



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Criticidad de Materiales y Análisis Exergético de
Generación de Energía Directa de Fuentes
Renovables: Bioenergía, Solar Térmica y Geotérmica

Autor

Miguel Alejandro Velarde Rocha

Directora

Alicia Valero Delgado

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA EINA

2015-2016

Criticidad de Materiales y Análisis Exergético de Generación de Energía Directa de Fuentes Renovables: Bioenergía, Solar Térmica y Geotérmica

RESUMEN

La generación de energía térmica directa ha ido creciendo significativamente en los últimos 20 años creando una presión y necesidad de acelerar el despliegue de tecnologías avanzadas de energía limpia, con bajas emisiones e impactos negativos al ambiente, con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles, disminuir las emisiones de carbono y crear una visión sostenible.

En este trabajo se van a presentar las tecnologías predominantes de generación de energía directa para el recurso geotérmico, solar térmico y bioenergético. Realizando una revisión de fuentes oficiales, se establecerá la capacidad instalada o producción energética en los últimos años y los escenarios que se esperan para los próximos 35 años. Obteniendo del análisis de tendencias valores de suministro bioenergético de 160 EJ, una potencia esperada en solar térmica total de 7.317 GW_t y en geotérmica cercana a 800 GW_t para el año 2050.

A continuación se realizará la caracterización de los materiales involucrados de las tecnologías más importantes, con el fin de conocer los materiales clave y determinar la evolución de la cantidad de demanda anual y acumulada.

Conociendo la demanda de materiales para el 2015-2050 y considerando valores de reciclaje, se identificarán los posibles cuellos de botella y las limitaciones físicas debido a la utilización de las tecnologías, mediante la comparación de la producción esperada de materiales utilizando una tendencia similar a la curva de Hubbert. De este modo, se determinarán todas las posibles restricciones de las tecnologías analizadas, donde los elementos más demandados son el Al, Cu, Ni, y Mo para el aprovechamiento geotérmico y solar térmico, mientras que para bioenergía se tienen elementos claves como el K y P, siendo éste último el que corre más peligro de abastecimiento pudiendo limitar el crecimiento esperado y llegando a competir con otros sectores demandantes.

Se realizará la comparación de la cantidad de materiales necesarios para el desarrollo de las tecnologías con las reservas actuales, de esa manera, se tendrá una visión global del impacto que supone el despliegue del aprovechamiento de generación de energía directa, concluyendo que el porcentaje demandado entre los años 2016-2050 respecto a las reservas (el escenario menos optimista) para el P y K en bioenergía es del 3% y 14% respectivamente, para solar térmica el Cu con el 3,4% (sin considerar elementos de aleación del acero) y para geotérmica el Ni con el 0,5%.

Finalmente, se realizará el análisis exergético de materiales mediante el enfoque propuesto por Valero *et al.* (2014) que proporciona un análisis más exhaustivo y riguroso que la herramienta comúnmente usada del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Es decir, que no solo se considerará el estudio de los componentes de la cuna a la tumba “cradle-to-grave”, sino también el estudio de la tumba a la cuna “grave-to-cradle” que incluye el coste de reposición de los minerales, ofreciendo una visión de la criticidad de los recursos minerales que entran en juego usando la termodinámica. Llegando a establecer, desde el punto de vista de su contenido en materiales a través del concepto rarity, que la tecnología más insostenible es la bomba de calor geotérmica (GSHP) con 5.712 GJ/MW, en segundo lugar el colector solar de placa plana (FPC) con 3.156 GJ/GW y por último el colector de tubos de vacío (ETC) 2.769 GJ/MW. De la misma manera, el combustible más insostenible teniendo en cuenta la relación del valor de exergía respecto al PCI es el biodiésel con 2,3 GJ/GJ.

Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad ZaragozaDECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./Dª. Miguel Alejandro Velarde Rocha,con nº de DNI 6763229 en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster Universitario en Energías Renovables y E.E., (Título del Trabajo)Criticidad de Materiales y Análisis Exergético de Generación de Energía Directa
de Fuentes Renovables: Bioenergía, Solar Térmica y Geotérmica

