterer, 2020). De acuerdo con la Figura 7, se puede concluir que la energía geotérmica es una de las más eficientes en producción de electricidad, incluso más que a las energías con mayor financiamiento, las cuales, como resultado de su popularidad en la industria energética, han mejorado su eficiencia en los últimos años. En general, el CUF de cada fuente de energía se ha mantenido en un rango relativamente estable a lo largo del tiempo.

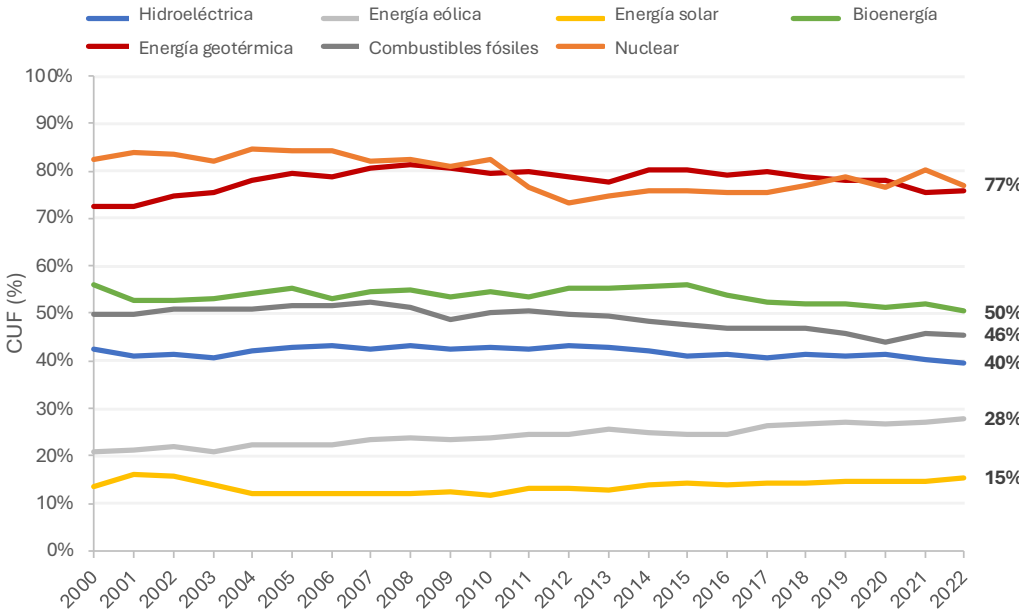


Figura 7. Factor de capacidad de utilización promedio (CUF) para cada tecnología del año 2000 a 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).

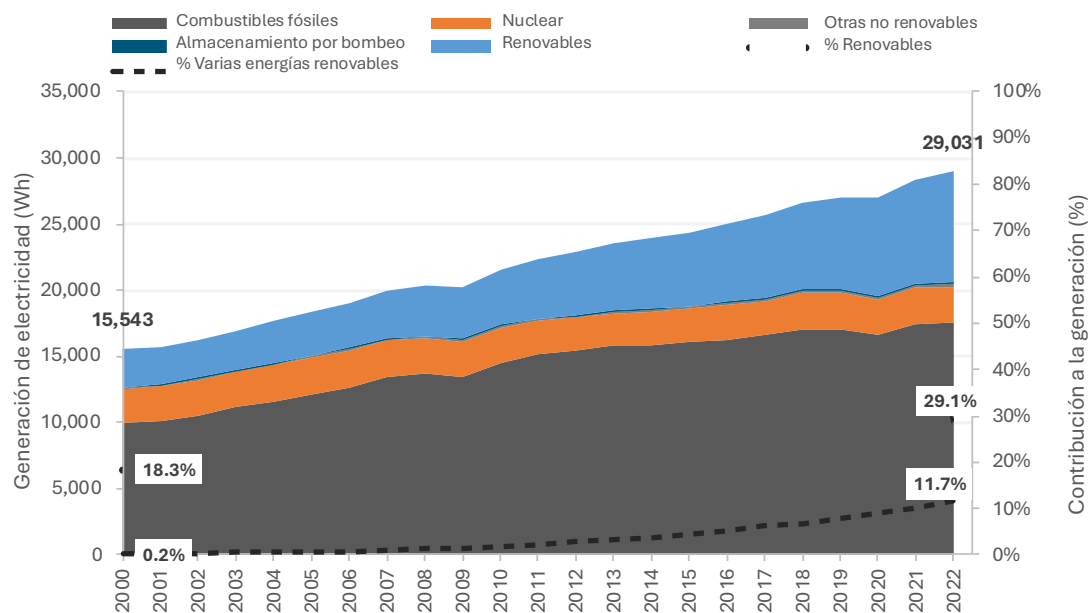


Figura 8. Gráfica de la generación de electricidad global por grupo de fuentes de energía del año 2000 al 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).

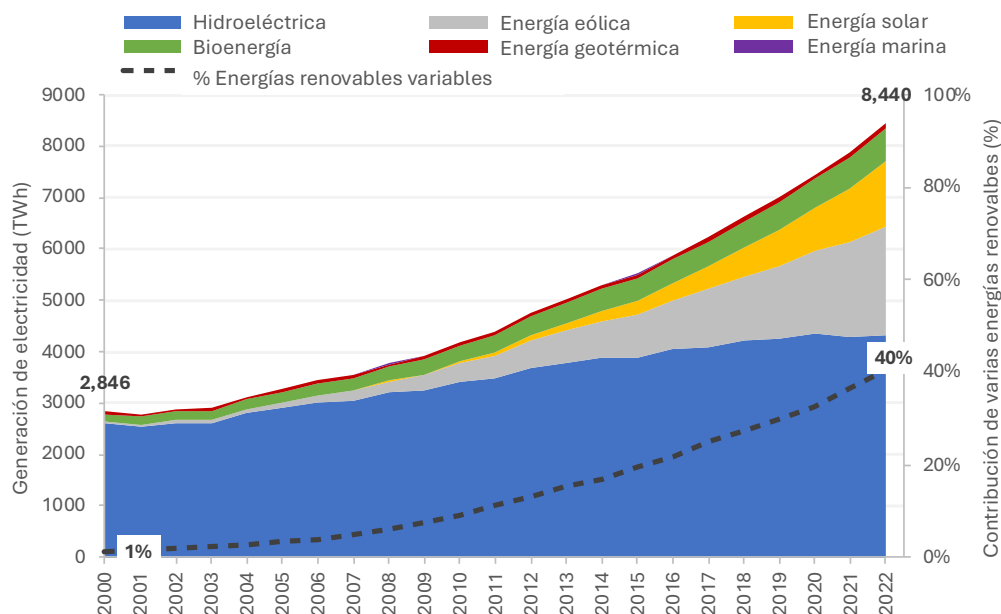


Figura 9. Gráfica de la generación de electricidad de fuentes de energía renovable por tecnología del año 2000 al 2022. Tomado de IRENA Stats Tool (2025).

La generación de electricidad a nivel mundial para el año 2022 (Figura 8) fue de 29, 031 TWh, de los cuales 20, 591 TWh fueron producidos por fuentes no renovables (combustibles fósiles

17, 599 GWh; 224 GWh; energía nuclear 2, 676,106 GWh; otras fuentes no renovables 174, 707 GWh y 141,345 GWh por almacenamiento por bombeo). Por el contrario, las energías renovables (Figura 9) sumaron un total de 8, 440 TWh, de los cuales la energía hidroeléctrica aportó 4,330 TWh, la eólica 2, 098 TWh, la solar 1,294 TWh, la bioenergía 0.6 TWh, la geotérmica 96, 878 GWh y la energía marina 957 GWh (IRENA, 2025).

Como se pudo observar en las figuras anteriores (Figura 7 y 8), la producción de electricidad a partir de energía geotérmica a pesar de ser la fuente con mayor CUF, es mucho menor en comparación con las otras tecnologías renovables (Figura 9) En la actualidad, solamente 35 países en el mundo generan electricidad en plantas geotérmicas. La Figura 10 muestra los 10 países con mayor capacidad instalada de energía geotérmica en el mundo (Think GeoEnergy, 2025).

En este sentido, Estados Unidos es el país líder en energía geotérmica, con una capacidad instalada hasta el 2024 de 3, 937 MW, seguido por Indonesia (2, 653 MW), Filipinas (1, 984 MW), Turquía (1, 734 MW), Nueva Zelanda (1, 207 MW), quienes conforman al conocido “Club de 1 GW”. Continuando con el ranking mundial, países como Kenia (985 MW), México (976 MW), Italia (916 MW), Islandia (786 MW) y Japón (601 MW) completan el top 10 de países con mayor capacidad instalada. Para finalizar, se puede resaltar que los restantes 25 países en conjunto aportan 1, 094 MW de capacidad instalada (Think GeoEnergy, 2025).

El crecimiento de la energía geotérmica visto desde la totalidad de la producción global de energía es pequeño, pero estable. De acuerdo con datos reportados por (Gutiérrez-Negrín, 2024) la capacidad instalada correspondiente al periodo de 1980 a 2023 tuvo un incremento de aproximado de 7.7 veces, pasando de 2,110 MW a 16, 318 MW, respectivamente. En tanto que la generación de electricidad creció 7.4 veces, pasando de un estimado de 13, 100 GWh en 1980 a 96, 552 GWh en 2023 (Bertani, 2015; Hutterer, 2020). Gutiérrez-Negrín (2024) señala que, a pesar de la modesta contribución a la generación global de energía, la energía geotérmica es una de las principales fuentes productoras en ciertos países, con un aporte mayor al 10 % de su respectiva demanda energética. Estos países son Kenia con 45 %, Islandia con un 33%, El Salvador, con casi el 25% de la producción, y Nueva Zelanda, Nicaragua, Costa Rica y Filipinas con una contribución entre el 10 y el 20 %.

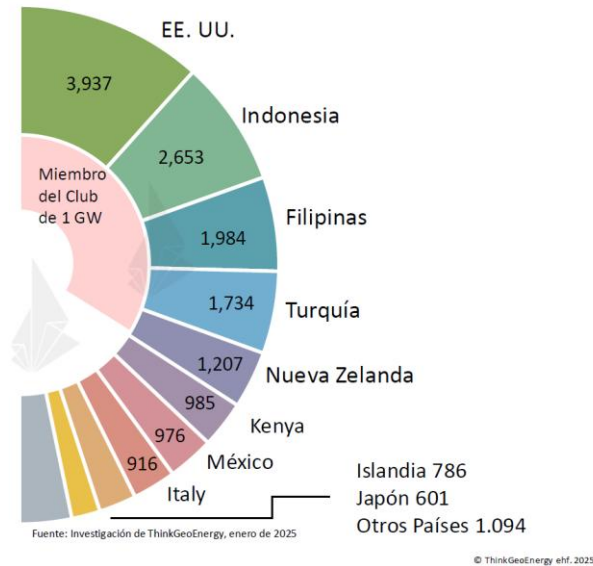


Figura 10. Gráfica de los 10 países líderes en energía geotérmica por capacidad instalada (MWe). Tomado de Think GeoEnergy, (2025).

En lo que respecta a los usos directos, la energía geotérmica satisface el 1% de la demanda global de calor en redes de calefacción. De este porcentaje de contribución, más del 60 % del calor geotérmico (1.1 exajoules) es usado en edificios residenciales y comerciales mediante bombas de calor. El uso de la energía geotérmica en edificios también incluye el consumo en el sector turístico y de bienestar, por ejemplo, en aguas termales (International Energy Agency, IEA, 2024). Se puede concluir que, la energía geotérmica tiene un fuerte impacto en la demanda energética mundial, tanto para la generación de electricidad como para el aprovechamiento directo mediante sus diversas aplicaciones. Por tal motivo, es que a continuación se discutirá las implicaciones de esta energía en el contexto nacional, así como sus formas de aprovechamiento para las condiciones climáticas y necesidades del país.

2.3.1 Energía geotérmica en México

México es un territorio rico en recursos energéticos tanto de origen fósil como en recursos renovables. En este último sentido, destaca el potencial de la energía geotérmica que coloca a nuestro país en el séptimo lugar a nivel mundial en aprovechamiento de esta energía (Figura 10). En el portafolio energético nacional, las centrales geotermoeléctricas mexicanas representan el 1.1% de la capacidad instalada reportada hasta el 2021 (SENER, 2022). Por otro lado, la geotermia constituye el 3.6 % de la capacidad instalada de energías renovables (SENER, 2022: Ver Figuras. 11 y 12). En este contexto, actualmente se cuenta con una capacidad total de 976 MW distribuidos en cinco campos geotérmicos: (i) Cerro Prieto, Baja California (570 MW); (ii) Los

Azufres, Michoacán (275 MW); (iii) Tres Vírgenes, Baja California Sur (10 MW); (iv) Los Humeros, Puebla (120.7 MW) y (v) Domo San Pedro, Nayarit (26.1 MW). En conjunto estos campos geotérmicos generaron 4, 243 GWh netos de electricidad, el 1.31 % de generación para el año 2021, (Gutiérrez-Negrin et al., 2023).

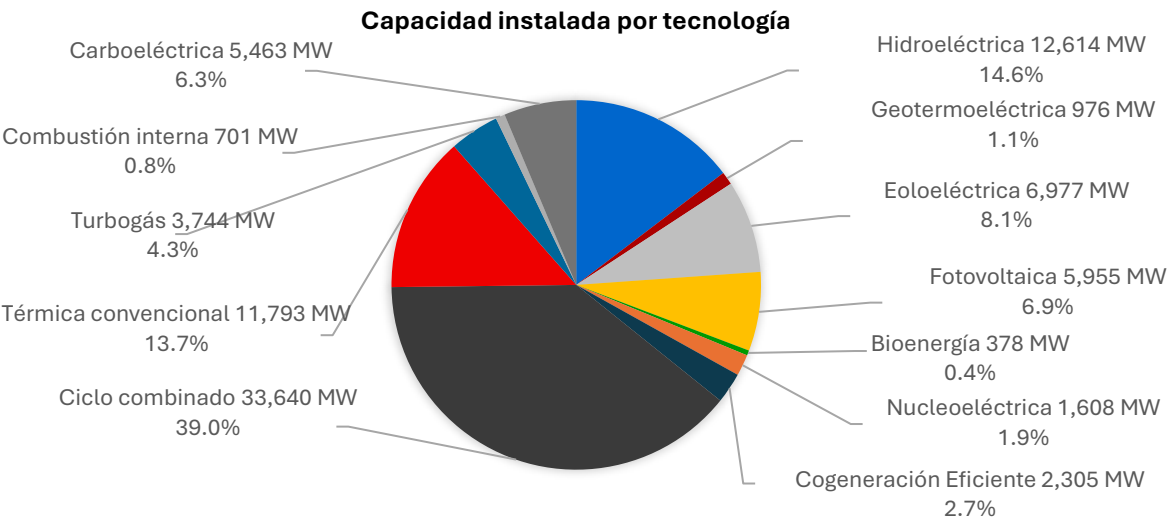


Figura 11. Gráfica nacional de la capacidad instalada por tecnología (MW) reportada hasta el 31 de diciembre de 2021. Datos tomados de Sener (2022).

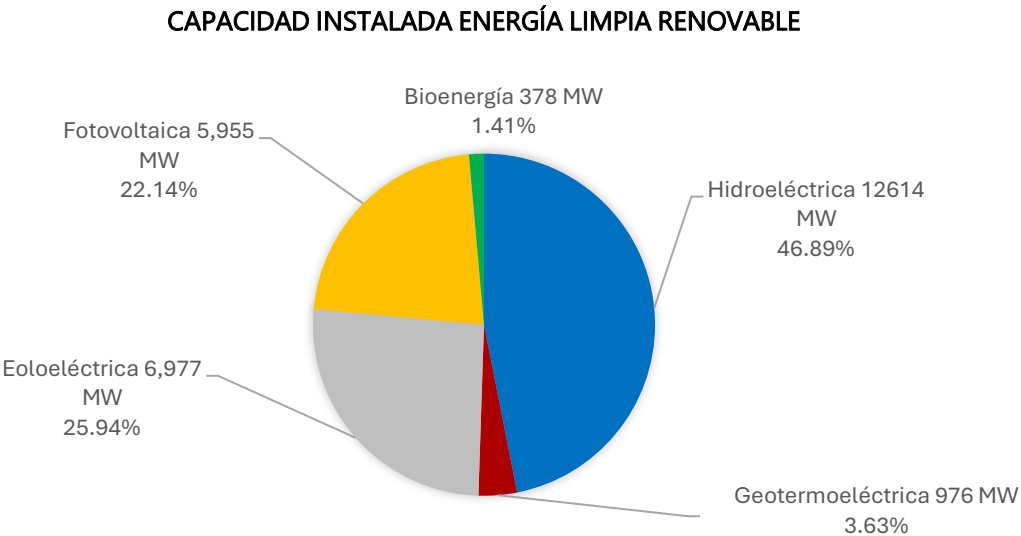


Figura 12. Gráfica de la capacidad instalada del total de fuentes de energía renovable en México reportada hasta el 31 de diciembre de 2021. Datos tomados de Sener (2022).

En cuanto a la utilización directa de los recursos geotérmicos en México, esta se limita principalmente a instalaciones balneológicas y de natación con fines recreativos y terapéuticos, si bien existen proyectos financiados tanto por el sector público como privado, de plantas de procesamiento de alimentos (ver Tabla 3), aún se requiere diversificar las aplicaciones para el aprovechamiento del calor interno de la tierra (Gutiérrez-Negrin et al., 2023).

Tabla 3. Resumen de proyectos de usos directos en México. Tomado de (Gutiérrez-Negrin et al., 2023).

Uso directo		Capacidad instalada total (MWt)	Energía total (TJ/año)		Número de instalaciones	Notas
			Producida	Utilizada		
Procesamiento de alimentos y agricultura		0.526	16.36	16.36	2	Deshidratador Geotérmico de Alimentos de Nayarit S.A.P.I. de C.V Deshidratador Geotérmico de Alimentos (DEA) UNAM
Calor en procesos industriales		0	0	0	0	
Salud, recreación y turismo		152.922	4099.55	4099.55	*Se desconoce	*Se reportan instalaciones en 18 estados
Climatización de edificios		0.213	3.63	3.63	4	
Otros usos		0	0	0	0	
Total		153.398	4119.53	4119.53		

La evolución en la utilización de los recursos geotérmicos en México se ha mantenido sin cambios importantes desde el reporte de Gutiérrez-Negrin et al. (2020), hasta su más reciente trabajo (Gutiérrez-Negrin et al., 2023). No obstante, el potencial de los recursos geotérmicos en México es prometedor tomando en consideración la abundancia de flujo de calor consecuencia del contexto geológico (por ejemplo, límites de placas) favorable para la ocurrencia de provincias geotérmicas importantes (Prol-Ledesma & Morán-Zenteno, 2019). Un claro ejemplo de área prometedora es la provincia geotérmica del Cinturón Volcánico Mexicano, que alberga cuatro de los cinco campos geotérmicos en explotación. Estudios exploratorios enfocados al análisis del potencial geotérmico han reportado que en México aún se encuentran disponibles y susceptibles de ser aprovechables hasta 2500 MWe, provenientes de áreas promisorias con temperaturas ≥ 150 °C (Gutiérrez-Negrin, 2012; Gutiérrez-Negrin et al., 2020). Además, se conocen cerca de 2332 manifestaciones hidrotermales con temperaturas de hasta 40 °C distribuidas en 27 estados

y finalmente, 276 manifestaciones con un rango de temperatura entre 60 a 180 °C (Gómez Arias & González Fernández, 2017; Iglesias & Torres, 2003; Ruiz et al., 2015; Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010)

De acuerdo con Hernández-Ochoa, (2020) otro gran potencial son los sistemas de roca seca caliente, los cuales mediante la implementación de tecnología de EGS, tienen un potencial calculado de 2300 GWe. Además, concluyeron que con un factor de recuperación del 2 % y a profundidades de entre 3 a 7 km sería posible la instalación de aproximadamente 47,000 MWe de capacidad. Con estos datos, podemos concluir que el potencial de la energía geotérmica en México es muy alto, aún sin mencionar los recursos hidrotermales geotérmicos marinos (Suárez-Arriaga et al., 2014) y los relacionados a pozos petroleros, que sumarían un gran potencial geotérmico. Sin embargo, el desarrollo de proyectos es menor en comparación con otras fuentes de energía por factores como el alto riesgo económico y técnico en las etapas iniciales de exploración.

2.4 Elementos de Tierras Raras

Como ya se ha discutido en el desarrollo del presente trabajo de tesis, son los lantánidos los principales elementos de Tierras Raras estudiados para la identificación de procesos de interacción agua-roca en diversos ambientes geológicos (Santos-Raga et al., 2021). Por tal motivo, es que se considera relevante discutir las principales propiedades fisicoquímicas de este grupo de elementos. Además, se esboza brevemente las características de los principales estándares de normalización implementados en la bibliografía geocientífica para evaluar la movilidad de los REE.