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de Noviembre de 2016


Fdo: _____

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción.	8
2. Objetivos	10
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3. Metodología.	10
3.1 Análisis exergético.....	11
3.1.1 Análisis exergético y su aplicación en la evaluación de recursos minerales.....	12
3.1.2 Metodología para la determinación del Coste Exergético de Reposición.	12
3.1.3 Coste Exergético Unitario.....	13
3.2 Futura producción de materiales.....	16
4. Bioenergía.	17
4.1 Recurso y producción mundial.....	17
4.2 Tecnologías de conversión.	18
4.3 Tendencias hacia el año 2050 en bioenergía.	19
4.4 Materias primas involucradas en bioenergía.....	20
4.4.1 Leña.	20
4.4.2 Carbón.....	21
4.4.3 Bioetanol	21
4.4.4 Biodiésel	22
4.5 Resultados.....	24
4.5.1 Análisis de tendencias.....	24
4.5.2 Evolución de la demanda de materias primas.....	24
4.5.3 Evaluación de la posible escasez de los materiales en bioenergía.....	26
5. Energía solar.....	29
5.1 Recurso y producción mundial.....	29
5.2 Uso de la energía solar.....	30
5.3 Tendencias hacia el 2050 del uso de la energía solar.....	31
5.4 Materiales involucrados en energía solar.....	32
5.5 Resultados.....	34
5.5.1 Evolución de la generación térmica solar.....	34
5.5.2 Caracterización de materiales en solar térmica.....	34
5.5.3 Cantidad de materiales en uso (stock in use)	35
5.5.4 Evaluación de la posible escasez de los materiales.....	36
5.5.5 Análisis de la rareza termodinámica por tipo de colector solar.....	38
6. Energía geotérmica.....	41

6.1 Recurso y producción mundial.....	41
6.2 Uso directo de la energía geotérmica.	43
6.3 Tendencias hacia el 2050 del uso directo de la energía geotérmica.	44
6.4 Materiales involucrados en energía geotérmica.....	45
6.5 Resultados.	47
6.5.1 Análisis de tendencias.	47
6.5.2 Evolución de la potencia en bombas de calor geotérmicas.....	47
6.5.3 Caracterización de materiales en bombas de calor (GSHP).	49
6.5.4 Cantidad de materiales en uso (stock in use).	50
6.5.5 Evaluación de la posible escasez de los materiales.	51
6.5.6 Análisis de la rareza termodinámica de las bombas de calor geotérmicas	52
7. Conclusiones.....	53
8. Referencias.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Suministro total de energía primaria a nivel mundial en EJ, 2013 (TPES). Elaboración propia a partir de [2].	8
Figura 2: Materiales críticos según la CE para el año 2014 [8].	9
Figura 3: Energía requerida para la producción de cobre en función de la ley del mineral. (Fuente: adaptado por [9] de [22])	14
Figura 4: Titanio y Plomo (ton) (Datos actualizados de [10])	16
Figura 5: Suministro total de energía primaria de la biomasa a nivel mundial [2].	17
Figura 6: Materia prima utilizada para el biodiésel producido en 2008 en la UE y el resto del mundo (ktoe) [47].	23
Figura 7: Análisis de tendencias hasta el 2050 en bioenergía. Fuente: Elaboración propia en base a datos de [4], [25], [26] y [2].	24
Figura 8: Valores reportados del 2000 al 2015 y proyección hasta el 2050 de leña y carbón....	24
Figura 9: Valores reportados del 2000 al 2015 y proyección hasta el 2050 de bioetanol y biodiésel.	25
Figura 10: Proyección al 2050 de la demanda de P en bioenergía.	25
Figura 11: Proyección al 2050 de la demanda de K en bioenergía.	26
Figura 12: Evolución de la demanda de P respecto a las tendencias de producción.....	26
Figura 13: Evolución de la demanda de K respecto a las tendencias de producción.	27
Figura 14: Demanda (2016-2050)/Reservas y Demanda (2016-2050)/Recursos.....	28
Figura 15: Comparación exergética de combustibles (GJ/GJ).....	28
Figura 16: Mapa satelital del recurso solar [5].....	29
Figura 17: Capacidad Total en $[GW_t]$; $[GW_e]$ y producción en $[TWh_t]$; $[TWh_e]$ para finales 2012 [54].	29
Figura 18: Distribución a nivel mundial del total de la capacidad instalada en operación, fines 2012 [54].	31

Figura 19: Distribución de colectores en Europa, fines 2012 [54].	31
Figura 20: Países líderes de potencia acumulada en MWt. [54],[58],[59].	31
Figura 21: Visión del uso solar directo para el 2050 (EJ/año) [28].	32
Figura 22: Proyección de la potencia acumulada en solar térmica por tipo de colector (GW_t).	34
Figura 23: Evolución de la cantidad de Fe y Cu acumulado para el total solar de térmica, stock in use. (Ton/año).	36
Figura 24: Evolución de la cantidad de Al, Mo y Ni acumulado para el total de solar térmica, stock in use. (Ton/año).	36
Figura 25: Comparación demandada mundial de Cu, Cr, Mo y Ni respecto a la proyección de producción.	37
Figura 26: Resto de materiales demandados mundialmente respecto a la proyección de producción desde el 2015 al 2050.	38
Figura 27: 2016-2050 Demanda/Reservas y Demanda/Recursos.	38
Figura 28: Comparación entre masa y exergía-rarity en un absorbedor FPC.	39
Figura 29: Comparación entre masa y exergía-rarity en un absorbedor ETC.	39
Figura 30: Comparación entre masa y exergía-rarity acumulativa en FPC (%).	40
Figura 31: Comparación entre masa y exergía-rarity acumulativa en ETC (%).	40
Figura 32: Vista global de la energía geotérmica [67].	41
Figura 33: Recurso geotérmico [1].	41
Figura 34: Potencia instalada y producción anual del uso directo de la energía geotérmica [6].	42
Figura 35: Aplicaciones de la energía geotérmica [68].	43
Figura 36: Comparación a nivel mundial del uso de la energía geotérmica directa en TJ/año [6].	44
Figura 37: Uso directo de Energía Geotérmica y crecimiento de GHSPs (2050) [55].	44
Figura 38: Funcionamiento bomba de calor [71].	45
Figura 39: Análisis de tendencia bombas de calor geotérmicas. (Fuente: Elaboración propia en base a datos de [70], [55], [1] y [26].)	47
Figura 40: Proyección de la potencia acumulada en GSHP (MW_t).	47
Figura 41: Proyección de la nueva potencia a instalar por año en GSHP (MW_t).	48
Figura 42: Proyección de la repotenciación en GSHP (MW_t).	48
Figura 43: Proyección de la potencia anual esperada a instalar en GSHP (MW_t).	49
Figura 44: Evolución de la cantidad de Fe, Al y Cu acumulada para GSHP, stock in use. (kTon/año).	50
Figura 45: Evolución de Pb y Ni acumulada para GSHP, stock in use. (kTon/año).	50
Figura 46: Evolución de la demanda de Cu y Ni respecto a las tendencias de producción.	51
Figura 47: Evolución de la demanda de Mo, Pb y Zn respecto a las tendencias de producción.	51
Figura 48: Demanda (2016-2050)/Reservas y Demanda (2016-2050)/Recursos.	52
Figura 49: Comparación entre masa y exergía para GSHP (%).	52
Figura 50: Comparación entre masa y exergía acumulativa (%).	53
Figura 51: Evolución de las tecnologías de generación térmica.	54
Figura 52: Comparación exérgica de tecnologías térmicas.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de concentración x_r , x_m y x_c para el cobre.	14
Tabla 2: Resumen de valores de exergía utilizados (GJ/ton).	15
Tabla 3: Valores de reciclaje por elemento [23].	15
Tabla 4: Valores de suministro total de bioenergía de diferentes fuentes.....	18
Tabla 5: Fuentes de suministro de bioenergía a nivel mundial, EJ [2].	18
Tabla 6: Tendencias estimadas al año 2050 por diferentes fuentes.....	19
Tabla 7: Fertilizantes por especies para suministro de leña.	20
Tabla 8: Fertilizantes por especies para suministro de carbón.....	21
Tabla 9: Rendimiento de las especies en la producción de bioetanol.	22
Tabla 10: Fertilizantes por litro de bioetanol para diferentes especies.....	22
Tabla 11: Fertilizantes por litro de biodiésel para diferentes especies.	23
Tabla 12: Valores de potencia y producción de diferentes fuentes.	30
Tabla 13: Usos de la energía solar.....	30
Tabla 14: Tendencias estimadas de uso directo de la energía geotérmica de diferentes fuentes.	32
Tabla 15: Inventario de materiales, [61], [62], [63], [64].	33
Tabla 16: Inventario de materiales en solar térmica, contribución en masa (g) por unidad de colector (típico) incluyendo HST y soporte.	35
Tabla 17: Diferencia de exergía entre colectores FPC y ETC.	40
Tabla 18: Líderes mundiales del uso directo de la energía geotérmica [6]	42
Tabla 19: Valores de potencia y producción de diferentes fuentes	43
Tabla 20: Tendencias estimadas de uso directo de la energía geotérmica de diferentes fuentes.	45
Tabla 21: Componentes detallados de una bomba de calor [71].	45
Tabla 22: Resumen de materiales GHSP.	46
Tabla 23: Contenido de materiales en GSHP.	49
Tabla 24: Rarity de una bomba de calor GSHP.....	53
Tabla 25: Comparación exergética de combustibles biomásicos.....	55
Tabla 26: Resumen de resultados.	56

ANEXOS

- Anexo I: Suministro de energía primaria hasta el consumo final de energía de todas las fuentes.
 Anexo II: Potencia instalada en geotérmica, solar térmica y suministro de biomasa por países.
 Anexo III: Datos de reservas y producción de materiales.
 Anexo VI: Datos históricos de producción de biocombustibles.