2.4.1 Propiedades fisicoquímicas

En el contexto químico, los elementos de la serie lantánida tienen una configuración electrónica distinguida por el llenado progresivo del orbital 4f. Este fenómeno conocido con contracción lantánida se produce porque, a medida que aumenta la carga nuclear y se van llenando los orbitales 4f, los electrones de dichos orbitales ejercen un pobre apantallamiento sobre la atracción nuclear, lo que provoca una disminución progresiva del radio iónico (McLennan & Taylor, 2012). Como consecuencia, los lantánidos presentan propiedades químicas muy similares, entre ellas radios iónicos cercanos y un estado de oxidación trivalente predominante, con excepciones para el Ce y el Eu, que pueden encontrarse como Ce^{4+} y como Eu^{2+} bajo condiciones específicas de óxido-reducción.

Químicamente, los REE son elementos altamente electropositivos, formando principalmente compuestos iónicos (Hoshino et al., 2016). En cuanto a su mineralogía, pueden encontrarse en óxidos, haluros, carbonatos, fosfatos, silicatos, boratos, arseniatos y sulfatos (Clark, 1984). Se han descrito más de 200 minerales con contenido significativo de REE, presentes en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Hoshino et al., 2016). Además, los REE poseen propiedades ópticas, magnéticas y electrónicas únicas, derivadas de las transiciones electrónicas entre niveles de energía en el orbital 4f (Wang, 2023). En cuanto a sus propiedades ópticas, la diferencia de energía entre niveles determina la longitud de onda de la luz absorbida o emitida: a mayor diferencia de energía, menor es la longitud de onda. Los REE con transiciones f-f se caracterizan por largos tiempos de vida de fluorescencia, lo que permite su aplicación en pantallas, sistemas de iluminación y dispositivos emisores en el infrarrojo cercano, útiles en comunicaciones ópticas y medición de distancias. En cambio, las transiciones f-d presentan bandas espectrales amplias, alta intensidad y tiempos de vida cortos, características aprovechadas en la fabricación de cristales centelleadores y láseres sintonizables (Wang, 2023).

Las propiedades magnéticas de los REE se deben al momento angular de sus electrones, dando lugar a un momento angular mucho mayor al de los electrones de los elementos de transición de la capa 3d (Ni, Fe y Co). Sin embargo, la temperatura de Curie de los REE es muy baja, excepto para el Gd (293 K), por lo que los REE tienen un comportamiento paramagnético a temperatura ambiente. En relación con estas características magnéticas, se fabrican aleaciones con metales de transición de la capa 3d. De esta manera se aprovecha la fuerte anisotropía magnética cristalina de los REE, creando imanes permanentes con temperaturas de Curie de hasta 700°C sin perder su magnetización (Sáez Puche et al., 2000). Estas condiciones son indispensables para imanes permanentes utilizados como componentes de motores de autos eléctricos o en turbinas eólicas.

2.5 Estándares de normalización de patrones de Tierras Raras

Una cuestión para tomar en cuenta al trabajar con abundancias elementales en geoquímica es la regla de Oddo-Harkins (Harkins, 1916). Al graficar las concentraciones de REE de una muestra en escala logarítmica, en función de su número atómico, se obtiene un patrón en zigzag. Esto se explica porque, en las rocas de la corteza terrestre, los elementos de número atómico par son más abundantes que sus elementos vecinos impares (Giménez & Ordóñez, 2020). La forma característica de estos patrones impide visualizar cambios sutiles en las concentraciones que pueden aportar información de la evolución geoquímica de la muestra estudiada. Por ejemplo,

las concentraciones de REE en las muestras de roca son muy variables y por consecuencia, la interpretación y comparación gráfica de sus abundancias tiene un grado de dificultad elevado (McLennan & Taylor, 2012). Por ello es necesario el uso de un estándar de referencia para el proceso de normalización, con el cual se logra suavizar el patrón de REE y permite observar los enriquecimientos y empobrecimientos con base en la referencia establecida. En este sentido, los trabajos pioneros que propusieron la normalización de patrones de REE a un set de valores estándar fueron publicados por (Coryell et al., 1963; Masuda, 1962), quienes propusieron la normalización de las concentraciones de REE respecto a condritas. Este proceso se hace mediante una relación entre las concentraciones de la muestra analizada y los valores de la condrita, graficadas en escala logarítmica en función de su número atómico. Este método tiene las siguientes ventajas: (i) elimina el efecto Oddo-Harkins, produciendo patrones suavizados, (ii) permite la visualización de los enriquecimientos o empobrecimientos con respecto a sus elementos vecinos y, (iii) facilita la comparación de abundancias entre diferentes muestras (Taylor & McLennan, 1988).

En el presente trabajo de tesis, y con base en una revisión sistemática y exhaustiva de la literatura, se encontraron diversos estándares de referencia utilizados en el proceso de normalización de la concentración de REE en muestras de sistemas geotérmicos. Entre estas destacan: (i) meteoritos condriticos; (ii) valores promedio de la corteza superior; (iii) valores calculados del Manto Primitivo, y (iv) valores promedio de lutitas. Una breve descripción de estos estándares se discute a continuación.

2.5.1 Normalización a condrita

Las condritas son un tipo de meteoritos, los cuales son cuerpos sólidos de material cósmico que penetran la atmósfera y alcanzan la superficie de la Tierra (Rubin & Grossman, 2010). Su nombre hace referencia a los cóndrulos (esférulas ígneas de composición variada), por ejemplo, de cristales de olivino y piroxeno con inclusiones de metales, óxidos y sulfuros (Martínez-Jiménez & Trigo-Rodríguez, 2013). De acuerdo con su composición química, isotópica, mineralogía y petrología, las condritas se clasifican en tres diferentes grupos: (i) condritas carbonáceas, de las cuales algunas son ricas en carbono y conservan elementos volátiles (p.ej. Condrita CI o tipo Ivuna); (ii) condritas ordinarias, que se clasifican de acuerdo con su proporción de hierro metálico y; (iii) las condritas de enstatita caracterizadas por sus nódulos de Fe y Mg (Krot et al., 2014).

De esta clasificación, las condritas carbonáceas, son las que cuentan con una mayor proporción de elementos volátiles, por lo que se asume que su composición química es cercana a la composición química inicial del Sistema Solar. Por otro lado, las condritas ordinarias y de

enstatita a pesar de contar con una menor presencia de elementos volátiles, considerándose los meteoritos menos representativos de la composición inicial del sistema solar, no reflejan procesos de fraccionamiento en su formación (McLennan & Taylor, 2012). Debido a estas características geoquímicas, es que los valores de condritas pueden ser utilizados como estándares de normalización de REE, lo que permite la visualización de anomalías geoquímicas (enriquecimientos y empobrecimientos) en muestras de rocas. Actualmente no existe un consenso en la literatura científica sobre valores estándar de condrita que deben de utilizarse en el proceso de normalización, por lo que existen diversos estudios académicos que reportan valores de condritas medidos bajo diversas metodologías, algunos de estos trabajos son: (Anders & Grevesse, 1989; Boynton, 1984; Evensen et al., 1978; Haskin et al., 1968; Henderson, 1984; Masuda et al., 1973; McDonough & Sun, 1995; McLennan, 1989; Nakamura, 1974; Sun & McDonough, 1989; Taylor & McLennan, 1985; Taylor et al., 1981; y Wakita et al., 1971).

En adición, existen otros estándares de normalización que reflejan la composición de la corteza terrestre, usualmente lutitas, que se describirán más adelante y, en el caso de estudios específicos en petrología y procesos de intemperización o alteración hidrotermal, se usa la composición de la roca parental o roca menos alterada como estándar de normalización (McLennan & Taylor, 2012).

2.5.2 Otros estándares de normalización

Estudios enfocados a la determinación de la composición química de la corteza terrestre (Haskin et al., 1968; Rudnick & Gao, 2013; Taylor, 1964; Taylor & McLennan, 1985) utilizaron la idea generalmente aceptada de que las rocas sedimentarias clásticas, como las lutitas, tienen una composición química representativa de la corteza superior. Los procesos sedimentarios actúan como un muestreador de las rocas expuestas en superficie, mezclando sus sedimentos. Con esta premisa, (Taylor, 1964) comparó las abundancias de REE en lutitas y las abundancias de una mezcla 1:1 de rocas basálticas y rocas graníticas (como muestra representativa de la corteza terrestre), y encontró similitud entre ambos patrones de REE. Es así como se confirmó que elementos como los REE, Th y Sc conservan, a pesar de los procesos sedimentarios, una relación directa de sus abundancias en lutitas, con las abundancias de la corteza superior (Taylor & McLennan, 1985). Los trabajos previamente mencionados dieron como resultado sets de valores elementales utilizados como estándares para la normalización de patrones de REE. Entre los más destacados se encuentran el NASC (*North America Shale Composite*: (Gromet et al.,

1984; Haskin et al., 1968) con valores calculados a partir de un *composite*² de lutitas paleozoicas de Norteamérica y Europa. Por otro lado, el PAAS (*Post Archean Australian Shales*: Taylor & McLennan, 1985) es un promedio de valores de REE en lutitas. A diferencia del NASC, los valores del PAAS fueron resultado del promedio de diferentes análisis de muestras de lutitas. Con esta metodología se busca la representatividad de los valores de concentración (Taylor & McLennan, 1985). Estudios de la procedencia y origen de sedimentos, rocas sedimentarias, suelos, cuerpos de agua superficiales, entre otros utilizan los estándares basados en valores de lutitas, que representan mejor las abundancias promedio de REE en la corteza continental superior, donde ocurren los procesos sedimentarios e hidrogeológicos (Rétif et al., 2023).

Además, otro estándar comúnmente utilizado para la normalización de valores de REE, son los valores promedio de la corteza continental superior (UCC, *Upper Continental Crust*). Estos valores de referencia se estiman a partir de: (i) un muestreo de larga escala de rocas expuestas en superficie y (ii) la utilización de valores promedio de rocas siliciclásticas terrígenas (Rudnick & Gao, 2013; Taylor & McLennan, 1985). Por último, los valores del manto primitivo, calculados a partir de abundancias de condritas tipo CI, son útiles en la investigación de la evolución temporal de la concentración de elementos litófilos, paleoprocesos continentales a gran escala y procesos de diferenciación magmática a escalas de tiempo geológico (McDonough & Sun, 1995).

2.6 Geoquimiometría

La geoquimiometría es una disciplina derivada de la integración de la geoquímica con herramientas estadísticas, matemáticas y computacionales, con el objetivo de analizar, interpretar y modelar grandes conjuntos de datos geoquímicos (Verma, 2019). Su aplicación permite identificar patrones geoquímicos, asociaciones elementales, procesos de fraccionamiento y anomalías geoquímicas.

Debido a la naturaleza de los sistemas geológicos, la geoquimiometría se ha convertido en una herramienta fundamental para interpretar procesos geoquímicos complejos y reducir la incertidumbre en los estudios de exploración y de caracterización geológica. Las bases de datos geoquímicas presentan características particulares que dificultan su tratamiento estadístico convencional. Entre estas destacan su naturaleza composicional, la presencia de valores atípicos, la dependencia de los límites de detección de las técnicas analíticas y, con frecuencia,

² Tipo de muestra que se obtiene de combinar múltiples muestras discretas en el tiempo o en el espacio y homogeneizarlas completamente. El muestreo compuesto puede mejorar la representación espacial o temporal de los datos al reducir considerablemente el número de muestras analizadas y la variabilidad local, espacial o temporal (Cicchella et al., 2013)

distribuciones no normales de los datos (Reimann et al., 2008) Debido a ello, resulta indispensable aplicar procedimientos estadísticos específicos antes de realizar análisis interpretativo. En este contexto, la geoquimiometría permite abordar estas limitaciones mediante metodologías univariadas, bivariadas o multivariadas, lo que proporciona interpretaciones más consistentes y confiables de los procesos geoquímicos involucrados (Filzmoser et al., 2009). Previo a la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas, es necesario realizar un tratamiento adecuado de los datos geoquímicos, que incluya la identificación y evaluación de valores atípicos, el manejo de datos censurados y la aplicación de transformaciones estadísticas apropiadas (Reimann et al., 2008).

Finalmente, la integración de metodologías geoquimiométricas con información geológica, mineralógica y geoquímica permite reducir la incertidumbre asociada a la exploración de recursos naturales y favorece una toma de decisiones más informada (Verma, 2012).

No obstante, la confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la calidad de los datos analizados, del tratamiento estadístico previo y de la correcta interpretación geocientífica. Por ello, la geoquimiometría debe considerarse una herramienta complementaria del conocimiento geológico y geoquímico (Reimann et al., 2008).

Capítulo 3

Metodología de trabajo

3.1 Descripción general de la metodología de trabajo

La presente investigación desarrolló una metodología orientada a la construcción, homogenización y análisis de bases de datos geoquímicas de REE en sistemas geotérmicos. Como eje central del trabajo se integraron tres bases de datos complementarias: (i) una base de datos bibliográfica de estudios sobre REE en sistemas geotérmicos (BDB_REE); (ii) una base de datos geoquímica de concentraciones de REE en muestras de roca provenientes de sistemas geotérmicos alrededor del mundo (BDG_REE); y (iii) una base de datos de estándares de normalización reportados en la literatura especializada (BDG_NORM). Estas bases de datos constituyeron el insumo principal para la normalización, el análisis geoquimiométrico y la posterior interpretación de los patrones geoquímicos de REE.

Con este propósito, se diseñó una metodología estructurada en tres etapas principales (Figura 13): (i) análisis bibliométrico de la literatura científica; (ii) revisión sistemática, selección de estudios y compilación de la información geoquímica; y (iii) normalización y análisis geoquimiométrico de la BDG_REE. La integración de estas etapas permitió construir una base de datos geoquímica homogénea y metodológicamente consistente para el análisis comparativo de patrones de REE en distintos sistemas geotérmicos.

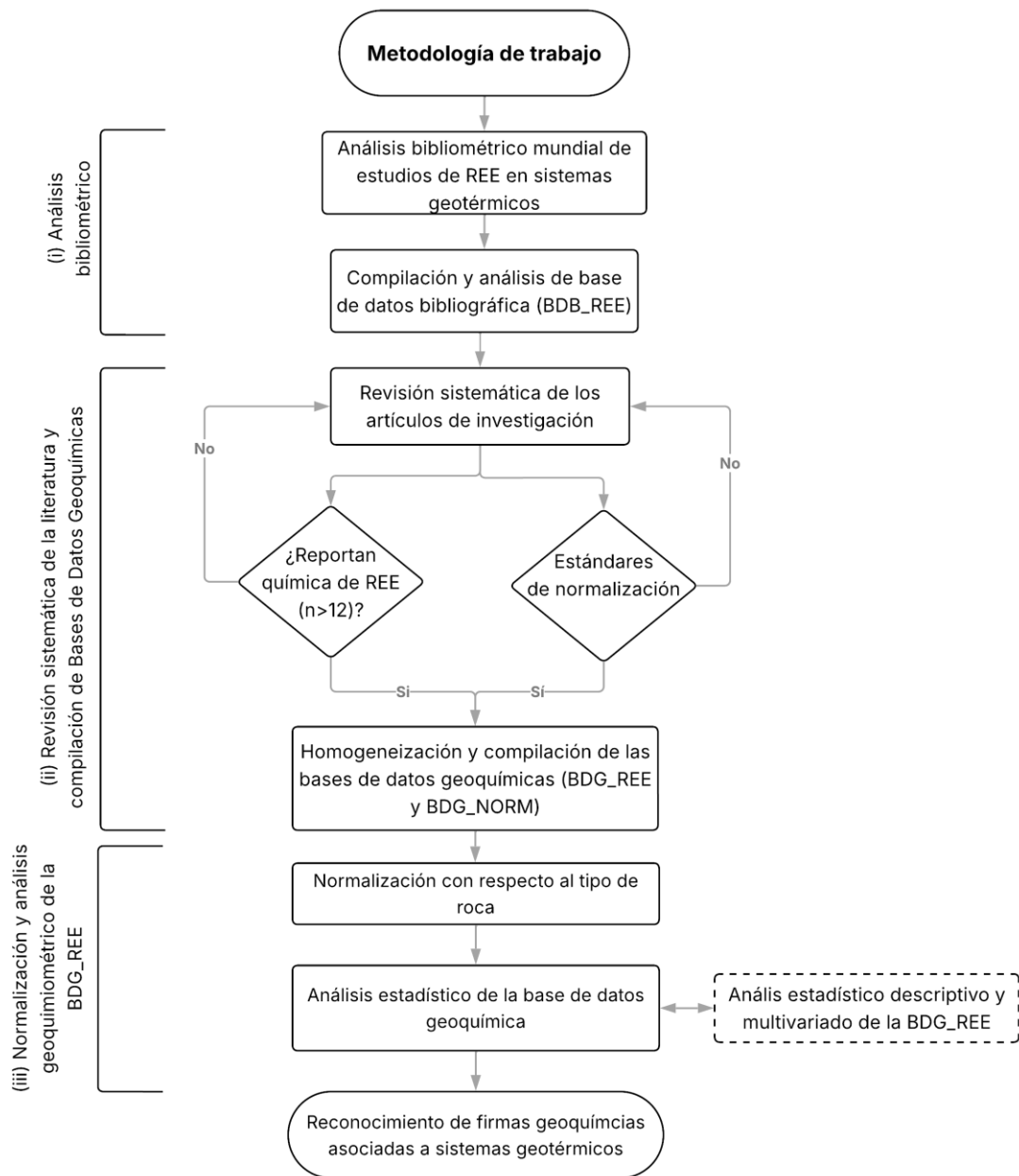


Figura 13. Diagrama de flujo de la metodología general implementada en el presente trabajo de tesis. El flujo de trabajo se subdivide en tres etapas principales: (i) análisis bibliométrico de la literatura; (ii) revisión sistemática, compilación y homogenización de bases de datos bibliográficas y geoquímicas; y (iii) normalización y análisis geoquimiométrico de la BDG_REE.

A continuación, se describe con detalle las etapas metodológicas propuestas para alcanzar los objetivos de investigación propuestos.

3.2 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico tuvo como objetivo identificar el estado del conocimiento sobre la geoquímica de elementos de REE en sistemas geotérmicos, así como las principales tendencias de investigación temporal, redes de colaboración y áreas emergentes de investigación. Asimismo, esta etapa permitió construir la BDB_REE, la cual sirvió como punto de partida para la revisión sistemática y la compilación de la información geoquímica.

La recuperación de la literatura científica se realizó mediante una estrategia de búsqueda sistemática basada en herramientas de minería de texto, la metodología PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcomes*) y operadores booleanos. Estas herramientas permitieron definir una estrategia de búsqueda reproducible, orientada a maximizar la recuperación de estudios relevantes y minimizar sesgos durante la selección de la literatura. Las búsquedas se realizaron en las bases de datos bibliográficas Web of Science (WoS) y Scopus, seleccionadas por su amplia cobertura internacional de publicaciones científicas y referencias bibliográficas (Goodman, 2007; Vera-Baceta et al., 2019). Mientras WoS proporciona una cobertura de revistas de alto impacto y congresos científicos, Scopus incorpora además una mayor diversidad de fuentes, incluyendo libros y actas de congresos. El uso combinado de ambas bases de datos permitió obtener un conjunto de información bibliográfica amplio y representativo del tema de investigación.

El análisis bibliométrico se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Yáñez-Dávila et al. (2023), la cual comprende dos etapas principales: (i) minería de datos y (ii) análisis bibliométrico de desempeño e intelectual (Figura 14). La primera etapa incluyó la recopilación, depuración y organización de los registros bibliográficos, mientras que la segunda consistió en la evaluación cuantitativa de la producción científica mediante indicadores bibliométricos. Con base en este procedimiento se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuántos estudios reportan análisis cuantitativos de REE en muestras de roca para la caracterización de sistemas geotérmicos?

¿Cuáles son las tendencias temporales y espaciales de las investigaciones sobre REE en sistemas geotérmicos?

¿Qué áreas temáticas concentran el estudio de los REE como trazadores naturales de procesos de interacción agua-roca?

¿Cuáles son las principales líneas de investigación emergentes dentro de este campo?