1. Introducción.

Las tendencias actuales en el suministro de energía han ido creciendo en los últimos años, desde el punto de vista económico, ambiental y social. Sin una acción decisiva, las emisiones relacionadas con la energía el dióxido de carbono (CO₂) será más del doble en 2050 y el aumento de la demanda de petróleo aumentará las preocupaciones sobre la seguridad del suministro [1]. Se debe cambiar el camino actual, pero va a tomar una revolución energética y las tecnologías energéticas de bajo carbono tendrán un papel crucial que desempeñar.

El sistema energético mundial está dominado por los combustibles fósiles. Carbón, petróleo y gas han sido los principales contribuyentes al suministro de energía. A pesar de que las fuentes de energía renovables han cobrado impulso en los últimos años, todavía, más del 80% de la demanda de energía es satisfecha por fósiles.

Desde el año 2000, la demanda de energía ha aumentado en un 35% hasta 567 EJ en el año 2013. Las energías renovables representan sólo el 13,8% del suministro de energía, el cual creció a una tasa anual del 2,75% mientras que la energía nuclear tenía una participación del 5% (Figura 1) y es el único recurso que ha disminuido la oferta desde el cambio de siglo [2].

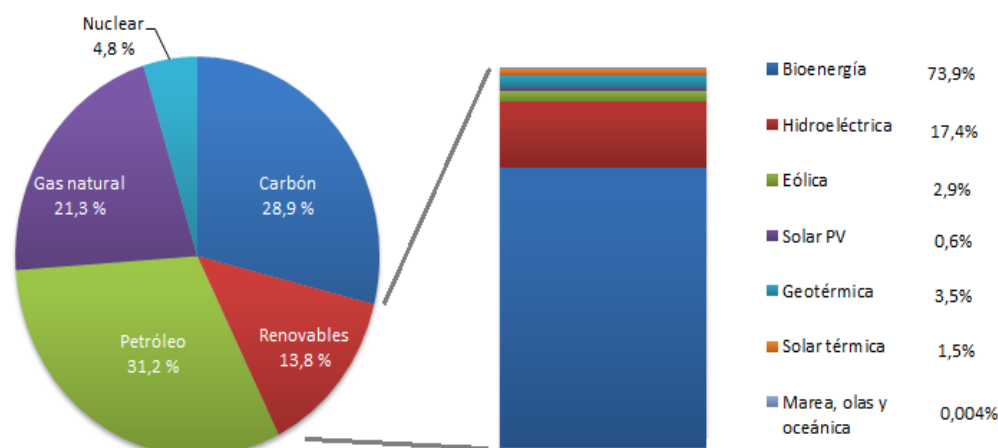


Figura 1: Suministro total de energía primaria a nivel mundial en EJ, 2013 (TPES). Elaboración propia a partir de [2].

De la Figura 1 se puede observar que las fuentes de suministro de energía directa más importantes son: la bioenergía, recurso solar y recurso geotérmico. El suministro total de energía a partir de renovables alcanza un valor de 78,1 EJ para el año 2013 (Anexo I). La tecnología líder es la bioenergía con 57,7 EJ con una tasa de crecimiento promedio de 3,13% en los últimos 5 años. Seguidamente se encuentra la energía hidroeléctrica la cual dispone un suministro de 13,6 EJ.

La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede proporcionarse como combustible sólido, líquido o gaseoso y puede utilizarse para generación de electricidad, combustibles para transporte y para generación de calor directa. La producción primaria anual añade aproximadamente 120×10^{15} g de biomasa residual seca mientras que la demanda mundial de bioenergía para el año 2010 era de 55 EJ [3],[4].

En lo que respecta al aprovechamiento de energía solar directa, se cuenta con una potencia instalada para el año 2012 de aproximadamente 230 GW_t, produciendo una energía reportada

de 281 TWh [5]. Comparado con otras formas de energía renovable, sin contemplar las energías tradicionales como la biomasa o hidroeléctrica, el uso directo de la energía solar se posiciona en segundo lugar después de la energía eólica, donde se debe mencionar que en potencia instalada la solar es la líder y con un amplio potencial de crecimiento.

La capacidad total instalada para el aprovechamiento de energía geotérmica, reportada a finales del año 2014 para energía total directamente utilizada, es de 70.885 MW_t, un incremento de 46,2% respecto a los datos reportados en 2010, con un crecimiento promedio anual de 7,9%. La energía total utilizada corresponde a 592.638 TJ (164.635 GWh), lo que indica un incremento del 39,8% respecto del 2010 y un promedio de crecimiento anual de 6,9% [6].