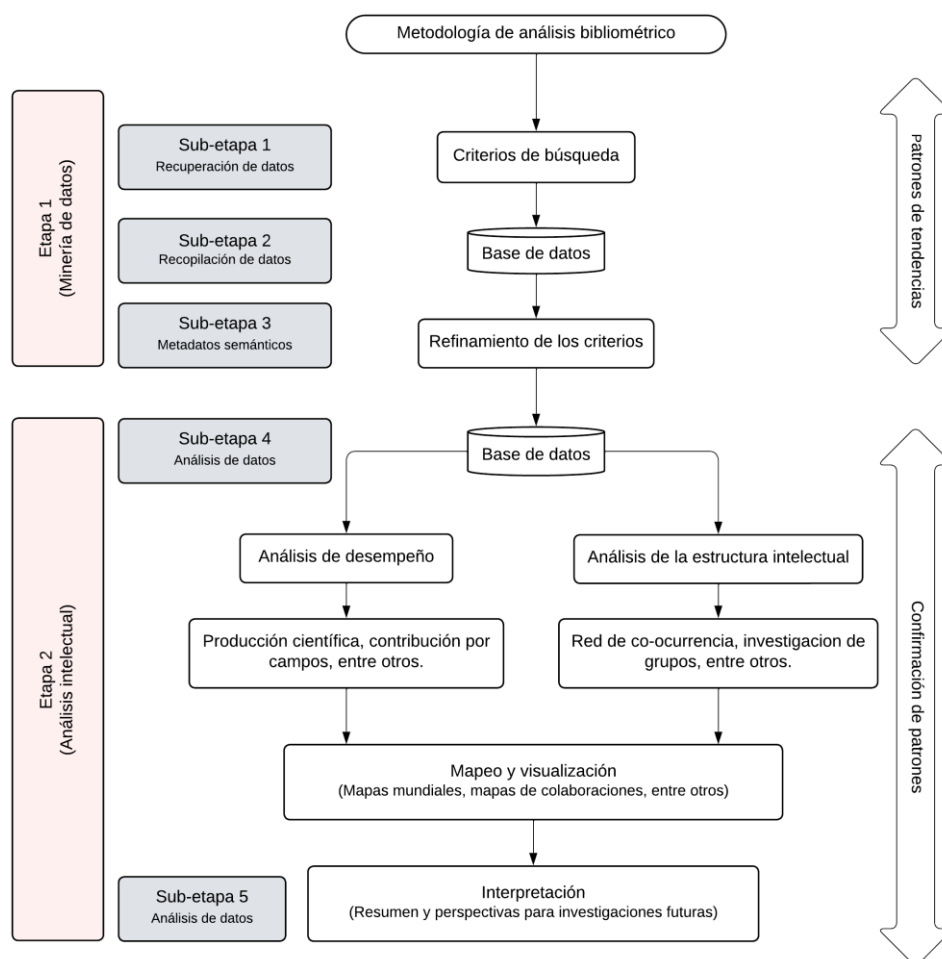


Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología bibliométrica implementada para el análisis de la literatura científica y creación de la base de datos bibliográfica. Tomado de Yáñez-Dávila et al., (2023).

3.3 Revisión sistemática de la literatura, compilación y descripción de BDG_REE y BDG_NORM

Una vez construida la BDB_REE, se realizó una revisión sistemática de todos los documentos recopilados con el propósito de identificar aquellos estudios que reportaran concentraciones cuantitativas de REE en muestras de roca de sistemas geotérmicos. Como criterios de exclusión se descartaron los artículos cuyo texto completo no estuvo disponible, aquellos publicados en idiomas distintos al inglés o español y los estudios que únicamente reportaban concentraciones

de REE en fluidos geotérmicos. Asimismo, se excluyeron las muestras que reportaban menos de doce REE, con el fin de garantizar una adecuada representatividad de los patrones geoquímicos obtenidos durante el proceso de normalización. La compilación de la información geoquímica se realizó de manera manual mediante la revisión individual de cada publicación seleccionada. Para cada muestra se registró la siguiente información: autor, año de publicación, revista, país, sistema geotérmico, ambiente geológico, tipo de roca, identificación de la muestra, técnica analítica empleada, estándar de normalización utilizado, concentraciones de REE (ppm) y concentraciones de elementos mayores (Wt%). Toda esta información fue integrada en la base de datos geoquímica BDG_REE.

Con el propósito de asegurar la consistencia del conjunto de datos, se realizó un proceso de homogenización de las unidades de concentración reportadas en la literatura. Las concentraciones originalmente expresadas en distintas unidades (por ejemplo, ppb, ppt o mol/kg) fueron convertidas a una unidad común (ppm), permitiendo la comparación directa entre estudios.

Paralelamente, se compiló una segunda base de datos geoquímicos (BDG_NORM), destinada a documentar los diferentes estándares de normalización empleados en la literatura. Para cada referencia se registró el autor, año de publicación, tipo de estándar de normalización y las concentraciones de REE correspondientes al estándar citado en la fuente original. La construcción de esta base permitió evaluar la heterogeneidad de los criterios de normalización utilizados en estudios previos y fundamentar la selección del estándar adoptado en esta investigación. Como parte de esta etapa se realizó además una caracterización descriptiva de la BDG_REE. Para las variables cualitativas se describieron la distribución geográfica de los sistemas geotérmicos, los tipos de roca, los ambientes geológicos, los tipos de sistemas geotérmicos y las técnicas analíticas empleadas. Para las variables cuantitativas se calcularon estadísticas descriptivas básicas con el propósito de caracterizar la variabilidad de las concentraciones de REE compiladas en la base de datos.

3.4 Normalización y análisis geoquimiométrico de la BDG_REE

La diversidad de estándares de normalización identificados en la BDG_NORM motivó la realización de un análisis de frecuencia para determinar cuáles habían sido los referentes geoquímicos más utilizados en la literatura especializada (condrita, MP, PAAS, NASC, UCC). Además de la frecuencia de uso, la selección del estándar de normalización consideró la consistencia metodológica y la disponibilidad de valores de referencia ampliamente aceptados

para la comparación de patrones geoquímicos. Una vez seleccionado el estándar de normalización, las concentraciones de REE de cada muestra fueron normalizadas siguiendo el procedimiento clásico propuesto por Coryell et al. (1963), mediante la relación entre la concentración del elemento en la muestra y su correspondiente concentración en el estándar de referencia:

$$REE_N = \frac{REE_{(muestra)}}{REE_{(estándar)}}$$

Este procedimiento permitió obtener una base de datos completamente normalizada, apta para la comparación de patrones geoquímicos entre muestras procedentes de distintos sistemas geotérmicos. A partir de las concentraciones normalizadas, se calcularon cuatro parámetros geoquímicos clave para cada muestra:

ΣREE : suma total de los catorce elementos, indicador del enriquecimiento absoluto.

La/Yb_N : cociente de La normalizado entre Yb normalizado, que refleja la pendiente del patrón y el grado de fraccionamiento entre LREE y HREE.

Eu/Eu^* : anomalía de europio, definida como $\frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \cdot Gd_N}}$.

Ce/Ce^* : anomalía de cerio, calculada como $\frac{Ce_N}{\sqrt{La_N \cdot Pr_N}}$.

Con el fin de identificar outliers, se aplicó el método del rango intercuartílico (IQR) de forma independiente para cada uno de los cuatro parámetros. Este enfoque no paramétrico define como valor atípico toda observación que se ubique por debajo del primer cuartil (Q1) menos 1.5 veces el IQR, o por encima del tercer cuartil (Q3) más 1.5 veces el IQR. Una muestra fue clasificada como outlier si presentaba al menos un parámetro fuera de estos límites. El método IQR es robusto y no asume una distribución normal, lo que lo hace adecuado para conjuntos de datos geoquímicos con distribuciones no normales.

Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación de Spearman entre las concentraciones normalizadas de los catorce elementos REE, con el objetivo de explorar correlaciones entre variables. La matriz de correlación se calculó a partir de la base de datos normalizada completa y se representó mediante un mapa de calor (*heatmap*).

Finalmente, los valores normalizados a condrita de las muestras de la BDG_REE y las muestras clasificadas como outliers se representaron mediante diagramas tipo spider, construidos en

escala logarítmica y ordenados según el número atómico creciente de los REE. Dado el elevado número de muestras disponibles, se optó por agrupar los diagramas por tipo de roca en el caso de las muestras originales, mientras que para los outliers se graficaron todas las rocas ígneas en conjunto. Para el caso de las muestras por tipo de roca, se realizaron dos gráficas, la primera mostrando la distribución individual y la segunda graficando el valor medio más/menos su desviación estándar. Para el caso de las muestras consideradas outliers, superpusieron las curvas de todas las muestras, junto con la curva de la mediana del grupo como referencia de la tendencia general. Esta estrategia permitió comparar sistemáticamente los patrones normalizados frente al comportamiento medio, facilitando la identificación de subgrupos y contribuyendo a la interpretación de procesos geológicos responsables de las desviaciones. Todos los cálculos y representaciones gráficas se realizaron en Python, utilizando las librerías *pandas*, *numpy*, *scipy*, *matplotlib* y *seaborn*. La interpretación de los patrones obtenidos se presenta y discute en el capítulo de Resultados.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Resultados del análisis bibliométrico

Siguiendo el marco metodológico descrito en la Figura 14, la primera etapa del AB consistió en definir el período de análisis y seleccionar las palabras clave supervisadas más relevantes para describir el tema de investigación en estudio. En la Tabla 4 se pueden visualizar ejemplos de las diferentes búsquedas realizadas:

Tabla 4. Cadena de palabras claves y booleanos implementados en el proceso de búsquedas avanzadas en los repositorios bibliográficos internacionales de WoS y Scopus.

Base de datos	Búsqueda avanzada	No.
Scopus	TITLE-ABS-KEY (geotherm* OR geoenergy) AND TITLE-ABS-KEY (lanthanides OR "Rare-Earth-Elements" OR "Rare Earth Elements" OR ree OR rey OR reey) AND DOCTYPE (ar OR cp OR re)	909
	TITLE-ABS-KEY (geotherm* OR geoenergy OR "HOT SPRING*") AND TITLE-ABS-KEY (lanthanides OR "Rare-Earth-Elements" OR "Rare-EARTH Elements" OR "Rare Earth Elements" OR ree OR rey OR reey) AND TITLE-ABS-KEY ("water-rock interaction" OR "Water Rock Interaction" OR "Water/Rock Interaction" OR "fluid-rock interaction" OR "fluid Rock Interaction" OR "fluid/Rock Interaction" OR WRI OR experiments) AND SUBJAREA (eart) AND DOCTYPE (ar OR re)	109
	TITLE-ABS-KEY (geotherm* OR geoenergy) AND TITLE-ABS-KEY (lanthanides OR "Rare-Earth-Elements" OR "Rare Earth Elements" OR ree OR rey OR reey) AND TITLE-ABS-KEY (geochemistry OR "water-rock interaction" OR "Water Rock Interaction" OR "Water/Rock Interaction" OR wri OR experiments OR "Trace Elements" OR ligands OR eu OR europium OR ce OR cerium OR y OR yttrium)	706
WoS	ts=(geotherm* or geoenergy or "geothermal waters") and ts=(Lanthanides or "Rare Earth Elements" or REE)	835
	TS=(Lanthanides AND waters AND geothermal) or TS=(Rare earth elements AND geothermal AND waters) OR TS=("REE" AND geothermal AND waters) OR TS=(Rare earth elements AND Geochemistry AND waters AND geothermal) OR TS=("REE" AND Geochemistry AND waters AND geothermal) OR TS=(Rare earth elements AND Geothermal System AND waters) OR TS=("REE" AND Geothermal System AND waters) OR TS=(Rare earth elements AND Water-rock Interaction Experiment AND waters AND geothermal) OR TS=("REE" AND Water-rock Interaction Experiment AND Waters AND geothermal) OR TS=(Rare earth elements AND trace elements AND Waters AND geothermal) OR TS=("REE" AND trace elements AND Waters AND Geothermal) OR TS=(Rare earth elements AND ligands AND waters AND geothermal) OR TS=("REE" AND ligands AND Waters AND geothermal) AND KP=(geothermal fields OR geothermal system OR water-rock interaction experiment OR trace elements OR ligands OR europium OR Cerium) and AK=(geothermal fields OR geothermal system OR water-rock interaction experiment OR trace elements OR ligands OR europium OR Cerium) AND SU=(Mineralogy AND Geochemistry & Geophysics))	208
	ts=(geotherm* or geoenergy) and ts=(Lanthanides or "Rare-Earth Elements" or "Rare Earth Elements" or REE or REY) and ts=(Geochemistry or "water-rock interaction" or "water rock interaction" or wri or experiments or "trace elements" or ligands OR Eu or europium OR Ce or Cerium or Y or yttrium)	606

Estas palabras clave permitieron la rápida identificación, selección y clasificación de las publicaciones científicas más representativas reportadas durante el período (1974-2025). Para mejorar la precisión de la selección de palabras clave, se seleccionaron los cinco trabajos más representativos publicados en la literatura global: Haas et al. (1995); Keppler, (2017); Klimm et al., (2008); Lintjewas & Setiawan, (2018); Yongliang & Yusheng, (1991). Así, se diseñaron las siguientes búsquedas avanzadas, en las cuales se integraron los criterios de búsqueda para: (i) título, (ii) abstract y (iii) palabras clave e implementando el uso de booleanos³ para concatenarlos en una sola búsqueda:

Tabla 5. Integración de palabras claves para la determinación de las búsquedas avanzadas finales en los repositorios bibliográficos de WoS y Scopus.

Base de datos	Búsqueda avanzada	Año de búsqueda	Resultados
Scopus	TITLE-ABS-KEY (geotherm* OR geoenergy OR "HOT SPRING*") AND TITLE-ABS-KEY (lanthanides OR "Rare-Earth-Elements" OR "rare-earth elements" OR "Rare Earth Elements" OR ree OR rey OR reey) AND DOCTYPE (ar OR re)	2025	978
Web of Science	ts=(geotherm* OR geoenergy OR "HOT SPRING*") and ts=(lanthanides OR "Rare-Earth-Elements" OR "rare-earth elements" OR "Rare Earth Elements" OR ree OR rey OR reey)	2025	925

Como se observa en la Tabla 5, el uso de una mayor cantidad de criterios de búsqueda restringe el número de resultados en la búsqueda avanzada (Pullin & Stewart, 2006). Por ello, se eligieron las búsquedas avanzadas con mayor cantidad de resultados de estudios relacionados a geoquímica de REE en sistemas geotérmicos.

Una vez realizada la búsqueda avanzada, con ayuda del software especializado, RStudio y Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), se aplicó un merge de las colecciones bibliográficas obtenidas de WoS y Scopus que, al eliminar 645 duplicados, sumaron un total de 1258 artículos publicados hasta el 2026, como solo se consideraron años completos, se descartaron las investigaciones con fecha de publicación para el 2026, quedando la construcción de la BDB_REE, con un total de 1220 registros. Finalmente, se realizó una revisión manual de los

³ Los operadores booleanos forman la base de los conjuntos matemáticos y la lógica para la búsqueda en las bases de datos. Los operadores conectan sus palabras de búsqueda para estrechar o ampliar los resultados. Los tres operadores booleanos básicos son: AND, OR y NOT (Rendón Rojas, 2017).

resúmenes de cada artículo para elegir aquellos que reportaran datos de REE en rocas y fluidos de sistemas geotérmicos. El número de investigaciones que reportaron geoquímica de REE fue de un total de 281. De las 281 investigaciones, no se tuvo acceso a 15 artículos, 65 artículos solo reportaron concentraciones de REE en aguas u otros fluidos, 16 reportaron datos experimentales, 60 reportaron las concentraciones de REE asociadas a ambientes geológicos distintos a los sistemas geotérmicos, 10 artículos reportaron concentraciones en muestras orgánicas, 15 no reportaron los datos cuantitativos, 14 reportaron la concentración de menos de 12 REE y solo 77 reportaron más de 12 REE en rocas. El listado final de 77 artículos de investigación fueron el insumo para la BDG_REE.

4.1.1 Análisis de desempeño

En la segunda etapa del AB (Ver Figura 14), como parte del análisis de desempeño, se analizaron las tendencias temporales y espaciales en las publicaciones sobre estudios de REE en sistemas geotérmicos (BDB_REE con 1220 registros hasta 2025). La Figura 15 muestra la gráfica de la producción científica por año y la suma acumulativa de publicaciones en el periodo de tiempo analizado.

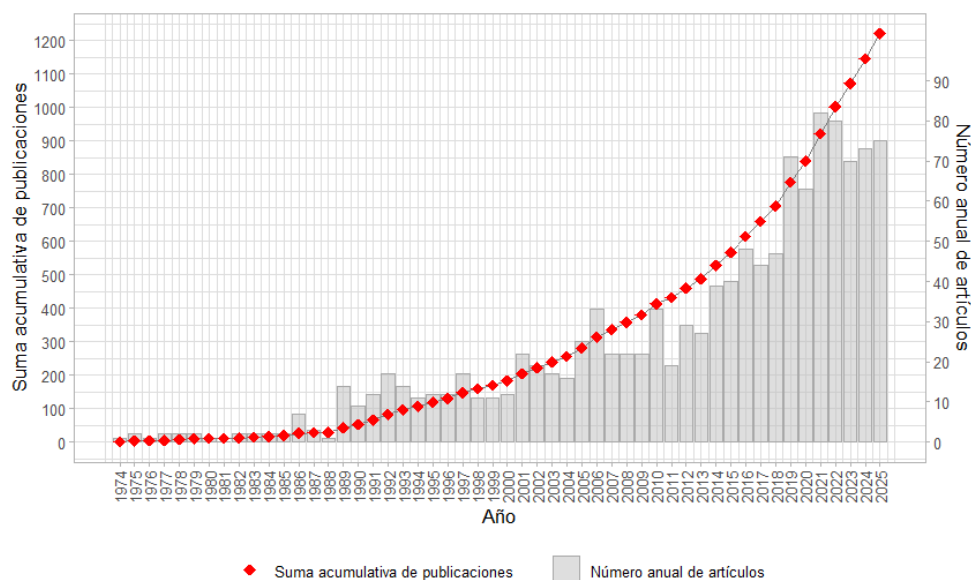


Figura 15. Gráfica de la producción científica anual y suma acumulativa sobre estudios de REE en sistemas geotérmicos en el periodo de 1974 a 2025.

Como se observa, el incremento en el interés sobre el tema se ve reflejado en el número de publicaciones por año, que, en la última década ha tenido un incremento notorio. La suma acumulativa da un total de 1220 trabajos publicados. Los países que más han contribuido a la

investigación de este tópico general (Tabla 6) son: China, Estados Unidos, Alemania, Australia y Japón, cabe destacar que las cifras por país se realizaron con base en la nacionalidad de las coautorías, por lo que una misma investigación, puede contabilizarse para diferentes países. La Figura 16 muestra el mapa de colaboración entre países con producción científica.

Tabla 6. Top ten de países con mayor número de artículos científicos publicados con respecto a la nacionalidad de la lista de personas coautoras.

País	Frecuencia
China	715
Estados Unidos	398
Alemania	234
Australia	207
Japón	176
Canadá	156
Reino Unido	153
Francia	151
Italia	138
Rusia	132
México	85

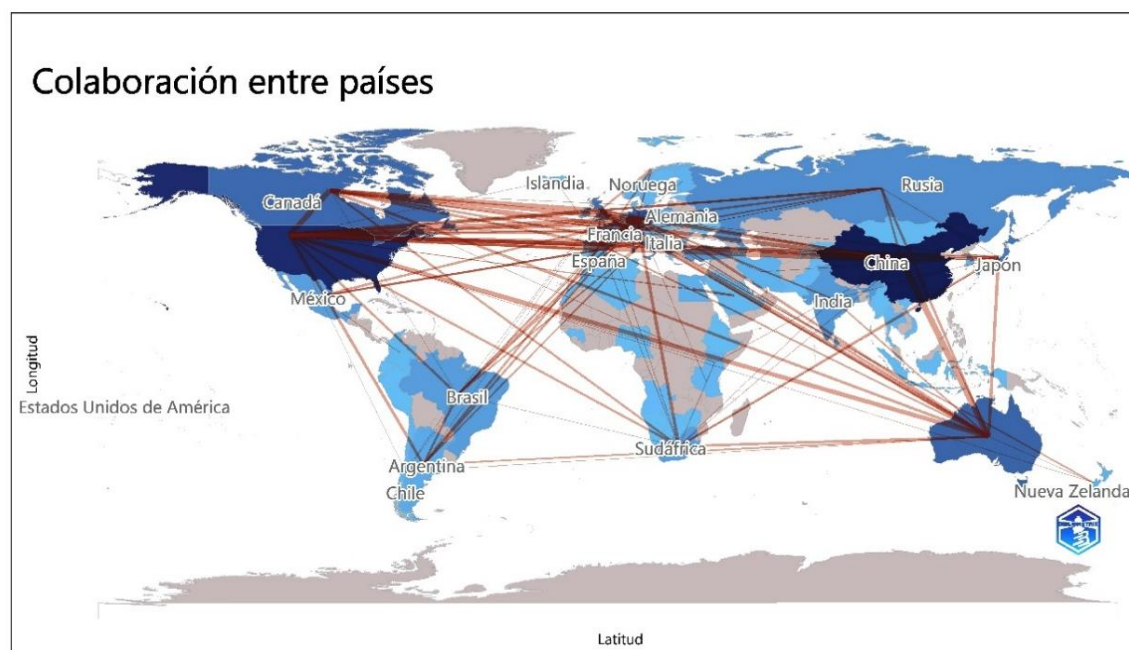


Figura 16. Mapa de producción científica por país, las tonalidades más oscuras se relacionan con un mayor número de publicaciones científicas. Las redes de colaboración entre países están representadas por líneas rojas, el grosor de la línea representa los países con mayor número de colaboraciones identificadas.