Las fuentes de energías renovables se presentan a menudo como fuentes "limpias", sin considerar los impactos ambientales relacionados con su aprovechamiento, en el cual la utilización de tecnologías en los procesos de producción implica un consumo de energía y materias primas. Por otra parte, la instalación y fabricación de productos para proyectos con energías renovables no consideran los materiales clave para su futuro desarrollo. Estos materiales a veces no se consideran o no se estudian correctamente [7].

Sin energía no hay materiales y viceversa. Dada la creciente demanda de energía e instalación de renovables no es de extrañar que la necesidad de materiales haya crecido de manera similar. Algunos de estos materiales son considerados "críticos" según la Comisión Europea (CE) (ver Figura 2) y es dependiente de dos factores:

- **Importancia económica:** Importancia de un material por sector y la importancia del sector en la economía de la Unión Europea (UE) [8].
- **Riesgo de suministro:** Considerar la estabilidad económica y política, el nivel de producción y concentración, el potencial de sustitución y la tasa de reciclaje [8].

El listado de materiales críticos propuesto por la CE fue creado en el 2010 con 14 materiales y ha sido actualizado en el 2014, aumentando esta lista a 20 componentes; esto significa que no es lineal y varía con el contexto socioeconómico.

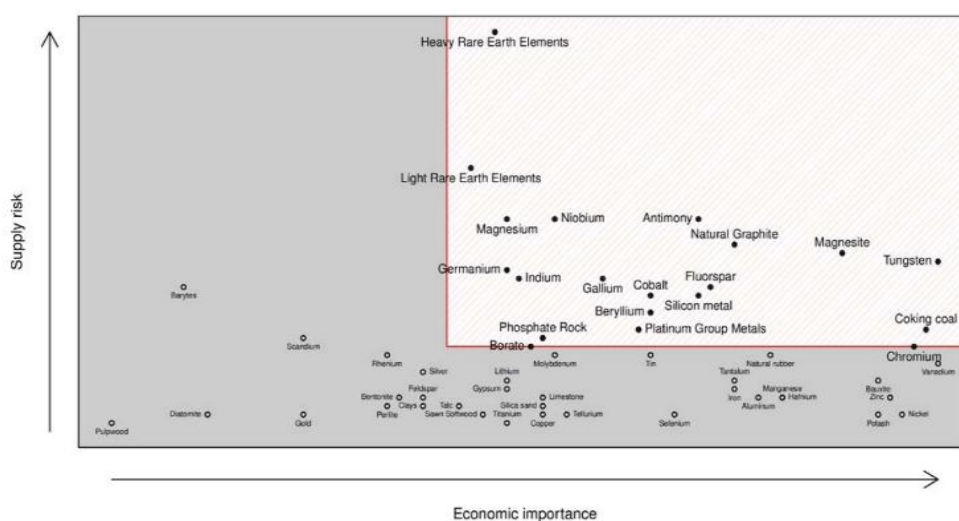


Figura 2: Materiales críticos según la CE para el año 2014 [8].

El presente trabajo tiene por objeto evaluar las restricciones en el abastecimiento físico de materiales para los principales recursos renovables de generación térmica directa. Algunos de estos materiales no han sido tenidos en cuenta como críticos por la CE considerando las tendencias hacia el 2050.

De esta manera surge la necesidad de estudiar y establecer los materiales, compuestos y sustancias clave que serán demandados y determinando si pueden presentarse cuellos de botella en el despliegue de la energía geotérmica, solar térmica y bioenergía.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Estudiar las restricciones físicas de materiales y realizar el análisis exergético de las tecnologías de generación térmica directa de los recursos renovables para establecer la sostenibilidad de las distintas alternativas desde el punto de vista de su contenido en materiales: bioenergía, solar y geotérmico.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer las tecnologías predominantes de generación térmica directa del recurso solar, geotérmico y bioenergía.
- Realizar la caracterización de materiales involucrados en las tecnologías predominantes.
- Evaluar la evolución estimada de la demanda de materiales de acuerdo con las reservas actuales y los valores históricos de producción y valores de reciclaje.
- Analizar la sostenibilidad de las tecnologías mediante la metodología de rareza (Rarity) termodinámica.
- Establecer la existencia de posibles restricciones físicas en el futuro desarrollo de la generación térmica directa de fuentes renovables.

3. Metodología.

Para poder elaborar la metodología propia de trabajo se ha realizado una amplia revisión bibliográfica (artículos científicos, informes, libros, entre otros).

En la primera parte se han consultado fuentes oficiales para determinar el estado del arte de las tecnologías a estudiar. Conocida la evolución de las tecnologías durante los últimos 20 años, se ha realizado un análisis de tendencias hacia el 2050.