4.1.2 Análisis intelectual de la estructura

Continuando con la segunda etapa del AB, y analizando la estructura intelectual de la colección bibliográfica recopilada, el siguiente mapa (Figura 17) muestra las categorías temáticas de investigación. Estas se agrupan mediante el análisis de las palabras clave más frecuentemente utilizadas en los motores de búsqueda científicos (*Keywords Plus*). Entre estos temas destaca el uso emergente de REE como trazadores naturales de procesos de fraccionamiento y alteraciones hidrotermales, relevantes en el estudio de sistemas geotérmicos. Es importante destacar que, en este análisis temático, los trabajos relacionados a REE y sistemas geotérmicos, se encuentran en el cuadrante del mapa temático llamado “Motor” en el que se agrupan los trabajos que se destacan por su mayor relevancia y desarrollo, lo que reafirma la tendencia en el creciente interés hacia su investigación.

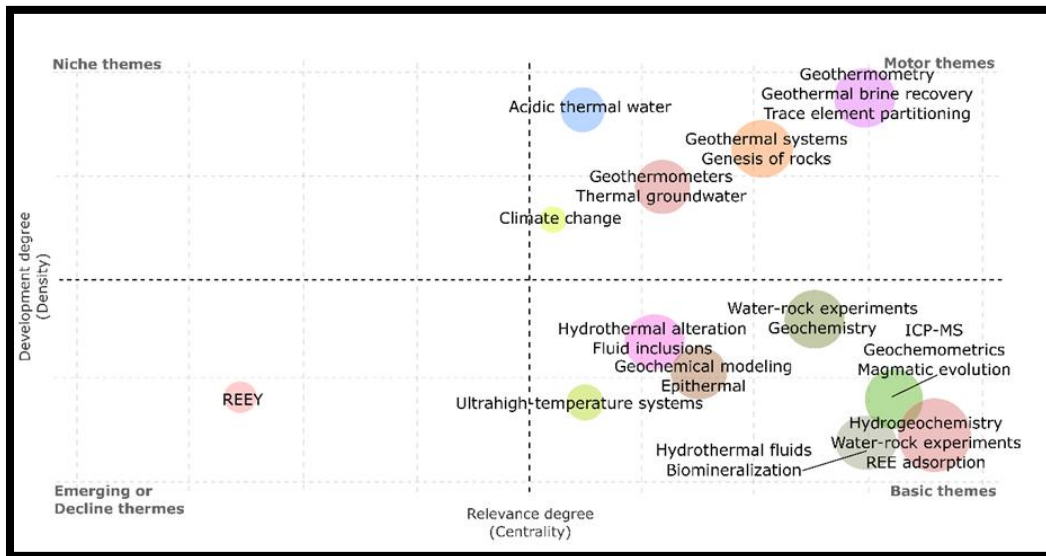


Figura 17. Mapa temático de temas emergentes de investigación. Los cuadrantes cartesianos III y IV, representan a las investigaciones con mayor grado de relevancia expresada en el eje de las abscisas, mientras que el eje de las ordenadas representa el grado de desarrollo.

4.2 Resultados del análisis sistemático y compilación de la BDG_REE

Para la elaboración de la BDG_REE y de la BDG_NORM se utilizaron los datos reportados en 77 artículos, en los que se reportaron 83 sistemas geotérmicos, de los cuales se capturaron datos de 1280 muestras. A continuación, en la Tabla 7, se puede observar un extracto resumido de la BDG_REE compilada en el presente trabajo de tesis. Este extracto presenta la compilación de la información más relevante, como: (i) Campo geotérmico; (ii) clasificación del sistema geotérmico; (iii) ambiente geológico, (iv) tipo de muestra, (v) método analítico de cuantificación y, (vi) estándar de normalización.

Tabla 7. Tabla esquemática general de la Base de Datos Geoquímica de Tierras Raras (BDG_REE); compilada con base en un análisis bibliométrico y sistemático de la literatura mundial sobre estudios teóricos y experimentales de REE en sistemas geotérmicos. La tabla contiene muestras geológicas de distinta naturaleza, como rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas, suelos y minerales.

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra		Método analítico	Estándar de normalización	
Alemania	Förster, A. et al.	2018	Zona del Río Elba	EGS	Plutónico	Ígnea	18	ICP-MS	Ninguno	N
Argentina	Gammons, C. et al.	2005	Volcán Copahue	H	Volcánico	Ígnea	4	ICP-MS	NASC	[5]
	de Silva, S. L. et al.	2022	Complejo Volcánico Cerro Blanco	H	Volcánico	Ígnea	10	ICP-MS	Condrita	[16]
Australia	Uysal, I. et al.	2011	Campo geotérmico-epitermal Twin Hills	H	Cuenca intracratónica	Ígnea	8	ICP-MS	Condrita	[16]
						Sedimentaria	1			
						Suelo	3			
						Depósito	43			
China	Nomade, S. et al.	2004	Zabuye Salt Lake	H	Volcánico	Ígnea	4	ICP-MS	Manto Primitivo	[16]
	Wang, X. et al.	2013	Kueishantao	H	Cuenca tras - arco	Ígnea	6	ICP-MS	Condrita	[16]
	Feng, Jin Liang et al.	2014	Yangbajing	H	Volcánico	Depósito	2	ICP-MS	Condrita	[1]
			Geda Hot spring	H		Depósito	1	ICP-MS	Condrita	[1]
			Riduo Hot spring	H		Depósito	2	ICP-MS	Condrita	[1]
			Chapu Hot spring	H		Depósito	1	ICP-MS	Condrita	[1]
			Pailong Hot spring	H		Depósito	1	ICP-MS	Condrita	[1]
			Ranwu Hot spring	H		Depósito	1	ICP-MS	Condrita	[1]
	Feng, Jin Liang et al.	2014	Campo geotérmico	H		Depósito	3	ICP-MS	Condrita	[1]
	Nomade, S. et al.	2004	Yangying			Ígnea	2		Manto P.	[16]
	Li, B. et al.	2022	Campo geotérmico	H	Rift	Ígnea	4	No	NASC	[11]
	Li, R.	2022	Rehai			Depósito	5	indicado	UCC	[15]
	Wang, M. et al.	2020				Metamórfica	15	XRD	Condrita	[7]
						Ígnea	28	ICP-MS		

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra	Método analítico	Estándar de normalización		
China	Su, J. et. al.	2020	Ningzhong Hot springs	H	Rift	Sedimentaria	41	ICP-MS	Condrita	NR
			Gaxi Hot springs	H		Sedimentaria	16			
			Gulu Hot springs	H		Sedimentaria	23			
	Yang, B. et al.	2021	Iheya North Knoll	HSM	Cuenca tras-arco	Sedimentos	3	ICP-OES	NASC	[6]
			Iheya Ridge	HSM		Sedimentos	2			
			Izena Hole	HSM		Sedimentos	5			
			Tangyin	HSM		Sedimentos	5			
	Wei, S. et al.	2022	Chaluo Hot springs	H	Fallas	Muestra pozo	4	ICP- MS	NASC	[6]
	Wei, S. et al.	2022	Sistemas geotérmicos en Kahui y Gezha	H	Fallas	Sedimentaria	3	No indicado	Condrita	[16]
						Metamórfica	4			
Colombia						Ígnea	27			
	Li, Y. et al.	2024	Campo geotérmico Kongchutso	H	Fallas	Ígnea	15	ICP-MS	Condrita	[16]
						Sedimentaria	2			
						Metamórfica	1			
						Depósito	6			
	Zhang	2012	Tengchong	H	Rift	Ígnea	25	ICP-MS	Condrita	[3]
	Lu, Z. et al.	2023	Sobcha Hot springs	H	Fallas	Sedimentaria	20	ICP- MS	PAAS	[12]
	You, Y. et al.	2024	Depósito silíceo Wugonglilu	H	Cinturón orogénico	Depósito	27	ICP-MS	PAAS	[11]
						Ígnea	3			
						Sedimentaria	7			
Egipto	Rueda-Gutiérrez, J. B.	2020	Sistema geotérmico de Paipa, Boyacá	H	Volcánico	Ígnea	16	ICP-MS	Condrita	[13]
Egipto	Osman, R. A. & Mahmoud, M. A. M.	2014	Sistema hidrotermal Um Ghannam	H	Complejo de núcleo metamórfico	Metamórfica	2	ICP-MS	Condrita	NR
El Salvador	Dill et al.	2000	Ahuachapán	H	Arco volcánico	Depósito	5	ICP-MS	Condrita	NR
Estados Unidos	Churchil, D. M. et al.	2021	Yellowstone	H	Punto caliente	Depósito	6	LA-ICP-	Agua y	[8] y
	Lewis	1997	National Park			Ígnea	26	MS	Riolita	[9]

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra		Método analítico	Estándar de normalización	
									Condrita	[6]
	Romick et al.	1990	Isla Akutan	H	Arco de islas volcánico	Ígnea	7	INAA	Condrita	[7]
Francia	Middleton	2013	Soultz-sous-Forêts	EGS	Graben	Ígnea	4	ICP-MS	Condrita	NR
	Milesi, G. et al.	2020	Thuès-les-Bains & St Thomas Hot springs	H	Fallas	Granos de apatito	17	ICP-MS	Condrita	[16]
						Ígnea	5			
						Metamórfica	57			
Indonesia	Bogie	1998	Wayang Windu	H	Arco volcánico	Ígnea	5	ICP-OES	Ninguno	N
	Shoedarto, R. et al.	2022	Bandung	H	Arco volcánico	Muestra pozo	8	ICP-MS	Condrita	[3]
Irán	Shakeri, A. et al.	2015	Taftán	H	Arco volcánico	Ígnea	7	ICP-MS	Condrita	[16]
	Abedini, A. & Calagari, A. A.	2016	Campo geotérmico Takab	H	Fallas	Ígnea	6	ICP-MS	Condrita	[11]
						Depósito	12			
	Naseri, H. et al.	2020	Moyil Valley	H	Volcánico	Ígnea	22	ICP-MS	Condrita	[11]
Islandia	Zierenberg, R. A. et al.	2013	Krafla	M	Volcánico	Ígnea	3	ICP-MS	Condrita	[16]
	Fowler, A. et al.	2019	Reykjanes	H	Dorsal oceánica	Depósito	3	ICP-MS	Condrita	[10]
	Ottolini	2012				Sedimento	1			[1]
						Ígnea	10			
Italia	Dini, A. et al.	2005	Campo geotérmico Larderello	HV	Fallamiento extensional y plutonismo activo	Ígnea	27	ICP-MS	Condrita	[10]
	Moller, P. et al.	2003	Campo geotérmico Larderello-Travale	HV	Fallamiento extensional y plutonismo activo	Metamórfica	4	ICP-MS	PAAS	[12]
						Sedimentaria	10			
	Fulignati	1999	Isla Volcano	H	Arco de islas volcánico	Ígnea	37	ICP-MS	Condrita	[10]
	Moller, P. et al.	2009	Campo geotérmico Piancastagnaio	HV	Fallamiento extensional	Metamórfica	3	ICP-MS	Condrita	
						Sedimentaria	4			[12]

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra	Método analítico	Estándar de normalización
	Buttinelli, M. et al.	2011	Maar de Bacano	H	Volcánico	Depósito Ígnea Muestra pozo Sedimentaria	3 3 8 6	ICP-MS UCC & [11]; Condrita [1]
22xJapón	Dekov, V. M.	2022	Depósitos hidrotermales de Barita Daiyon-Yonaguni Knoll	H	Cuenca tras-arco	Depósito	7	ICP-QMS Condrita [10]
	Sasaki, M. et al.	2003	Kakkonda	H	Plutonismo afectado por fallas	Depósito	14	LAM-ICP-MS Condrita [12]
	Sanada, T. et. al	2006	Tamagawa	H	Volcánico	Ígnea	1	ICP-MS Condrita NR
	Morishita, Y. & Takeno, N.	2010	Área geotérmica de Noya	H	Graben	Ígnea Depósito	4 19	ICP-MS Condrita [10]
	Fukuyama, M. & Chen, F.	2021	Onuma	H	Volcánico	Depósito	10	Q-ICP-MS Condrita [10]
Jordania	Moller, P. et al.	2006	Hot Springs of Jordania	H	Rift	Ígnea Sedimentaria	2 13	ICP-MS Condrita [1]
México	Sosa- Ceballos	2018	Sistema geotérmico	HDR	Volcánico	Ígnea	37	FUS-ICP Condrita NR
	Verma	2001	Acoculco	(Oculto)		Ígnea	8	[13]
	Canet, C. et al.	2005	Bahía Concepción	HSM	Fallas	Depósito	2	ICP-MS NASC [6]
México	Arce, J. L. et al.	2021	Campo geotérmico	H	Volcánico	Ígnea	28	Condrita [16]
	Verma, S. P. et al.	2018	Los Azufres			Ígnea	15	ICP-MS Condrita [10]
	Pandarínath, K. et al.	2008				Ígnea	15	Manto P. [10]
	Torres-Alvarado, I. et al.	2007				Ígnea	4	Condrita [10]
	González-Guzmán, R. et al.	2022	Los Geysers	H	Volcánico	Depósito	17	Q-ICP-MS PAAS [12]
	Weydt, L. et al.	2022	Los Humeros	H	Volcánico	Ígnea	46	ICP-MS Condrita [16]
	Sourisseau, D. et al.	2023	La Primavera	H	Volcánico	Ígnea	47	FUS-MS N-MORB [16]

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra		Método analítico	Estándar de normalización	
	Peiffer, L. et al.	2011	Volcán El Chichón	H	Volcánico	Ígnea	1	Luhr et al.	Condrita	NR
	Morton - Bermea, O. et al.	2010				Depósito	3	(1984)		
						Ígnea	2	ICP-MS	Condrita	[4]
Namibia	Cangelosi, D. et al.	2020	Complejo carbonatítico Okorusu	H	Complejo carbonatítico	Ígnea	8	ICP-MS	Condrita	[10]
Nueva Zelanda	Chambefort, I. et al.	2017	Ngatamariki	H	Arco de Islas volcánico	Sedimentaria	4	ICP-MS	Condrita	[16]
						Depósito	1			
						Ígnea	25			
Polonia	Kaczor-Kurzawa, D. et al.	2022	Tierras Bajas de Polonia	H	Cuenca intracratónica	Muestra pozo	25	ICP-MS	EUS	[2]
Portugal	Mateus, A. et al.	2015	The Ribeira Grande	H	Volcánico	Ígnea	6	FUS-MS	Condrita	[3]
Pupúa Nueva Guinea	Ponyalou, et al.	2023	Isla Ambitle	H	Volcánico	Ígnea	27	XRF; ICP - MS	Manto Primitivo	[16]
Rusia	Chelnokov, G. A. et al.	2019	Ulsk Thermal Spring	H	Cinturón orogénico	Ígnea	3	ICP-MS	Condrita	[11]
Santa Lucía	Barret, T. & Joseph, E.	2018	Sulphur Springs	H	Arco de Islas volcánico	Ígnea	20	ICP-MS	Condrita	NR
Tailandia	Ngansom, W. et al.	2020	Kapong	H	Fallas	Ígnea	5	ICP-MS	Condrita	[17]
						Sedimentaria	1			
Turquía	Moller, P. et al.	2008	Kizildere	H	Graben	Metamórfica	1	ICP-MS	Condrita	[1]
						Sedimentaria	1			
	Moller, P. et al.	2004				Metamórfica	4			NR
						Sedimentaria	3			
						Depósito	3			
	Moller, P. et al.	2004	Campo geotérmico Kula	H	Graben	Ígnea	1	ICP-MS	Condrita	NR
						Metamórfica	2			
			Pamukkale	H		Depósito	1	ICP-MS	Condrita	NR
						Sedimentaria	3			
Turquía	Uysal, I. et al.	2009	Kirsehir	H	Fallas	Depósito	2	ICP-MS	Condrita	NR

País	Autor	Año	Campo geotérmico	Tipo	Configuración geológica	Tipo de muestra	Método analítico	Estándar de normalización	
	Şener, M. F., et al.	2017	Provincia Geotérmica de Capadocia	H	Fallas	Ígnea	15	ICP-MS	PAAS [12]
	Temizel, E. & Gültekin, F.	2018	Pasinler	H	Volcánico	Ígnea	5	ICP-MS	Condrita [6]
	Temizel, E. et al.	2019	Campo geotérmico Sarmaşık	H	Cinturón orogénico	Sedimentaria	1	ICP-MS	Condrita [16]
						Ígnea	3		
	Temizel, E. et al.	2020	Campo geotérmico	H		Ígnea	2	ICP-MS	Condrita [16]
	Temizel, E. et al.	2019	Íkizdere			Ígnea	2		
	Temizel, E. et al.	2020	Campo geotérmico Ayder	H		Metamórfica	1	ICP-MS	Condrita [16]
						Ígnea	2		
	Temizel, E. et al.	2019				Ígnea	3		
	Temizel, E. et al.	2019	Campo geotérmico Şavşat	H		Ígnea	6	ICP-MS	Condrita [16]
						Sedimentaria	1		
	Rizzo, A. L. et al.	2019	Pamukkale	H	Graben	Metamórfica	2	(Möller et al., 2004)	PAAS [11]
						Sedimentaria	12		
			Reşadiye	H	Complejo ofiolítico	Sedimentaria	13	(Uysal et al., 2006)	PAAS [11]
	Siefert, D. et al.	2021	Graben Büyük Menderes	H	Graben	Metamórfica	7	ICP-MS/	PAAS [14]
						Muestra de pozo	8	OES	
	Mutlu, H. et al.	2022	Travertinos Gazlıgöl	H	Graben	Metamórfica	1	ICP- MS	PAAS [12]
						Sedimentaria	15		
	Temizel, E.	2023	Havza (Samsun)	H	Fallas	Sedimentaria	5	ICP-MS	Condrita [16]
						Ígnea	2		
Yibuti	Dekov, V. M. et al.	2014	Lake Abhé	HSL	Rift	Depósito	6	ICP-MS	PAAS [11]

Nota: H: Hidrotermal, HL: Hidrotermal líquido dominante, HV: Hidrotermal vapor dominante, HSL: Hidrotermal sub-lacustre, HSM: Hidrotermal submarino, M: Magmático, HDR: Hot dry rock (Roca seca caliente), MP: Manto primitivo. (Anders & Grevesse, 1989)^[1], (Bau et al., 2018)^[2], (Boynton, 1984)^[3], (Evensen et al., 1978)^[4], (Gromet et al., 1984)^[5], (Haskin et al., 1968)^[6], (Henderson, 1984)^[7], (Lewis et al., 1997)^[8], (McCleskey et al., 2014)^[9], (McDonough & Sun, 1995)^[10], (Taylor & McLennan, 1985)^[11], (McLennan, 1989)^[12], (Nakamura, 1974)^[13], (Piper & Bau, 2013)^[14], (Rudnick & Gao, 2003)^[15], (Sun & McDonough, 1989)^[16], (Taylor et al., 1981)^[17].

Debido a la extensión de la tabla, la concentración química de las muestras de roca colectadas (14 REE y 10 óxidos mayoritarios), se omitieron los valores cuantitativos de los elementos (la Figura 19, muestra gráficamente el amplio rango de valores de REE normalizados recopilados en la BDG-REE). Esta tabla, es el resultado de una revisión sistemática en el estado del arte realizada para comprender el rol que desempeña el estudio de los REE en la exploración geoquímica de sistemas geotérmicos. Además, la Figura 18 muestra el gráfico de cajas y bigotes del amplio rango de concentraciones de REE recopiladas en la BDG-REE.

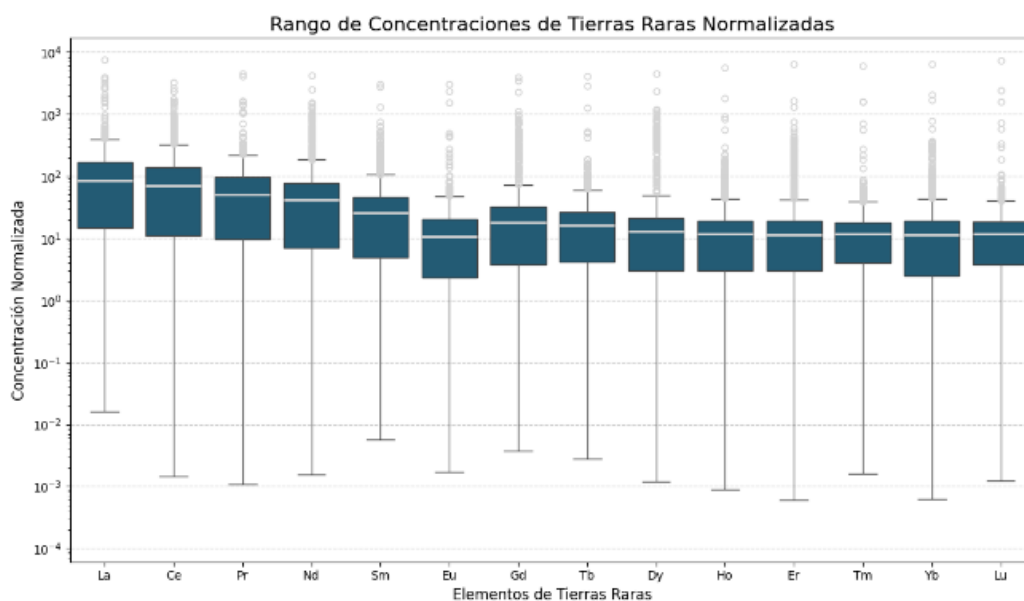


Figura 18. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración normalizada respecto a condrita (McDonough & Sun, 1995) de REE de las muestras de roca de la BDG_REE.