En la segunda parte se ha realizado la caracterización de los materiales de las tecnologías y en un escenario “business as usual” se ha evaluado la demanda de materiales para poder establecer las restricciones físicas (criticidad) de suministro respecto a tendencias de producción, valores de reciclaje y la huella que representa respecto a las reservas.

Para finalizar, se ha realizado el análisis exergético de los materiales mediante la metodología de rareza termodinámica (Rarity), evaluando la cantidad rigurosa de exergía para reponer, extraer y refinar un mineral “particular” considerando su procedencia en la Naturaleza. De esa manera, se puede llegar a conocer las tendencias exergéticas de materiales

clave en la generación térmica directa de fuentes renovables. Además, de proporcionar una visión general de las implicaciones necesarias para lograr la sostenibilidad.

Ciertamente, la disponibilidad no se encuentra relacionada con la cantidad de los minerales incluidos en la corteza, ya que toda la corteza terrestre se compone de minerales que podrían ser finalmente extraídos. La disponibilidad de minerales está más bien relacionada con la accesibilidad, que a su vez está estrechamente conectada con el consumo de energía. Minería, transporte, trituración y molienda, fundición, refinación, etc. Todos ellos son procesos que requieren cantidades significativas de energía, que hoy en día provienen principalmente de recursos no renovables [9].

Para evaluar el impacto de los diferentes materiales usados, se ha utilizado la metodología desarrollada por: A.Valero y Al.Valero [10]. Esta metodología cubre todo el ciclo de vida, desde la cuna hasta la puerta y un enfoque desde la tumba hasta la cuna.

- **Enfoque cuna hasta la puerta (uso):** Evaluar el costo de exergía para producir un metal refinado desde la mina para ser utilizado en aplicaciones industriales.
- **Tumba a la cuna:** Evaluar el coste exergético de reposición para devolver las materias primas en un estado disperso, al estado inicial en las minas.

Esta metodología utiliza el concepto de rareza (Rarity) termodinámica [10]. El indicador de rareza termodinámica es una medida rigurosa de exergía en función a la naturaleza del mineral (calidad), teniendo en cuenta los aspectos físicos de los minerales naturales tales como la concentración, composición química, escasez y las necesidades de energía para refinar el mineral dado.

Con el enfoque descrito, se pretende dar una dimensión adicional a la criticidad de los minerales, resultando cruciales los aspectos físicos (escasez de la corteza e intensidad de energía para beneficiar un mineral y pueda ser finalmente utilizado) [10].

La dimensión que se pretende establecer no ha sido tomada en cuenta en las evaluaciones socioeconómicas mundiales, lo cual nos da una visión global de las restricciones físicas que debemos ser capaces de abordar.

A continuación se presentan algunos conceptos sobre la metodología del trabajo.

3.1 Análisis exergético.

Resulta claro que para la utilización final en la industria de cualquier mineral se requiere una cantidad apreciable de energía debido a que se realiza una cadena de procesos tales como: extracción del mineral, molienda, concentración, etc. Y debido a que los recursos no renovables no son regenerados contribuyen a acelerar el aumento natural de la entropía del planeta Tierra y éste tiende a un máximo [11].

Este cambio no es una cuestión de la cantidad de masa o energía de un sistema, sino de la calidad de esa materia o energía. Realizando todas estas consideraciones, se debe encontrar un indicador, una unidad de medida que nos ayude a estimar los efectos de la humanidad sobre la Naturaleza. Esta unidad es la exergía.

El índice de la calidad de energía ha sido denominado por Z. Rant [12] como *Exergía*, y puede ser definido como:

La exergía expresa la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un

sistema por la interacción espontánea entre éste y su ambiente de referencia.

3.1.1 Análisis exergético y su aplicación en la evaluación de recursos minerales.

La exergía de cualquier recurso natural se define como la energía mínima necesaria para producir una estructura específica y concentración a partir de materiales comunes en el entorno de referencia [9]. La exergía de un sistema proporciona una idea de su diferenciación con el medio ambiente. El caso de un depósito mineral es claro; tiene exergía debido a que los minerales contenidos en ella tienen una concentración y composición específica diferente del lecho de roca común. Por lo tanto, cuanto mayor sea el grado de un depósito mineral, más exergía será la que tiene [9]. También indica el mínimo trabajo teórico que hay que aportar al sistema para reconstruirlo desde el ambiente [13].

Para ser evaluada la exergía, se necesita un ambiente de referencia y dependiendo del sistema se puede tener más o menos exergía. Valero et al. proponen como referencia el llamado modelo “Tierra Crepuscular” de la llamada teóricamente Thanatia (de los Thanatos o muerte en griego) [14], [15]. Este estado representa el punto final de los materiales, es decir que todos los materiales disponibles se han extraído y dispersado, considerando que todos los combustibles fósiles se han consumido. El modelo considera 294 minerales, los más abundantes [9].