4.2.1 Representación gráfica de las muestras compiladas en la BDG_REE

A continuación, con el objetivo de dimensionar de manera visual la representatividad a escala mundial en la BDG_REE, en la Figura 19, se muestra la localización geográfica de los sistemas geotérmicos de donde se obtuvo la información geoquímica composicional. El tamaño de los círculos es proporcional al número de muestras por cada sistema (a mayor número de muestras mayor el diámetro del círculo), mientras que la codificación por colores representa la clasificación petrológica asignada a cada muestra.

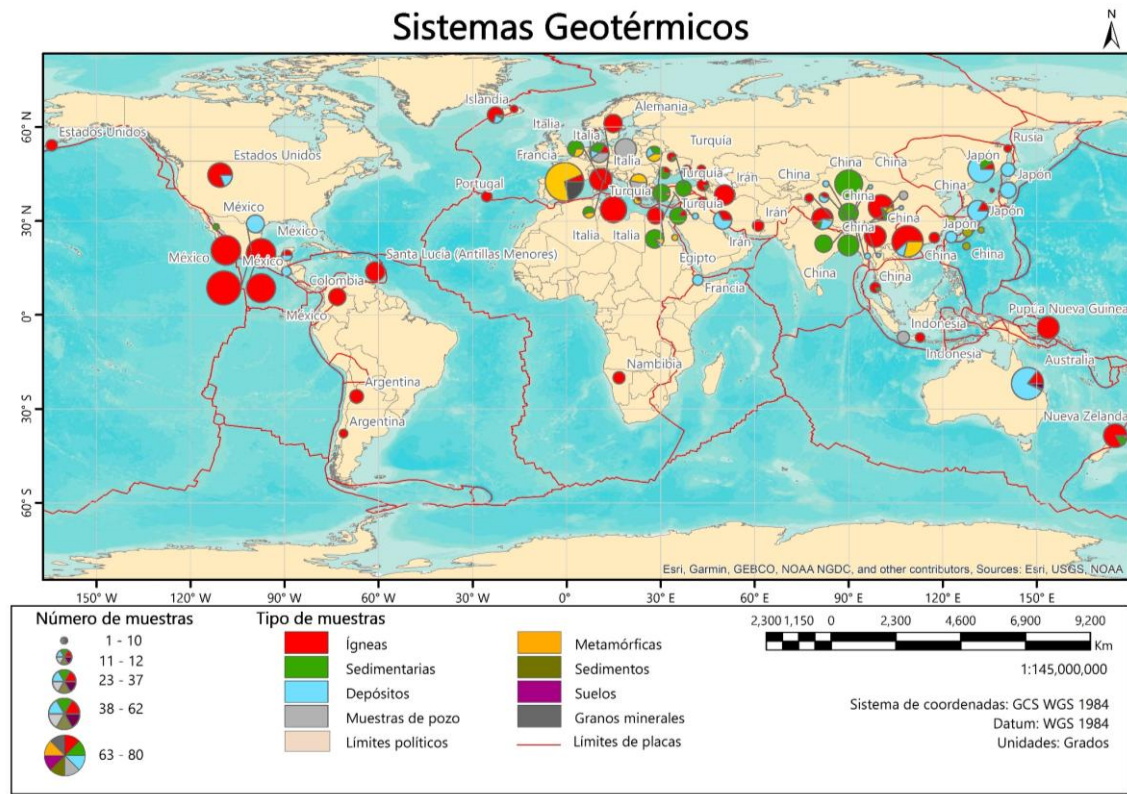


Figura 19. Representación geográfica de las muestras de roca compiladas con base en el análisis bibliométrico mundial. Todas las muestras forman parte de sistemas geotérmicos alrededor del mundo. Los colores representan la clasificación de las muestras, mientras que la densidad numérica de muestras es proporcional al tamaño de la circunferencia del símbolo.

4.2.2 Distribución por tipo de roca

Por otro lado, la Figura 20 muestra la gráfica de pastel de los porcentajes por cada tipo de muestra. La mayoría de las muestras fueron rocas ígneas con un 52.69 % del total, seguido de un 18.11 % de rocas sedimentarias y un 16.08 % de muestras de depósitos. También se

capturaron datos para muestras de rocas metamórficas (8.12 %), muestras de pozo (2.19 %) sedimentos (1.25 %), granos minerales (0.33 %) y suelos (0.23 %).

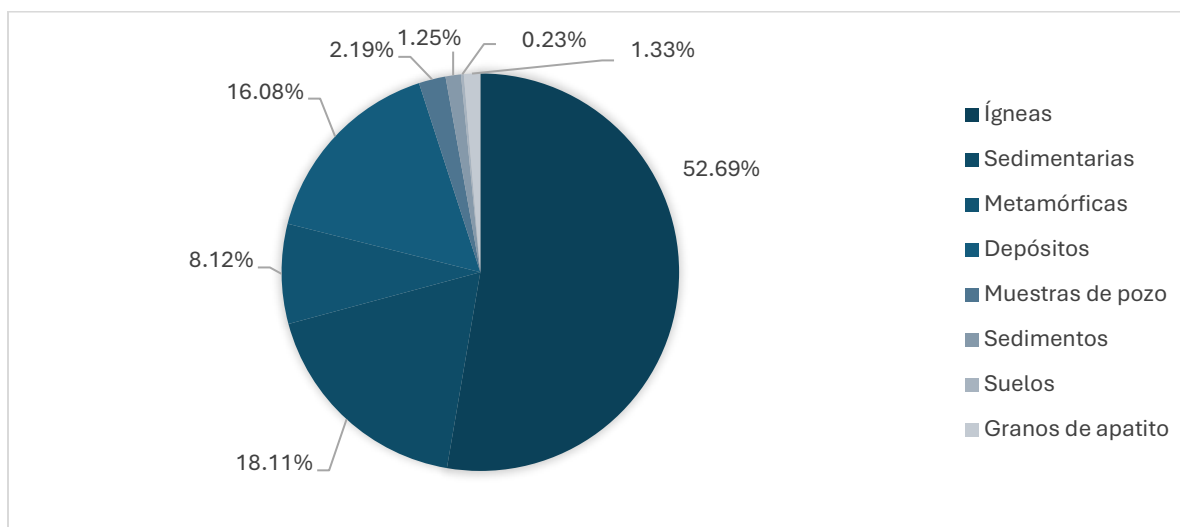


Figura 20. Gráfica circular de la distribución porcentual de las muestras de la BDG_REE

4.2.3 Distribución por sistema geotérmico y ambiente geológico

La mayoría de los sistemas geotérmicos registrados fueron de tipo hidrotermal. Se encontraron 5 sistemas hidrotermales submarinos, un sistema hidrotermal sub-lacustre, 2 sistemas geotérmicos mejorados, y un sistema de tipo HDR (oculto) además de un sistema geotérmico de tipo magmático. En cuanto a su ambiente geológico, estos se relacionan principalmente a ambientes con tectónica activa, en límites de placas convergentes, ya sea de subducción o de colisión continental (ver Figura 19), por lo que gran cantidad de los sistemas geotérmicos estudiados se encuentran en ambientes volcánicos y relacionados a sistemas de fallas (Tabla 8).

Tabla 8. Ambientes geológicos reportados desde las fuentes bibliográficas originales para los Sistemas geotérmicos compilados en la BDG-REE.

Ambiente tectónico asociado	Sistemas geotérmicos
Cinturón orogénico	6
Complejo carbonatítico	1
Complejo de núcleo metamórfico	1
Complejo ofiolítico	1
Cuenca intracratónica	2
Cuenca tras-arco	6
Dorsal oceánica	1
Relacionado a sistemas regionales de fallas	31
Volcánico	34

4.3 Resultados de la normalización y análisis geoquimiométrico

En lo que respecta al análisis de las concentraciones de REE, se identificaron diversos estándares de normalización. En la Figura 21 se puede observar la diversidad de estándares que componen a la BDG_NORM, además de la frecuencia con que fueron utilizados en los artículos de investigación compilados. En total, se identificaron nueve estándares de normalización: (i) Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB); (ii) Condritas; (iii) European Shale (EUS); Manto Primitivo (PM); (iv) North American Composite Shale (NASC); (v) Ninguno; (vi) Agua y riolita (valores locales de REE utilizados en un estudio específico); (vii) Post-Archean Australian Shale (PAAS) y (viii) Upper Continental Crust (UCC). Realizando un análisis más profundo de los estándares geoquímicos de normalización utilizados en la BDG_REE, se pudo identificar que, además, existen una gran diversidad de estándares publicados en la bibliografía científica. Por ejemplo, se encontraron tres estándares NASC, tres referencias de PAAS (ver Figura 22) y diez condritas reportadas por diferentes autores (ver Figura 23). En estas figuras, además, se puede visualizar la frecuencia con la que cada estándar fue utilizado en los artículos de investigación compilados.

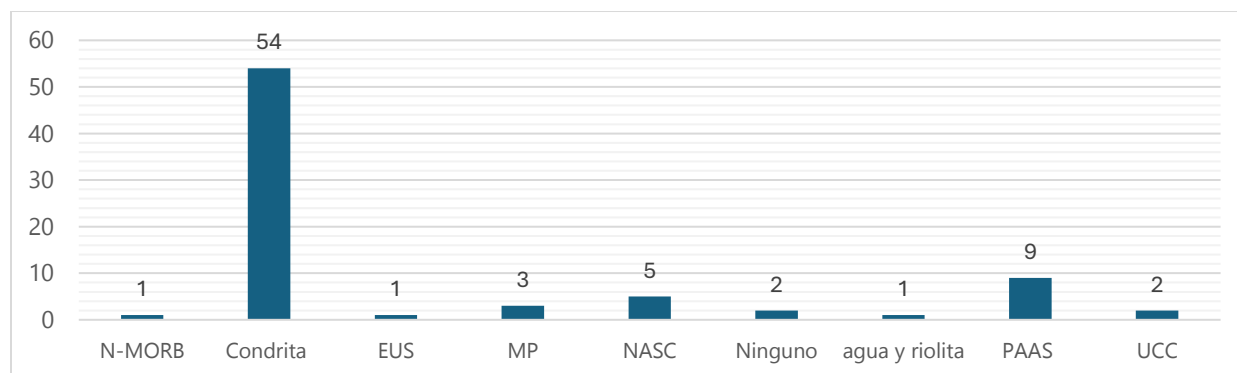


Figura 21. Diagrama de barras de los diversos estándares de normalización compilados en la BDG_REE. El eje de las ordenadas representa el número de artículos científicos que los reportaron.

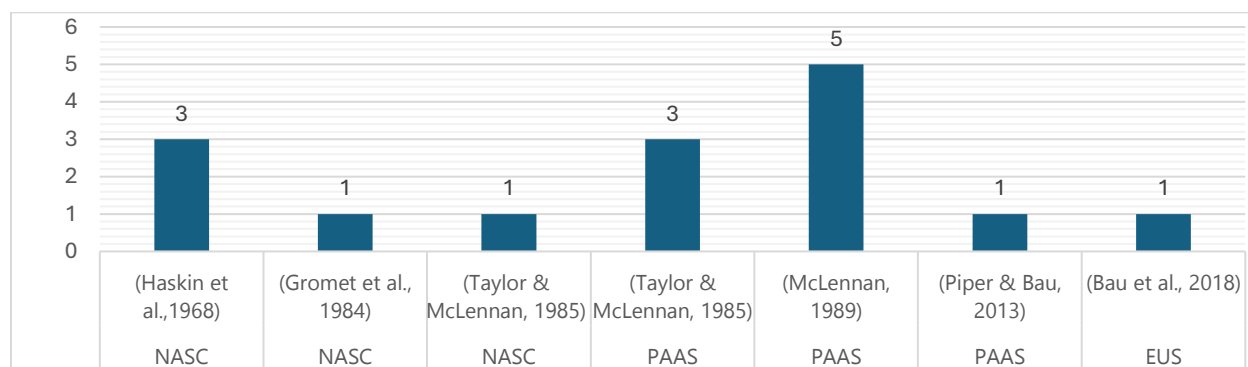


Figura 22. Distribución de estándares geoquímicos de normalización referentes a concentraciones de lutitas registrados en la BDG_REE.

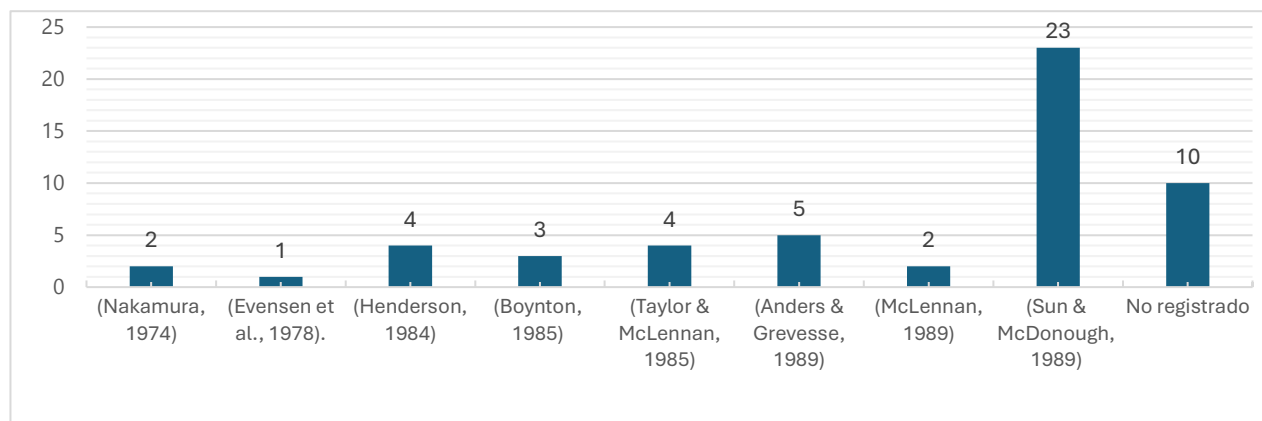


Figura 23. Distribución de estándares de normalización referentes a concentraciones en condritas registrados en la BDG_REE

4.3.1 Normalización y análisis geoquimiométrico

El proceso de normalización de las muestras de la BDG_REE se realizó con los valores geoquímicos de condrita publicados por McDonough & Sun, (1995). La selección de este estándar de referencia se fundamentó en la Figura 23, en donde se observa que dicha condrita corresponde al estándar de normalización más ampliamente utilizado (los datos de esta condrita fueron publicados en el trabajo de 1989, mientras que la metodología para obtener este set de datos geoquímicos se publicó en 1995) y uno de los más recientemente publicados. Adicionalmente, se realizó un análisis sistemático de la metodología empleada por estos autores, destacando que los valores propuestos se basaron en evaluaciones previas y mediciones de alta calidad de materiales condriticos. En este sentido, los valores de condrita reportados por McDonough & Sun (1995), se basan en compilaciones previas realizadas por Anders & Ebihara (1982); Anders & Grevesse (1989); Palme (1988); Palme et al. (1981) y Wasson & Kallemeyn, (1988). Asimismo, los autores incorporaron datos experimentales que informan sobre mediciones de alta calidad de materiales condriticos, incluyendo trabajos de Beer et al. (1984); Dreibus et al. (1993); Jochum et al. (1993); Morgan (1985); Rocholl & Jochum (1993) y Walker & Morgan (1989). En resumen, McDonough & Sun (1995) estudiaron, recopilaron y actualizaron de manera meticulosa la composición promedio de las condritas carbonáceas tipo CI mediante la integración de datos previamente publicados con nuevas mediciones experimentales, enfatizando la estabilidad de las proporciones de elementos refractarios a pesar de la limitada disponibilidad de muestras. Este enfoque integral proporciona una referencia sólida para comprender la composición los procesos de empobrecimiento y enriquecimiento de REE en las muestras litológicas analizadas.

En lo que respecta al análisis geoquimiométrico, los resultados del análisis de correlación de las matrices de Pearson (Figura 24a) y Spearman (Figura 24b), de las cuales la primera supone normalidad, mientras que la segunda es menos susceptible a set de datos no normales. En esta evaluación, se pueden observar correlaciones predominantemente positivas, lo que es congruente con que al grupo de REE se le considere geoquímicamente coherente. Se resalta que para la matriz de Pearson los HREE (de Ho a Er) presentan los valores de correlación más cercanos a 1, lo que implica que están fuertemente correlacionados entre sí. Por otro lado, la correlación entre las LREE es variable, con valores menores de correlación (0.51 a 1). Mientras que los valores de correlación entre las MREE son moderados con tendencia a una mayor correlación entre sí (0.71 a 1).

Por otro lado, cabe resaltar que, para ambas matrices, aquellos elementos que comúnmente muestran anomalías (ya sea positivas o negativas), son los elementos que presentan menores valores de correlación con otros elementos. Por ejemplo, el Ce, que es sensible a cambios redox en el ambiente, es el lantánido con valores negativos de correlación (Figura 24a). Mientras que el Eu muestra valores negativos para los cálculos con Spearman (Figura 24b). Finalmente se observa que los elementos Eu, Gd y Dy (MREE) tienen una correlación baja respecto a los LREE.

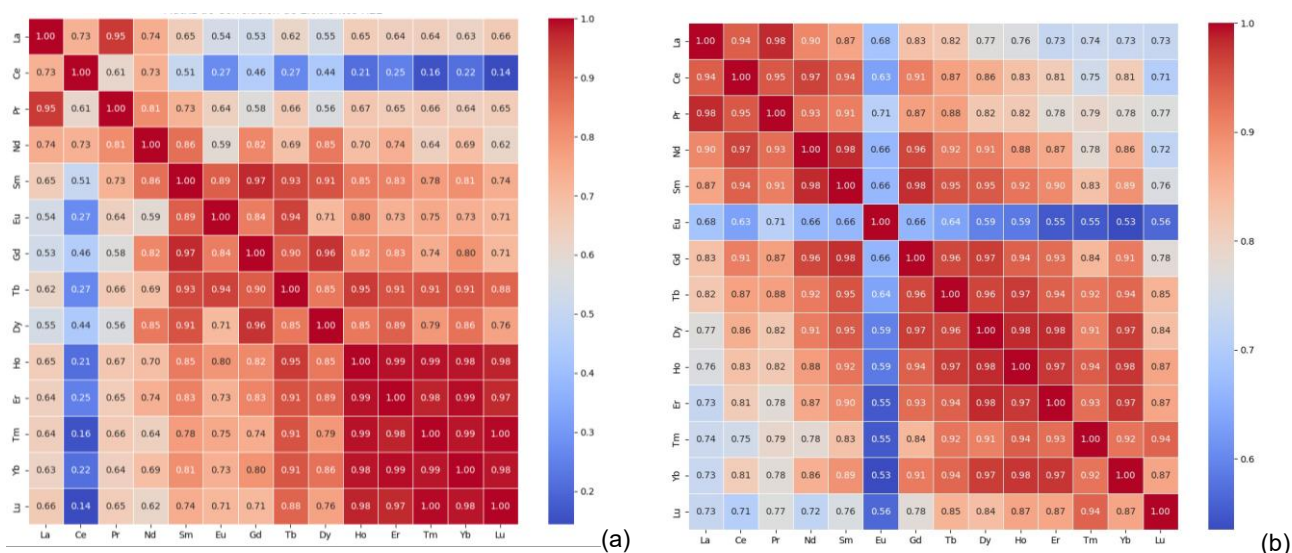


Figura 24. Matrices de correlación calculadas con los valores de la BDG_REE: a) matriz de correlación de Pearson; b) matriz de correlación de Spearman.

Para el análisis de detección de valores discordantes se empleó el criterio de Tukey, considerando como outliers aquellas muestras con valores inferiores a $Q1-1.5 \times IQR$ o superiores a $Q3+1.5 \times IQR$. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 25. Como primer criterio se analizó la sumatoria de las concentraciones de tierras raras (ΣREE) mediante diagramas de caja. La marcada asimetría positiva de la distribución indica que la presencia de valores extremos está asociada a muestras excepcionalmente enriquecidas en REE, más que a un empobrecimiento inusual. Posteriormente se evaluaron las relaciones La/Yb , Eu/Eu^* y Ce/Ce^* . La relación La/Yb presentó numerosos valores atípicos concentrados en el extremo superior del boxplot, lo que evidencia la existencia de muestras con un enriquecimiento relativo de LREE respecto a HREE significativamente mayor que el observado en la mayoría de las rocas ígneas de la base de datos. Este comportamiento puede reflejar procesos de diferenciación magmática, enriquecimiento cortical o alteración hidrotermal que favorecen la movilidad diferencial de las tierras raras ligeras. En el caso de Eu/Eu^* , los valores discordantes también se concentraron principalmente en el extremo superior de la distribución, indicando anomalías positivas de europio excepcionalmente elevadas. Estas anomalías pueden estar relacionadas con procesos de acumulación o fraccionamiento de plagioclasa, aunque también podrían reflejar condiciones particulares de alteración hidrotermal o composiciones mineralógicas poco comunes dentro de algunos sistemas geotérmicos (Santos-Raga et al., 2021). A diferencia de las variables anteriores, la relación Ce/Ce^* presentó valores atípicos tanto por encima como por debajo del rango intercuartílico, indicando la presencia de anomalías positivas y negativas de cerio. Este comportamiento es consistente con la sensibilidad del Ce frente a cambios en las condiciones redox, ya que la oxidación de Ce^{3+} a Ce^{4+} puede generar anomalías negativas por remoción del elemento o anomalías positivas cuando ocurre enriquecimiento relativo.

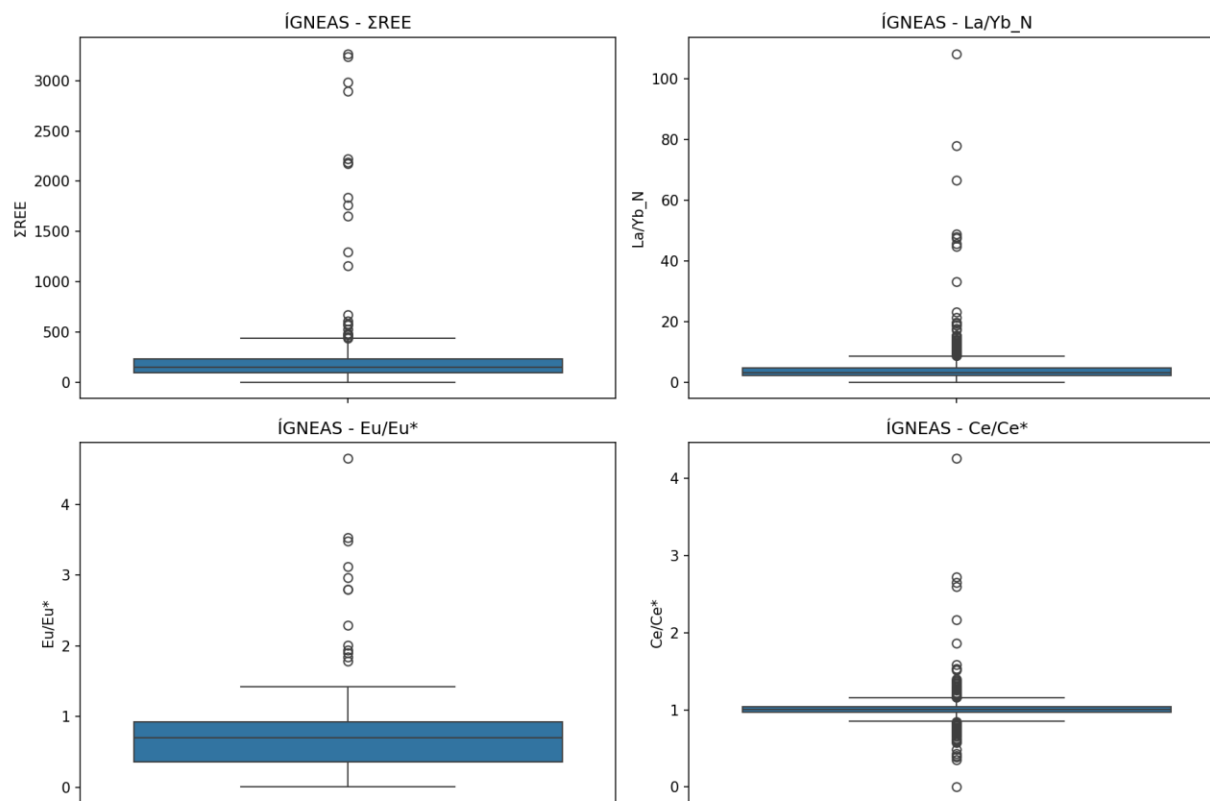


Figura 25. Diagramas de Boxplots para la visualización de valores considerados discordantes dentro de la BDG_REE.

Es importante señalar que los valores identificados como outliers mediante el criterio estadístico de Tukey no representan necesariamente errores analíticos o de muestreo. En una base de datos geoquímica de escala global, estos valores pueden corresponder a ambientes geológicos particulares o a procesos petrogenéticos e hidrotermales poco frecuentes. Por ello, la identificación de valores discordantes constituye una herramienta para su evaluación individual, más que un criterio automático para su exclusión del conjunto de datos.

4.3.2 Diagramas de normalización REE respecto a condritas

Una vez normalizados los valores de concentración de REE de la BDG_REE, estos se representaron gráficamente en diagramas tipo *spider*, los cuales permiten visualizar los patrones de distribución de REE. No obstante, como se muestra en la Figura 26, la gran cantidad de muestras dificulta el análisis individual de los patrones de REE, debido a su superposición. Por ello, con el fin de mejor visualización y análisis de los patrones de REE, se procedió a graficar la media y la desviación estándar de las muestras de roca clasificándolas por tipo de roca.

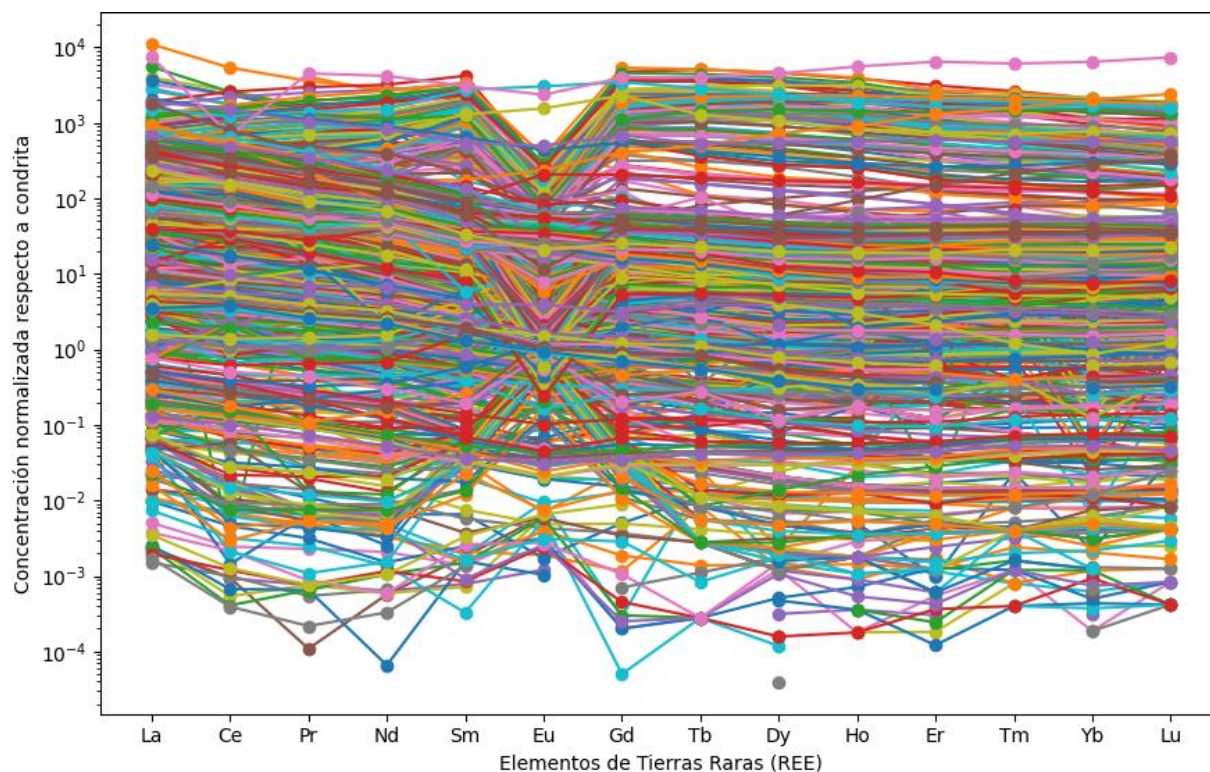
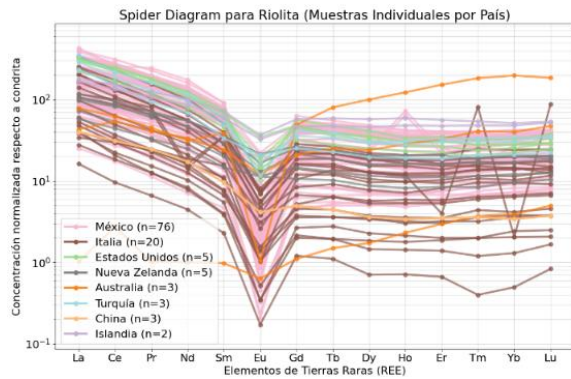


Figura 26. Diagrama spider de las concentraciones de REE normalizadas de todas las muestras en la BDG_REE.

4.4.1 Diagramas de normalización con base en el tipo de roca

Debido a la gran diversidad litológica compilada en la BDG_REE, a continuación, se presentan únicamente los diagramas de normalización de REE correspondientes a rocas ígneas de composición ácida, intermedia y básica, debido a que este tipo de litologías son las más comúnmente asociadas a ambientes geotérmicos. Para cada grupo litológico, además de la representación individual de los patrones normalizados, se realizó un análisis estadístico mediante el cálculo de la media y la desviación estándar, con el objetivo de representar el comportamiento promedio y la dispersión de las concentraciones de REE en las muestras analizadas.

a)



b)

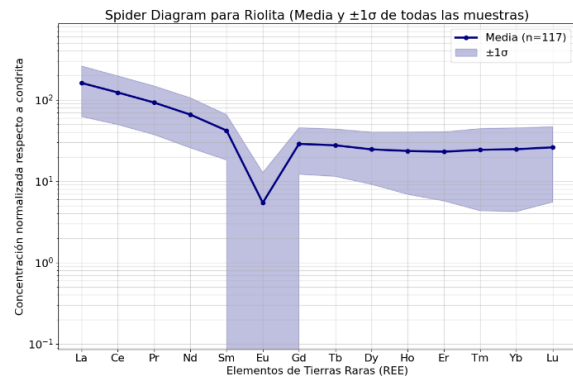
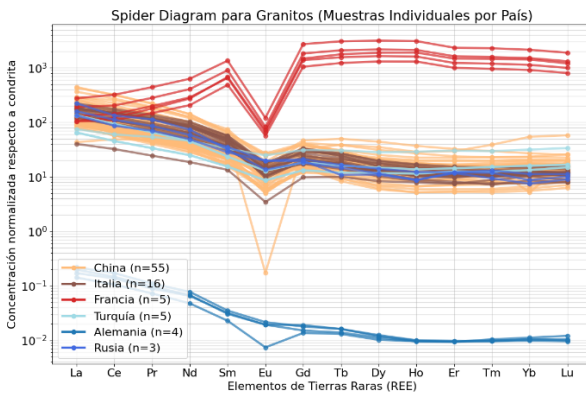


Figura 27. Diagramas de normalización de REE en riolitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul).

En las Figuras 27a y 27b se presentan los patrones de normalización de REE para las muestras de riolita. El conjunto de datos está conformado por 117 muestras provenientes de sistemas geotérmicos localizados en ocho países distintos. En la Figura 27a, correspondiente a los diagramas individuales, se observa un patrón geoquímico consistente caracterizado por un enriquecimiento marcado de las LREE respecto a las HREE, evidenciado por las altas concentraciones normalizadas de La, Ce y Pr, seguido de una disminución progresiva hacia Nd y Sm. Asimismo, destaca una pronunciada anomalía negativa de Eu, rasgo característico de magmas evolucionados y frecuentemente asociado a procesos de fraccionamiento de feldespatos durante la evolución magmática (Uysal et al., 2011). A partir del Gd y hasta Lu, los patrones muestran un comportamiento relativamente plano y estable, indicando un menor fraccionamiento entre las HREE. Aunque existe dispersión en las concentraciones absolutas entre muestras y países, la forma general del patrón de normalización se mantiene notablemente homogénea, lo que sugiere características geoquímicas comunes en las riolitas asociadas a sistemas geotérmicos. La Figura 27b muestra el patrón promedio de normalización junto con la desviación estándar ($\pm 1\sigma$) de todas las muestras analizadas. El patrón medio confirma el enriquecimiento de LREE y la anomalía negativa de Eu observada en los diagramas individuales. La mayor dispersión se presenta precisamente en el Eu, reflejando una alta variabilidad en la magnitud de dicha anomalía entre las muestras analizadas. En contraste, las HREE presentan una desviación estándar relativamente menor y un comportamiento más uniforme, particularmente entre Gd y Dy, lo que indica una mayor estabilidad geoquímica de estos elementos dentro del conjunto de datos estudiados.

a)



b)

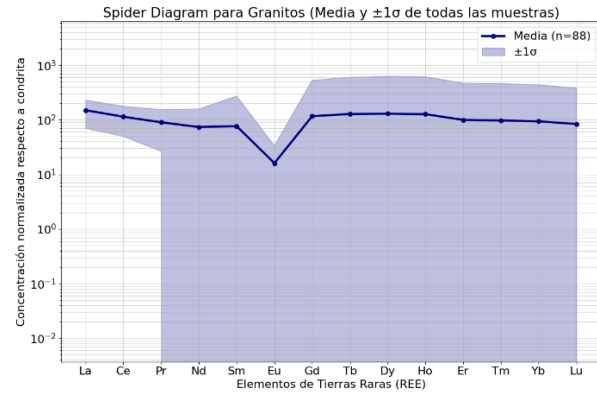


Figura 28. Diagramas de normalización de REE en granitos respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul).

En lo que respecta al símil intrusivo, los granitos, sus diagramas de normalización se presentan en las Figuras 28a y 28b. En total, se analizaron 88 muestras procedentes de sistemas geotérmicos localizados en seis países distintos. De manera general, los patrones muestran un enriquecimiento relativo de las LREE respecto a las HREE, así como una anomalía negativa de Eu de distinta magnitud entre los diferentes conjuntos de muestras. En la Figura 28a se distinguen tres agrupaciones principales de patrones de normalización. El primer grupo, correspondiente principalmente a las muestras de Francia (del sistema geotérmico de roca seca caliente Soultz-sous-Forêts), presenta las concentraciones más elevadas de REE normalizadas a condrita. Estas muestras se caracterizan por un gradiente creciente desde La hasta Sm, seguido de una marcada anomalía negativa de Eu y un patrón relativamente plano desde Gd hasta Lu, aunque con concentraciones absolutas de HREE significativamente mayores respecto a los otros conjuntos de datos (patrón conocido comúnmente como “ala de gaviota”). Este comportamiento sugiere un importante enriquecimiento de REE asociado a magmas altamente evolucionados y posiblemente relacionados con minerales accesorios enriquecidos en LREE, como monacita, bastnasita y allanita, capaces de incorporar elementos de mayor radio iónico dentro de su estructura cristalina (Zepf, 2013). Cabe destacar que este tipo de firmas geoquímicas suele asociarse a granitos peralcalinos desarrollados en ambientes tectónicos intraplaca, principalmente relacionados con procesos de rifting y extensión cortical (Dostal & Shellnutt, 2016). Estos ambientes son particularmente relevantes debido a que constituyen una de las fuentes económicas más importantes de REE, especialmente de HREE (Dushyantha et al., 2020). El segundo y tercer grupo de muestras presentan un comportamiento diferente al

observado en las muestras francesas. En estos conjuntos se identifica un patrón descendente de concentración desde La hasta Sm, indicando un enriquecimiento preferencial de LREE, seguido también de una anomalía negativa de Eu, aunque menos pronunciada (patrón conocido como *spoon*). A partir de Gd y hasta Lu, los patrones tienden a estabilizarse y muestran una distribución relativamente plana para las HREE. A pesar de las diferencias en las concentraciones absolutas y en la magnitud de la anomalía de Eu, los tres grupos comparten una geometría general característica de magmas félsicos evolucionados afectados por procesos de cristalización fraccionada, particularmente de feldespatos (Van Gosen et al., 2017). La Figura 28b muestra el patrón promedio de normalización junto con la desviación estándar de todas las muestras analizadas. El patrón medio evidencia un enriquecimiento generalizado de REE y confirma la presencia de una anomalía negativa de Eu. Asimismo, la amplia desviación estándar observada a lo largo del patrón refleja la alta variabilidad geoquímica existente entre los distintos tipos de granito incluidos en la base de datos, especialmente entre las muestras altamente enriquecidas y aquellas con concentraciones considerablemente menores. La mayor dispersión se observa entre Sm y Lu, indicando diferencias importantes en el comportamiento de las HREE entre los distintos ambientes geológicos representados.

En lo que respecta a las rocas de composición intermedia, en las Figuras 29 y 30 se presentan los patrones de normalización de REE correspondientes a las andesitas y dacitas, respectivamente. Para las andesitas se graficaron un total de 84 muestras procedentes de sistemas geotérmicos ubicados en siete países distintos.

De manera general, se observa un patrón de disminución progresiva de la concentración de LREE a HREE, característico de magmas calcoalcalinos intermedios con enriquecimiento preferencial de elementos ligeros (Willson, 1989)

A diferencia de las riolitas y granitos, las andesitas presentan anomalías negativas de Eu menos pronunciadas y, en algunos casos, anomalías positivas. Este comportamiento podría estar relacionado con variaciones locales en los procesos de cristalización y alteración de feldespatos, en particular de plagioclasa, así como con diferencias en las condiciones redox y de temperatura de los sistemas geotérmicos asociados (Lee et al., 2025; Rollinson, 2014). Asimismo, en la Figura 29a se observan algunas anomalías geoquímicas particulares, como muestras de México con anomalías positivas de Sm y de Argentina con anomalías negativas de Ce y positivas de Dy. Estas anomalías podrían reflejar procesos locales de movilización diferencial de REE durante la alteración hidrotermal o la presencia de minerales accesorios capaces de fraccionar selectivamente determinados elementos traza (de Silva et al., 2022; Weydt et al., 2022)

Finalmente, aunque existe dispersión en las concentraciones absolutas entre las muestras analizadas (Figura 29b), la geometría global de los patrones de normalización es relativamente homogénea entre los distintos países representados. Esta menor dispersión geoquímica sugiere que los procesos de diferenciación magmática y alteración hidrotermal que afectaron a las andesitas fueron menos intensos que los observados en litologías más evolucionadas, como las riolitas y los granitos. Además, la menor magnitud de las anomalías de Eu es consistente con un menor grado de evolución magmática y con una cristalización fraccionada menos avanzada de los feldespatos (Belli, 2021; Ernest et al., 2023)

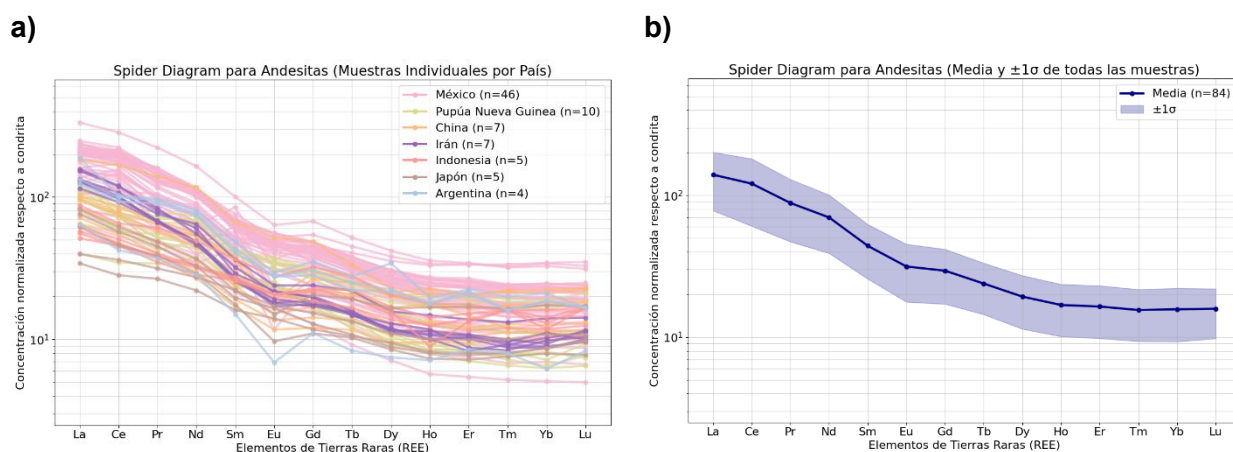


Figura 29. Diagramas de normalización de REE en andesitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul).

Las Figuras 30a y 30b presentan los diagramas de normalización de REE correspondientes a las muestras de dacitas compiladas en la BDG-REE. En total, se analizaron 23 muestras procedentes de sistemas geotérmicos ubicados en dos países distintos.