La exergía que se estimaría representa el mínimo termodinámico. Este mínimo está muy lejos de la realidad. De esa manera se debe corregir este valor, se realiza en función de la ley del mineral con el fin de calcular indicadores tales como el coste exergético de reposición y el coste exergético unitario, que nos permitiría evaluar los recursos minerales y tener una idea de lo lejos que se encuentra la industria minera de la sostenibilidad [9].

3.1.2 Metodología para la determinación del Coste Exergético de Reposición.

Se puede decir que la exergía de un recurso mineral (b_t) que está constituido por al menos 3 componentes: el primero asociado con la composición química (b_{ch}), el segundo con su concentración (b_c) y el tercero con el grado de cohesión (b_{com}) (despreciable respecto a los otros dos términos [15])¹. La exergía química (b_{ch}) puede ser calculada mediante un balance de la reacción de formación [12]:

$$b_{ch} = \Delta G_{Mineral} + \sum v_k b_{che,k}^o \quad (\text{kJ/mol})$$

Donde: $b_{che,k}^o$ es la exergía química estándar de los elementos que componen el mineral, v_k es el número de moles del elemento k en el mineral y $\Delta G_{Mineral}$ es la energía libre de Gibbs del mineral. Considerando que el Modelo Crepuscular de la Tierra contiene, en principio, la mayoría de los minerales que se encuentran en la corteza, la exergía química no aparecería, y sólo el componente de exergía de concentración (b_c) se usa para evaluar los recursos minerales [9].

La formación de la roca es un proceso físico, donde los sólidos (o minerales) se mezclan para formar un conglomerado [16]. La expresión general para el cálculo de la entropía

¹ No es despreciable al calcular el OTR (Over the rainbow)

generada en una mezcla de gases, sólidos y líquidos que se puede definir de la siguiente manera:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -n_1 R_u \int_P^{x_1 P} \frac{dP}{P} - n_2 R_2 \int_P^{x_2 P} \frac{dP}{P} = -R[n_1 \ln x_1 + n_2 \ln x_2] \text{ (kJ/K)}$$

Finalmente, para evaluar la exergía de un depósito mineral concentrado respecto a las condiciones de dispersión del Modelo Crepuscular, se utiliza la siguiente ecuación. La exergía de concentración representa la cantidad mínima de energía asociada con la concentración de una sustancia de una mezcla ideal de dos componentes [17]. Es decir, representa la energía estándar que implica la separación del recurso desde el depósito minero, que se define como exergía de concentración (b_c):

$$b_c = -RT^0 \left[\ln x_i + \frac{(1-x_i)}{x_i} \ln(1-x_i) \right] \text{ (kJ/mol)}$$

R es la constante universal de los gases ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol K), T^0 es la temperatura de referencia (298,15 K) y x_i es la concentración de la sustancia i. El valor de x_i [g/g] se sustituye por X_c o X_m para obtener sus respectivas exergías, b_c ($x = x_c$) y b_c ($x = x_m$), mientras que la diferencia entre ellos requiere Δb_c ($X_c \rightarrow X_m$) representa la energía mínima (exergía) para formar el mineral de la concentración en la corteza terrestre a la concentración de los depósitos minerales [9].²

De esa manera, la termodinámica proporciona la tendencia del comportamiento, pero esta ecuación no da valores ni siquiera cercanos a la realidad por considerar procesos extremadamente irreversibles. La verdadera energía requerida es de varios órdenes de magnitud mayor de lo que dicta la termodinámica de procesos reversibles. Es por eso que se debe corregir el valor, para eso se utiliza la definición de coste exergético unitario.

3.1.3 Coste Exergético Unitario.

En el anterior apartado se ha podido ver que la exergía total de un mineral para extraer respecto al ambiente de referencia (Thanatia) es igual a la exergía de concentración ($b_i = b_c$). La concentración de un mineral desde la calidad del mineral del depósito a su grado comercial implica el consumo de energía completamente diferente a la de concentrar el mineral desde el estado disperso de Thanatia a las condiciones originales de la mina. En otras palabras, desde el punto de vista teórico, el coste exergético de concentración de un mineral requeriría k veces la concentración mínima de exergía [9].

$$b_{ci}^* = k \cdot b_c$$

La variable k es adimensional y se denomina el coste exergético unitario. Representa la relación entre la energía acumulada verdadera requerida para llevar a cabo el proceso real para concentrar el mineral desde el depósito minero x_m hasta un grado de concentración comercial x_r con respecto a la mínima exergía termodinámica necesaria para lograr el mismo proceso, es decir ($\Delta b_{\text{mineral}}$) [9],[18].