De manera general, las dacitas presentan patrones de normalización similares a las andesitas, caracterizados por un enriquecimiento marcado de LREE respecto a las HREE, una anomalía negativa de Eu moderada y un patrón de disminución suave de las HREE. En la Figura 30a se observa que en estas muestras de roca existe una notoria diferencia entre las concentraciones de las dacitas de Santa Lucía y las de China, siendo las primeras las que presentan la mayor concentración. Además, un rasgo distintivo de Santa Lucía es el enriquecimiento abrupto de Lu observado al final del patrón de normalización. Este comportamiento genera una desviación importante respecto del patrón general de las HREE y podría estar relacionado con procesos locales de enriquecimiento mineralógico o con variaciones particulares en minerales accesorios capaces de incorporar preferentemente HREE.

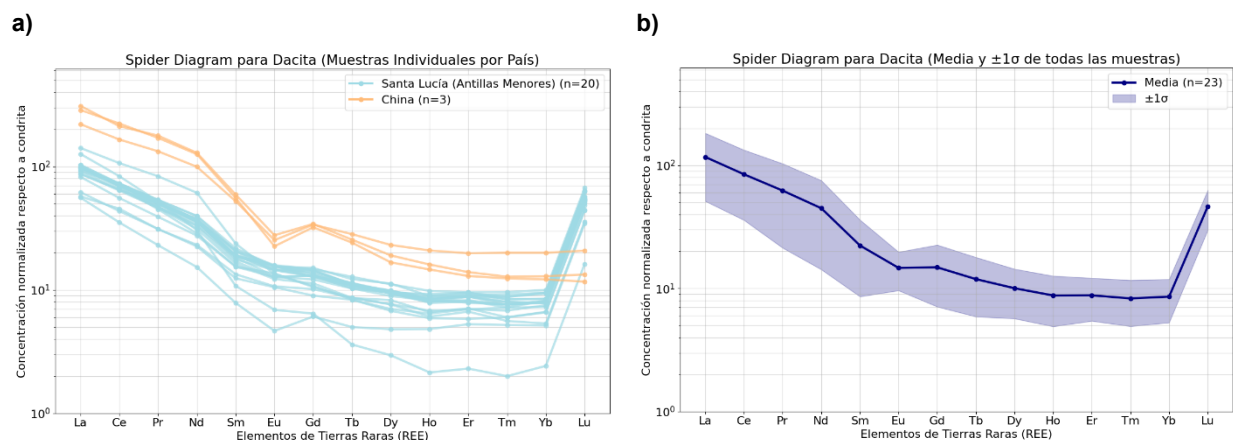


Figura 30. Diagramas de normalización de REE en dacitas respecto a condrita: a) muestras individuales; b) patrón promedio de los diagramas normalizados (línea azul oscuro) y dispersión denotada por la desviación estándar (sombreado azul).

Los patrones normalizados mostrados en las Figuras 31a y 31b corresponden a un total de 47 muestras de basaltos compiladas de seis países distintos. En estas muestras se observa un patrón de normalización relativamente más aplanado en comparación con las litologías intermedias y félsicas previamente analizadas. Asimismo, se observa una mayor dispersión en las concentraciones de LREE, lo que sugiere procesos de fraccionamiento diferencial más intensos de estos elementos durante la evolución magmática y/o la alteración hidrotermal. En contraste, las HREE presentan una dispersión considerablemente menor y mantienen patrones relativamente homogéneos, independientemente de la distribución geográfica de las muestras. Este comportamiento indica que los basaltos presentan una menor susceptibilidad al fraccionamiento de HREE, lo cual es consistente con magmas menos evolucionados y con una menor influencia de minerales accesorios que concentran preferentemente estos elementos.

Finalmente, la Figura 32 muestra los patrones normalizados de las muestras de rocas consideradas valores atípicos. Línea punteada negra representa la media del rango de concentraciones de REE. Se observa que la mayoría de las muestras dibujan un patrón normalizado que se concentra cerca de la media, No obstante, aún se puede apreciar agrupaciones de patrones muy particulares. Uno de estos grupos muestra un patrón de ala de gaviota con empobrecimiento de LREE y marcada anomalía de Eu. Se observa también un grupo de muestras con pendiente inclinada desde las LREE hacia las HREE (patrón en forma de cuchara) y, por último, un grupo de muestras con concentraciones mucho menores a la media y

con patrón de pendiente suave inclinado desde las LREE hacia las HREE. Estos tres grupos de patrones corresponden a muestras de rocas ya graficadas en el análisis por tipo de roca, pues se tomaron en cuenta las muestras con valores atípicos, de manera que se apreciara la relación entre el tipo de roca y la firma geoquímica sin obviar los procesos de fraccionamiento debidos a las condiciones geológicas únicas de cada sistema geotérmico.

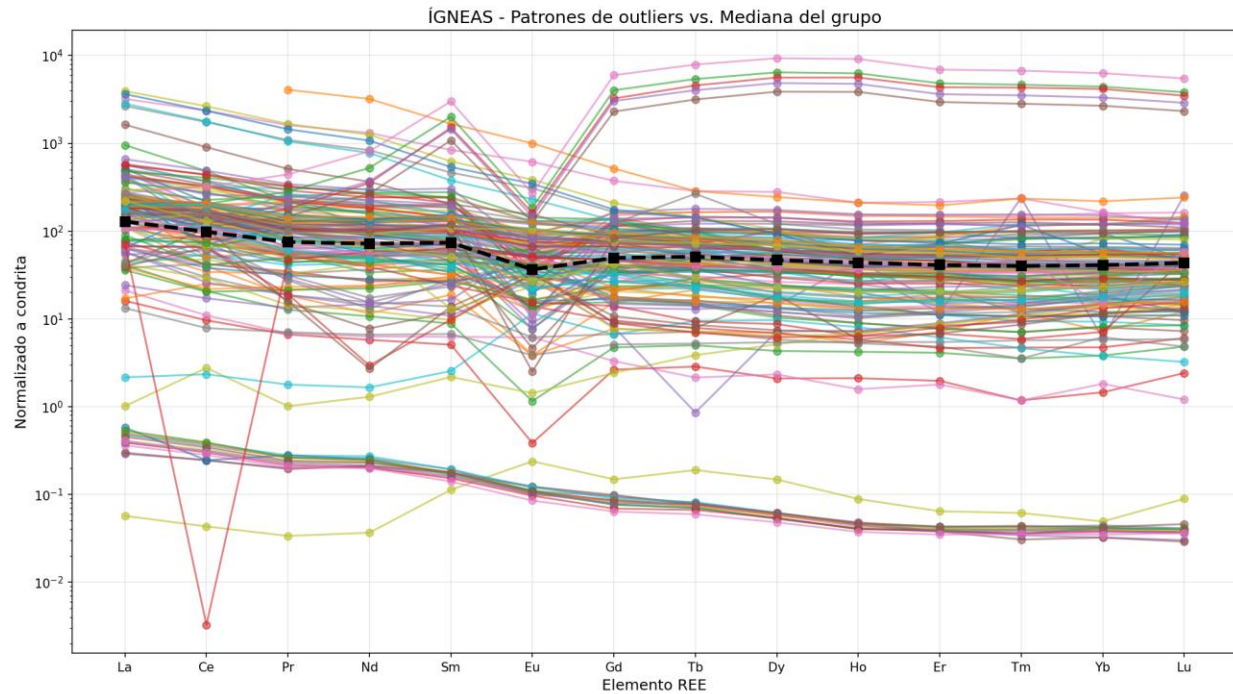


Figura 31. Patrones de normalización de REE de los outliers (muestras con concentraciones atípicas. La línea negra punteada representa la mediana del grupo.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Posterior a realizar un riguroso análisis bibliométrico de la literatura científica y recopilar e integrar los datos geoquímicos de REE provenientes de 1280 muestras de rocas de sistemas geotérmicos en todo el mundo, se implementó una metodología geoquimiométrica para evaluar la composición y los patrones de normalización de los REE, así como su correlación con el tipo de roca. A partir de la correlación e interpretación de los resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El análisis bibliométrico permitió evaluar con base en los resultados analizados (77 artículos con composición química de REE en rocas de un total de 1220 artículos reportados en la BDB-REE), que, la mayoría de los estudios se enfocan en el análisis de los fluidos geotérmicos y algunos otros en el desarrollo de protocolos experimentales. Mientras que el análisis en muestras de rocas es limitado. En este sentido, la distribución temporal de los 1220 trabajos de investigación sobre REE en sistemas geotérmicos, mostraron una tendencia de tipo exponencial, que evidencia el incremento en el interés sobre este tema. Geográficamente, China y Estados Unidos son los países con mayor desarrollo de investigación y número de trabajos publicados, posiblemente debido a que son los países con mayor número de reservas mundiales de REE y con mayor desarrollo en aplicaciones de uso directo y generación de energía eléctrica mediante la geotermia, respectivamente. Además, se clasificaron los temas de investigación más relevantes, como temas emergentes con mayor desarrollo (biomineralización, experimentos de interacción agua-roca, evolución magmática y sistemas geotérmicos no convencionales) y temas poco desarrollados (génesis de rocas, geoquimiometría, fraccionamiento de elementos traza y recuperación de REE mediante minería de salmueras geotérmicas). Siendo la presente investigación parte de los análisis enfocados a la aplicación de la geoquimiometría.

Se concluye que existe una gran variedad de estándares geoquímicos de referencia para la normalización de REE. Sin embargo, hasta el alcance de este trabajo de tesis, no se reportan criterios específicos para la selección de estándar de referencia más adecuado, entre la diversidad de condritas, PAAS, NASC, entre otros reportados en este trabajo.

Con base el análisis de los diagramas de normalización se concluye que existe una fuerte correlación entre la litología y la geometría de estos patrones. Aunque, pueden existir diferencias derivadas de intensos procesos de interacción agua-roca, como se observó en las muestras de granito provenientes de Soutz Forests. De manera general las rocas ígneas félsicas mostraron patrones de enriquecimiento de LREE, marcadas anomalías negativas de Eu y una mayor

dispersión de la concentración. Por el contrario, las rocas ígneas de composición intermedia y máfica mostraron patrones de normalización más conservativos, sin anomalías prominentes y una menor dispersión en los valores de concentración. La diferencia entre la dispersión de los valores de concentración normalizados entre las rocas basálticas y los granitos puede deberse a los diversos orígenes tectónicos asociados a los granitos, a una mayor susceptibilidad de fraccionamiento mineral, alteración hidrotermal o a los diversos procesos locales de interacción agua-roca. Esto sugiere que, los granitos asociados a sistemas geotérmicos pueden registrar ambientes tectónicos y evoluciones magmáticas contrastantes.

Finalmente, como conclusión general, se determinó que mediante el análisis geoquímico y estadístico de patrones de normalización de REE en muestras de rocas de sistemas geotérmicos, estos tienen potencial como trazadores geoquímicos aplicables al entendimiento de procesos de interacción agua-roca, evolución magmática, reconocimiento de ambientes tectónicos y litológicos. Esta metodología integrada con el análisis geoquímico, geofísico y geológico convencional puede contribuir al mejoramiento de la etapa exploratoria de sistemas geotérmicos convencionales y no convencionales.

Referencias

- Aggarwal, J. K. (1994). Rare Earth Elements in Icelandic Hydrothermal Fluids. *Mineralogical Magazine*, 58A(1), 5–6. <https://doi.org/10.1180/minmag.1994.58a.1.05>
- Anders, E., & Ebihara, M. (1982). Solar-system abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(11), 2363–2380.
- Anders, E., & Grevesse, N. (1989). Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1), 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
- Archer, R. (2020). Geothermal energy. In *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet* (Third Edit). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00020-7>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aviña, H. M. J., Pérez, P. S., Madrazo, O. V., González, E. P., & Rivera, A. J. (2016). Low-enthalpy geothermal food dehydrator. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 40, 163–168.
- Aviña, P., & Pérez, E. (2020). *Deshidratador geotérmico de alimentos (DGA) IIDEA frutos del Vapor*. Almacén Digital. <https://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/GacetaMarzo-Abril2020/Paginas/dga-iidea.aspx>
- Axelsson, G., & Gunnlaugsson, E. (2000). *Long-term monitoring of high-and low-enthalpy fields under exploitation*. Japanese Organizing Committee for WGC2000.
- 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>
- Bau, M., & Dulski, P. (1999). Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155(1–2), 77–90.
- Bau, M., Schmidt, K., Pack, A., Bendel, V., & Kraemer, D. (2018). The European Shale: An improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe. *Applied Geochemistry*, 90, 142–149.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.01.008>

- Beer, H., Walter, G., Macklin, R. L., & Patchett, P. J. (1984). Neutron capture cross sections and solar abundances of Dy 160, 161, Yb 170, 171, Lu 175, 176, and Hf 176, 177 for the s-process analysis of the radionuclide Lu 176. *Physical Review C*, 30(2), 464.
- Belli, T. (2021). *Europium isotope fractionation in highly fractionated igneous rocks*. 55, 9–17. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0631>
- Bendall, B., Hogarth, R., Holl, H., McMahon, A., Larking, A., & Reid, P. (2014). Australian Experiences in EGS Permeability Enhancement – A Review of 3 Case Studies. *Thirty-Ninth Stanford Geothermal Workshop, Figure 1*, 1–10.
- Benderitter, Y., & Cormy, G. (1990). Possible approach to geothermal research and relative costs. *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, 59–69.
- Bertani, R. (2015). Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*, 19–25.
- Boynton, W. V. (1984). Chapter 3 - Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In P. Henderson (Ed.), *Rare Earth Element Geochemistry* (Vol. 2, pp. 63–114). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Canet, C., Franco, S. I., Morelos-rodríguez, L., Rajabi, A., & Núñez-useche, F. (2021). *Apunte geológico y revisión histórica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo*. 258–279.
- Cano, N. A., Céspedes, S., Redondo, J., Foo, G., Jaramillo, D., Martinez, D., Gutiérrez, M., Pataquiba, J., Rojas, J., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2022). Power from Geothermal Resources as a Co-product of the Oil and Gas Industry: A Review. *ACS Omega*, 7(45), 40603–40624. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04374>
- Céspedes, S., Cano, N. A., Foo, G., Jaramillo, D., Martinez, D., Gutiérrez, M., Pataquiba, J., Rojas, J., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2022). Technical and Environmental Feasibility Study of the Co-Production of Crude Oil and Electrical Energy from Geothermal Resources: First Field Trial in Colombia. *Processes*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/pr10030568>
- Chamorro, C. R., & Mondejar, M. E. (2024). Geothermal Power: Technologies and Current Status. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 3, Issue February 2021). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90386-8.00019-x>

- Chaudhari, R., Chaudhari, B., Dilipsinh, P., & Leela bhai, V. (2016). To Study the Temporal Variation of Capacity Utilization Factor (CUF) of PV Based Solar Power Plant with Respect to Climatic Condition. *Current World Environment*, 11(2), 654–661. <https://doi.org/10.12944/cwe.11.2.38>
- Cicchella, D., Lima, A., Birke, M., Demetriades, A., Wang, X., & De Vivo, B. (2013). Mapping geochemical patterns at regional to continental scales using composite samples to reduce the analytical costs. *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 79–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.012>
- Clark, A. M. (1984). Chapter 2 - Mineralogy of the Rare Earth Elements. In P. Henderson (Ed.), *Rare Earth Element Geochemistry* (Vol. 2, pp. 33–61). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50007-1>
- Coryell, D., Chase, J. W., & Winchester, J. W. (1963). *Bosolt (K, louea*. 68(2), 559–566.
- Criss, R. E. (2019). Thermal models of the continental lithosphere. In *Heat Transport and Energetics of the Earth and Rocky Planets* (Issue 1991). INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818430-1.00006-9>
- de Silva, S. L., Roberge, J., Bardelli, L., Báez, W., Ortiz, A., Viramonte, J. G., Arnosio, J. M., & Becchio, R. (2022). Magmatic evolution and architecture of an arc-related, rhyolitic caldera complex: The late Pleistocene to Holocene Cerro Blanco volcanic complex, southern Puna, Argentina. *Geosphere*, 18(2), 394–423. <https://doi.org/10.1130/GES02294.1>
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). Geothermal energy: Utilization and technology. In *Geothermal Energy: Utilization and Technology* (Vol. 9781315065). <https://doi.org/10.4324/9781315065786>
- Dincer, I., & Ezzat, M. F. (2018). Geothermal Energy Production. In *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00313-8>
- Dincer, I., & Ozturk, M. (2021). Geothermal energy sources. In *Geothermal Energy Systems* (pp. 57–83). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820775-8.00004-0>
- DiPippo, R. (2008). Geology of Geothermal Regions. *Geothermal Power Plants*, 3–18. <https://doi.org/10.1016/b978-075068620-4.50005-8>
- DiPippo, R. (2016). *Advanced Geothermal Energy Conversion Systems* (pp. 241–289). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100879-9.00009-4>

- DiPippo, R. (2022). Pathé geothermal power plant, Hidalgo, Mexico: A comprehensive retrospective assessment of the first plant of its kind in the Americas. *Geothermics*, 98(October 2021), 102285. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102285>
- DiPippo, R., & Renner, J. L. (2014). Chapter 22 - Geothermal Energy. In T. M. Letcher (Ed.), *Future Energy (Second Edition)* (Second Edi, pp. 471–492). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00022-3>
- Dostal, J., & Shellnutt, J. G. (2016). Origin of peralkaline granites of the Jurassic Bokan Mountain complex (southeastern Alaska) hosting rare metal mineralization. *International Geology Review*, 58(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1052995>
- Dreibus, G., Palme, H., Spettel, B., & Wanke, H. (1993). Sulfur and selenium in chondritic meteorites. *Meteoritics*, Vol. 28, No. 3, Volume 28, Page 343, 28.
- 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. *Ore Geology Reviews*, 122, 103521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- Elders, W. A., & Moore, J. N. (2016). Geology of geothermal resources. In *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation* (pp. 7–32). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100337-4.00002-4>
- Ernest, I., Smith, M., Burns, D. H., & Silva, S. L. De. (2023). *Andesites and evolution of the continental crust: Perspectives from the Central Volcanic Zone of the Andes*. January, 1–13. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.961130>
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., & O’Nions, R. K. (1978). Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8), 1199–1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X)
- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20(6), 621–632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/env.966>
- Fukuyama, M., & Chen, F. (2021). Geochemical characteristics of silica scales precipitated from the geothermal fluid at the Onuma geothermal power plant in Japan. *Journal of Mineralogical*

- and Petrological Sciences*, 116(3), 159–169. <https://doi.org/10.2465/jmps.201130b>
- Giménez, E., & Ordóñez, S. (2020). Geología médica: ¿un nuevo espacio científico? *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 27(2), 140–140.
- Glassley, W. E. (2014). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment* (2nd editio). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.uaeh.elogim.com/10.1201/b17521>
- Göb, S., Gühring, J.-E., Bau, M., & Markl, G. (2013). Remobilization of U and REE and the formation of secondary minerals in oxidized U deposits. *American Mineralogist*, 98(4), 530–548.
- Gómez Arias, E., & González Fernández, A. (2017). La geotermia como energía renovable y sustentable en México. *Serie Ponencias*, 135–152.
- Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., & Dymek, R. F. (1984). The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12), 2469–2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Gupta, H., & Roy, S. (2007a). Chapter 2 - BASIC CONCEPTS. In H. Gupta & S. Roy (Eds.), *Geothermal Energy* (pp. 15–30). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044452875-9/50002-2>
- Gupta, H., & Roy, S. (2007b). Chapter 4 - GEOTHERMAL SYSTEMS AND RESOURCES. In H. Gupta & S. Roy (Eds.), *Geothermal Energy* (pp. 49–59). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044452875-9/50004-6>
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023. *Geothermal Energy*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2012). Update of the geothermal electric potential in Mexico. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 36 1(1976), 671–677.
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Canchola Félix, I., Romo-Jones, J. M., & Quijano-León, J. L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *Proceedings World Geothermal Congress*, 466, 1–13.
- Gutiérrez-Negrin, L., Izquierdo-Montoya, G., & Canchola-Félix, I. (2023). Situation of geothermal energy in Mexico: country update. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2023*, 1–9.

- Haas, J. R., Shock, E. L., & Sassani, D. C. (1995). Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21), 4329–4350. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00314-P](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00314-P)
- Harkins, W. D. (1916). The Abundance of the Elements in Relation to the Hydrogen-Helium Structure of the Atoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2(4), 216–224. <https://doi.org/10.1073/pnas.2.4.216>
- Haskin, L. A., & Frey, F. A. (1966). Dispersed and Not-So-Rare Earths: The relative abundances of these elements reflect the earth's geochemical evolution from primordial matter. *Science*, 152(3720), 299–314.
- Haskin, L. A., Haskin, M. A., Frey, F. A., & Wildeman, T. R. (1968). Relative and Absolute Terrestrial Abundances of the Rare Earths. *Origin and Distribution of the Elements*, 889–912. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-012835-1.50074-x>
- Henderson, P. (1984). General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1–32. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-42148-7.50006-x>
- Hernández-Ochoa, A.F., Iglesias, E.R., López-Blanco, S., Martínez Estrella, J.I., Paredes Soberanes, A., Torres Rodríguez, R. J., & Reyes Picasso, N., González Reyes, I., Lira Argüello, R., Prol Ledesma, R.M., Espinoza Ojeda, O. M. (2020). Assessment of the Technical Potential for Enhanced Geothermal Systems in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Hernández Cruz, L., Victoria Torquemada, M., & Sinclair Crawford, D. (2010). DICCIONARIO DEL HÑÄHÑU (OTOMÍ) Valle de Mezquital Hidalgo. In *Serie de vocabularios y diccionarios indígenas “Mariano Silva y Aceves.”*
- Hochstein, M. P. (1988). Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes). *Geothermics*, 17(1), 15–49. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6505\(88\)90004-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6505(88)90004-1)
- Hochstein, M. P. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, 31–57.

- Honda, T., Nozaki, T., Ossaka, T., Oi, T., & Kakihana, H. (1988). Nondestructive neutron activation analysis of rare earth elements in hot spring water samples in Kusatsu-shirane area, Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 122(1), 143 – 151. <https://doi.org/10.1007/BF02037173>
- Honda, T., Oi, T., Ossaka, T., Nozaki, T., & Kakihana, H. (1989a). Determination of praseodymium, neodymium and erbium in hot spring and crater lake waters by neutron activation analysis incorporating the standard addition technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 134(1), 13 – 25. <https://doi.org/10.1007/BF02047266>
- Honda, T., Oi, T., Ossaka, T., Nozaki, T., & Kakihana, H. (1989b). Determination of rare earth elements in hot spring water and crater lake water samples by neutron activation analysis incorporating coprecipitation process using aluminium as a collector. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 130(1), 81 – 97. <https://doi.org/10.1007/BF02037703>
- Hoshino, M., Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). REE Mineralogy and Resources. In *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (1st ed., Vol. 49, Issue Table 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2016.03.006>
- Huttrer, G. (2020). The status of world geothermal power production 1990–1994. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*.
- Iglesias, E. R., & Torres, R. J. (2003). Low-to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment. *Geothermics*, 32(4–6), 711–719.
- Ikeda, N., Kondo, Y., & Yamashita, H. (1965). Determination of the Rare Earth Elements in Hot Spring Water by the Radioactivation Method. *Radioisotopes*, 14(5), 357–362. https://doi.org/https://doi.org/10.3769/radioisotopes.14.5_357 detalle
- Ikeda, N., & Takahashi, N. (1978). Neutron activation analysis of the rare earth elements in Nasu hot springs. *Radioisotopes*, 27(6), 300 – 305. https://doi.org/10.3769/radioisotopes.27.6_300
- International Energy Agency. (2024). The Future of Geothermal Energy (IEA). In *IEA Publications* (Issue Diciembre). http://www.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/structure_outcome.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). *Stats Tool IRENA* (IRENA, 2025). <https://www.irena.org/Data/Downloads/Tools>

- James, R. H., Elderfield, H., & Palmer, M. R. (1995). The chemistry of hydrothermal fluids from the Broken Spur site, 29 N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(4), 651–659.
- Jochum, K. P., Hofmann, A. W., & Seufert, H. M. (1993). Tin in mantle-derived rocks: constraints on Earth evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(15), 3585–3595.
- Kamran, M., Raugei, M., & Hutchinson, A. (2023). Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 4, 100068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100068>
- Keppler, H. (2017). Fluids and trace element transport in subduction zones. *American Mineralogist*, 102(1), 5 – 20. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5716>
- Kikawada, Y., Kakihana, H., Oi, T., Honda, T., & Ossakada, T. (1993). Lanthanoid abundances of acidic hot spring and crater lake waters in the Kusatsu-shirane volcano region, Japan. *Geochemical Journal*, 27, 19–33.
- Klimm, K., Blundy, J. D., & Green, T. H. (2008). Trace element partitioning and accessory phase saturation during H₂O-saturated melting of basalt with implications for subduction zone chemical fluxes. *Journal of Petrology*, 49(3), 523 – 553. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn001>
- Klinkhammer, G. P., Elderfield, H., Edmond, J. M., & Mitra, A. (1994). Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23), 5105–5113. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90297-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90297-6)
- Kong, Y., Pan, S., Ren, Y., Zhang, W., Wang, K., Jiang, G., Cheng, Y., Sun, W., Zhang, C., Shengbiao, H. U., & Lijuan, H. E. (2021). Catalog of Enhanced Geothermal Systems based on Heat Sources. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(6), 1882–1891. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14876>
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A., & Weisberg, M. K. (2014). Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (2nd ed., Vol. 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00102-9>
- Le Bert, G. H., Gutiérrez-Negrín, L. C., Quijano León, H. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S., & Hernandez Carrillo, I. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. *Informe Para*

- Lee, S., Chen, S., Lee, T. J., Kim, H., Lee, S. R., Choi, S. H., Ahn, U. S., & Lee, Y. S. (2025). *Eu isotope fractionation and hydrothermal alteration*. 1–9.
- Lewis, A. J., Komninou, A., Yardley, B. W. D., & Palmer, M. R. (1998). Rare earth element speciation in geothermal fluids from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4), 657–663. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00367-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00367-0)
- Lewis, A. J., Palmer, M. R., Sturchio, N. C., & Kemp, A. J. (1997). The rare earth element geochemistry of acid-sulphate and acid-sulphate-chloride geothermal systems from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(4), 695–706. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00384-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00384-5)
- Lindal, B. (1974). Geothermal Energy for Process Use. *Proceedings of the International Conference on Geothermal Energy for Industrial, Agricultural, and Commercial-Residential Uses*, 16–42.
- Lintjewas, L., & Setiawan, I. (2018). Mobility of rare earth element in hydrothermal process and weathering product: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 12076.
- Lund, J. W., Bjelm, L., Bloomquist, G., & Mortensen, A. K. (2008). Characteristics, development and utilization of geothermal resources – a Nordic perspective. *International Union of Geological Sciences*, 31(1), 140–147. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2008/v31i1/019>
- Martínez-Jiménez, M., & Trigo-Rodríguez, J. M. (2013). Las condritas y sus componentes primigenios. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 21(3), 263–272. <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/283928/371873>
- Masuda, A. (1962). Regularities in variation of relative abundances of lanthanide elements and an attempt to analyze separation index patterns of some minerals. *J. Earth Sci. Nagoya Univ.*, 10, 173–187.
- Masuda, A., Nakamura, N., & Tanaka, T. (1973). Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(2), 239–248. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90131-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90131-2)
- McCleskey, R. B., Chiu, R. B., Nordstrom, D. K., Campbell, K. M., Roth, D. A., Ball, J. W., &

- Plowman, T. I. (2014). Water-chemistry data for selected springs, geysers, and streams in Yellowstone National Park, Wyoming, beginning 2009. *US Geological Survey Open-File Report*, 2, 382.
- McDonough, W. F., & Sun, S.-S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4), 223–253.
- McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Geochemistry and Mineralogy*, 21(1), 169–200.
- McLennan, S. M., & Ross Taylor, S. (2012). Geology, Geochemistry and Natural Abundances. In *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2004](https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2004)
- Michalzik, D., Meisel, M., & Steffahn, J. (2016). Uso geotérmico de pozos de petróleo y gas abandonados. Reporte de campo: Alemania; Revista Ciencia UANL, Vol. 19, No. 82. *Ciencia UANL*; ISSN 2007-1175, 19(82), 46–51.
- Michard, A., Michard, G., Stüben, D., Stoffers, P., Cheminée, J. L., & Binard, N. (1993). Submarine thermal springs associated with young volcanoes: The Teahitia vents, Society Islands, Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(21–22), 4977–4986. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(05\)80003-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(05)80003-1)
- Mills, R. A., & Elderfield, H. (1995). Hydrothermal activity and the geochemistry of metalliferous sediment. *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*, 91, 392–407.
- Moeck, I., Bendall, B., Minnig, C., Manzella, A., & Yasukawa, K. (2020). Geothermal Play Typing- Current Development and Future Trends of a Modern Concept for Geothermal Resources Assessment. *Proceedings World Geothermal Congress, November 2019*, 1–6.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Möller, P. (2000). Rare Earth Elements and Yttrium as Geochemical Indicators of the Source of Mineral and Thermal Waters. In I. Stober & K. Bucher (Eds.), *Hydrogeology of Crystalline Rocks* (pp. 227–246). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1816-5_10
- Möller, P., Bau, M., Dulski, P., & Lüders, V. (1998). REE and yttrium fractionation in fluorite and their bearing on fluorite formation. *Proc 9th Quadr IAGOD Symp*, 575–592.

- Möller, P., Dulski, P., & Morteani, G. (2003). Partitioning of rare earth elements, yttrium, and some major elements among source rocks, liquid and vapor of Larderello-Travale Geothermal Field, Tuscany (Central Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(2), 171 – 183. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01054-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01054-2)
- Morgan, J. W. (1985). Osmium isotope constraints on Earth's late accretionary history. *Nature*, 317(6039), 703–705.
- Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). *METHODS FOR REGIONAL ASSESSMENT RESOURCES OF GEOTHERMAL The critical dependence of modern society on minerals and fuels has fostered an increasing awareness of the need to estimate not only the quantities that could be produced under present economic cond.* 7, 53–89.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757–775.
- Nicholson, K. (1993). Geothermal systems. In *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques* (pp. 1–18). Springer.
- Nkinyam, C. M., Ujah, C. O., Asadu, C. O., & Kallon, D. V. V. (2025). Exploring geothermal energy as a sustainable source of energy: A systemic review. *Unconventional Resources*, 6(July 2024), 100149. <https://doi.org/10.1016/j.uncre.2025.100149>
- NOMENCLATURE OF INORGANIC CHEMISTRY IUPAC Recommendations 2005 IUPAC Periodic Table of the Elements Fm No.* (2005).
- Noriun, J. C., Larry, A., & In, H. A. B. (1968). *norman1968 - The geochemistry of Sc.* 32(6).
- Palme, H. (1988). Chemical abundances in meteorites. In G. Klare (Ed.), *Reviews in Modern Astronomy* (pp. 28–51). Springer.
- Palme, H., Suess, H. E., & Zeh, H. D. (1981). Abundances of the elements in the solar system: The solar system. In K.-H. Hellwege (Ed.), *Astronomy, Astrophysics. Extension and Supplement I. Subvolume a.* (pp. 257–272). Springer.
- Pandarínath, K., García-Soto, A. Y., Santoyo, E., Guevara, M., & Gonzalez-Partida, E. (2020). Mineralogical and geochemical changes due to hydrothermal alteration of the volcanic rocks at Acoculco geothermal system, Mexico. *Geological Journal*, 55(9), 6508–6526. <https://doi.org/10.1002/gj.3817>

- Parri, R., Lazzeri, F., & Cataldi, R. (2016). Larderello: 100 years of geothermal power plant evolution in Italy. In *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100337-4.00019-X>
- Piper, D. Z., & Bau, M. (2013). Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*, 4(10), 69–83.
- Prol-Ledesma, R. M., & Morán-Zenteno, D. J. (2019). Heat flow and geothermal provinces in Mexico. *Geothermics*, 78(November 2018), 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.009>
- Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2006). Guidelines for Systematic Review in Conservation and Environmental Management. *Conservation Biology*, 20(6), 1647–1656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Raos, S., Ilak, P., Rajšl, I., Bilić, T., & Trullenque, G. (2019). Multiple-criteria decision-making for assessing the enhanced geothermal systems. *Energies*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/en12091597>
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2008). Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R. In *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. <https://doi.org/10.1002/9780470987605>
- Reinhardt, T., Johnson, L. A., Popovich, N., & Doe, U. (2011). Systems for Electrical Power From Coproduced and Low Temperature Geothermal Resources. *PROCEEDINGS, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Rendón Rojas, M. Á. (2017). *Introducción a la teoría de conjuntos, los operadores booleanos y la teoría del concepto para profesionales de la información documental*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones
- Rétif, J., Zalouk-Vergnoux, A., Briant, N., & Poirier, L. (2023). From geochemistry to ecotoxicology of rare earth elements in aquatic environments: Diversity and uses of normalization reference materials and anomaly calculation methods. *Science of the Total Environment*, 856(July 2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158890>
- Rocholl, A., & Jochum, K. P. (1993). Th, U and other trace elements in carbonaceous chondrites: Implications for the terrestrial and solar-system Th/U ratios. *Earth and Planetary Science*

Letters, 117(1–2), 265–278.

Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.

Rubin, A. E., & Grossman, J. N. (2010). Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(1), 114–122. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>

Rudnick, R. L., & Gao, S. (2013). Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (2nd ed., Vol. 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>

Ruiz, L. E. G., Gonzalez-Partida, E., Monroy, V. H. G., Martinez, L., Pironon, J., Díaz-Carreño, E., Yáñez-Dávila, D., Rojas, W. R., & Romero-Rojas, M. C. (2015). Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.

Sáez Puche, R., Cascales, C., Porcher, P., & Maestro, P. (2000). Tierras raras: materiales avanzados. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (pp. 11–26). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=866718>

Sanada, T., Takamatsu, N., & Yoshiike, Y. (2006). Geochemical interpretation of long-term variations in rare earth element concentrations in acidic hot spring waters from the Tamagawa geothermal area, Japan. *Geothermics*, 35(2), 141 – 155. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.02.004>

Santos-Raga, G., Santoyo, E., Almirudis, E., Guevara, M., & Yáñez-Dávila, D. (2020). Study of the Water-Rock-Interaction Processes in the Hidden Geothermal System of Acoculco Puebla (México) by using a Geochemometric Modeling. *Proceedings of the World Geothermal Congress, 2019*, 1–8.

Santos-Raga, G., Santoyo, E., Guevara, M., Almirudis, E., Pérez-Zárate, D., & Yáñez-Dávila, D. (2021). Tracking geochemical signatures of rare earth and trace elements in spring waters and outcropping rocks from the hidden geothermal system of Acoculco, Puebla (Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106798>

Santoyo-Gutiérrez, E., & Torres-Alvarado, I. S. (2010). Escenario Futuro De Explotación De La Energía Geotérmica: Hacia Un Desarrollo Sustentable. *Digital Universitaria*, 11, 26.

<http://posgrado.ier.unam.mx/static/admission/geotermia/Geotermia-guia-2.pdf>

- Schmidt, K., Koschinsky, A., Garbe-Schönberg, D., de Carvalho, L. M., & Seifert, R. (2007). Geochemistry of hydrothermal fluids from the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field, 15 N on the Mid-Atlantic Ridge: Temporal and spatial investigation. *Chemical Geology*, 242(1–2), 1–21.
- Shakeri, A., Ghoreyshinia, S., Mehrabi, B., & Delavari, M. (2015). Rare earth elements geochemistry in springs from Taftan geothermal area SE Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 49 – 61. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.023>
- Shoedarto, R. M., Tada, Y., Kashiwaya, K., Koike, K., & Iskandar, I. (2022). Advanced characterization of hydrothermal flows within recharge and discharge areas using rare earth elements, proved through a case study of two-phase reservoir geothermal field, in Southern Bandung, West Java, Indonesia. *Geothermics*, 105(April), 102507. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102507>
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Dehghani-Sanij, A. R., Nokhosteen, A., Ahmadi-Joughi, A., Gharali, K., Mahbaz, S. B., & Dusseault, M. B. (2019). A comprehensive review of geothermal energy evolution and development. *International Journal of Green Energy*, 16(13), 971–1009. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1650047>
- Steingrímsson, B., Gunnlaugsson, E., Saemundsson, K., Axelsson, G., & Ísor, G. (2022). *Nature and Classification of Geothermal Resources*. 7(1990), 3–17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00118-7>
- Stober, I., & Bucher, K. (2021). Geothermal energy: From theoretical models to exploration and development. In *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development* (Segunda ed). Springer Nature Switzerland AG 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71685-1>
- Sturchio, N. C., Muehlenbachs, K., & Seitz, M. G. (1986). Element redistribution during hydrothermal alteration of rhyolite in an active geothermal system: Yellowstone drill cores Y-7 and Y-8. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(8), 1619 – 1631. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90125-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90125-0)
- Suárez-Arriaga, M.-C., Bundschuh, J., & Samaniego, F. (2014). Assessment of submarine geothermal resources and development of tools to quantify their energy potentials for environmentally sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 83, 21–32.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.040>

Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42(1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>

Taylor, S. R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8), 1273–1285. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2)

Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*.

Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1988). Chapter 79 The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, 11, 485–578. [https://doi.org/10.1016/S0168-1273\(88\)11011-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1273(88)11011-8)

Taylor, S. R., McLennan, S. M., Armstrong, R. L., & Tarney, J. (1981). The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 301(1461), 381–399. <https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0119>

Tenzer, H. (2001). Development of hot dry rock technology. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 22(4), 14-22.

Think GeoEnergy. (2025). *Power Snapshot 2024 Key Highlights from the Global Geothermal Power Yearbook A free overview of the latest trends and developments in geothermal power* (Issue January).

U.S. Energy Information Administration. (2025). *Independent Statistic and Analysis*. Glossary. <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=C>

Uysal, I. T., Gasparon, M., Bolhar, R., Zhao, J. X., Feng, Y. X., & Jones, G. (2011). Trace element composition of near-surface silica deposits-A powerful tool for detecting hydrothermal mineral and energy resources. *Chemical Geology*, 280(1–2), 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.005>

Uzelli, T., Ayzit, T., & Baba, A. (2024). An Introduction to Geothermal Energy. In *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-93940-9.00180-8>

- Van Gosen, B., Verplanck, P., Seal Robert R., I. I., Long, K., & Gambogi, J. (2017). Rare-earth elements. In K. Schulz, DeYoung Jr., I. I. Seal Robert R., & D. Bradley (Eds.), *Professional Paper*. <https://doi.org/10.3133/pp1802O>
- Verma, S. P. (2012). *Geochemometrics*. 276–298.
- Verma, S. P. (2019). Road from Geochemistry to Geochemometrics. In *Road from Geochemistry to Geochemometrics*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9278-8>
- von Rosing, M., & Foldager, U. (2024). Green power: Renewable energy types and sources. In *The Sustainability Handbook, Volume 1: The Body of Knowledge around Substantial Sustainability Innovation* (Vol. 1). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90110-9.00005-2>
- Wakita, H., Rey, P., & Schmitt, R. A. (1971). Abundances of the 14 rare-earth elements and 12 other trace elements in Apollo 12 samples: five igneous and one breccia rocks and four soils. *Proceedings of the Lunar Science Conference, Vol. 2, p. 1319, 2, 1319*.
- Walker, R. J., & Morgan, J. W. (1989). Rhenium-osmium isotope systematics of carbonaceous chondrites. *Science*, 243(4890), 519–522.
- Wang, C. (2023). Theory and Application of Rare Earth Materials. In *Theory and Application of Rare Earth Materials*. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4178-8>
- Wasson, J. T., & Kallemeyn, G. W. (1988). Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 325(1587), 535–544.
- Weydt, L. M., Lucci, F., Lacinska, A., Scheuvers, D., Carrasco-Núñez, G., Giordano, G., Rochelle, C. A., Schmidt, S., Bär, K., & Sass, I. (2022). The impact of hydrothermal alteration on the physiochemical characteristics of reservoir rocks: the case of the Los Hornos geothermal field (Mexico). In *Geothermal Energy* (Vol. 10, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00231-5>
- White, D. E. (1973). Characteristics of geothermal resources. *Geothermal Energy, Stanford University Press, Stanford*, 69–94.
- Williams, C. F., Reed, M. J., & Anderson, A. F. (2011). Updating the classification of geothermal resources. *Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 191, 7.

- Willson, M. (1989). Igneous petrogenesis. A global tectonic approach. In *Unwin Hyman, London*, 466 p. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>.
- Wood, S. A. (2006). Rare earth element systematics of acidic geothermal waters from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1-3 SPEC. ISS.), 424 – 427. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.11.023>
- Wood, S. A., & Shannon, W. M. (2003). Rare-earth elements in geothermal waters from Oregon, Nevada, and California. *Journal of Solid State Chemistry*, 171(1–2), 246–253. [https://doi.org/10.1016/S0022-4596\(02\)00160-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4596(02)00160-3)
- Xiao, Z., Wang, S., Qi, S., Kuang, J., Zhang, M., Tian, F., & Han, Y. (2020). Petrogenesis, Tectonic Evolution and Geothermal Implications of Mesozoic Granites in the Huangshadong Geothermal Field, South China. *Journal of Earth Science*, 31(1), 141–158. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1242-9>
- Xin, S., Liang, H., Hu, B., & Li, K. (2012). A 400 kW geothermal power generator using co-produced fluids from Huabei oilfield. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 36 1, 219–223.
- Yongliang, X., & Yusheng, Z. (1991). The mobility of rare-earth elements during hydrothermal activity: A review. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(4), 295–306. <https://doi.org/10.1007/BF02841090>
- Zepf, V. (2013). Rare Earth Elements: What and where they are. In *Rare earth elements: a new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets* (pp. 11–39). Springer.