² X_m : Concentración en el depósito minero (g/g), X_c : Concentración de referencia (g/g) y X_r : Concentración de refinado (g/g).

$$k = \frac{E_{(x_m \rightarrow x_r)}}{\Delta b(x_m \rightarrow x_r)}$$

El valor k puede definirse con estudios de ciclo de vida y es dependiente de factores como: ley de mineral, tipo de proceso de extracción, características propias de la mina y tecnología que se utiliza para la extracción hasta el refinamiento. Por lo tanto, el valor k es variable en el tiempo.

Teniendo en cuenta estas limitaciones y el tipo de datos disponibles para la minería (que suelen ser muy escasos [9]) en [9]³ se asume que la misma tecnología se aplica para el intervalo de concentración entre x_m ley de mineral en la mina y el x_r grado de refinación, al igual que entre el estado disperso de lo crepuscular x_c y x_m [9]. De esta manera, se lleva a cabo un análisis de la energía media frente a las tendencias de la ley del mineral para diferentes minerales, con el fin de calcular los valores correspondientes de los costes exergéticos unitarios y extrapolar a leyes de mineral iguales a los de las condiciones dispersas de Thanatia [9].

A continuación se presenta como ejemplo el comportamiento del coste exergético de reposición del cobre:

Tabla 1: Valores de concentración x_r , x_m y x_c para el cobre.

Concentración x_{cu}	(g/g)
Concentración refinado, x_r [19]	0,81
Concentración en mina, x_m [20]	1.67×10^{-2}
Concentración de referencia, x_c [21]	$6,64 \times 10^{-5}$

Elaboración Propia en base a datos proporcionados por [19], [20] y [21].

En la siguiente figura se muestra la tendencia para el cobre, donde se puede observar en el eje horizontal la ley del mineral (%) y en el eje vertical la cantidad de energía a utilizar (GJ/t):

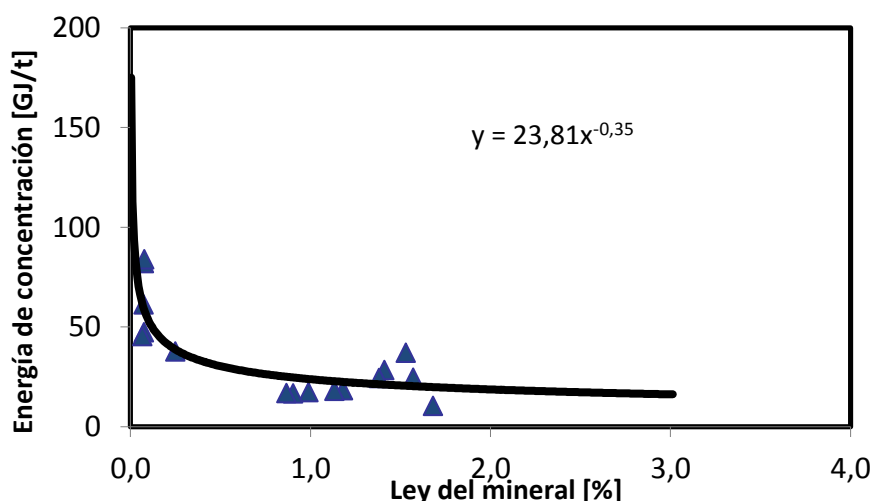


Figura 3: Energía requerida para la producción de cobre en función de la ley del mineral. (Fuente: adaptado por [9] de [22])

³ Valero et al. (2013)

Con la metodología descrita y los valores de x_m , x_r y x_c proporcionados en [19], se presenta en la siguiente tabla el resumen de los valores de rareza termodinámica para los materiales analizados en este trabajo.

Tabla 2: Resumen de valores de exergía utilizados (GJ/ton).

	ERC ⁴	EAC ⁵	Rarity
Al	627,24	10,5	637,74
As	400	9	409
Cr	4,54	0,1	4,64
Cu	291,7	35,3	327
Fe	17,75	0,7	18,45
K	1.224,2	3,1	1.227,3
Mn	15,64	0,2	15,84
Mo	907,91	136	1,043.91
Na	44,1	3,3	47,4
Ni	523,61	9,98	533,59
P	0,4	0,3	0,7
Pb	37	0,9	37,9
Sn	426	15,2	441,2
Ti	9	13,8	22,8
Zn	25	1,5	26,5

Valores actualizados de [10].

La rareza termodinámica es la suma de los costes exergéticos que se utiliza desde la cuna a la puerta y la tumba a la cuna. De esa manera se considera todo el ciclo de vida de los materiales.

La tasa de reciclaje de los materiales es importante al considerar el aprovisionamiento desde los depósitos mineros, puesto que mientras más materia prima se consiga reciclar, menor energía y minerales se necesitan extraer de las minas. La Tabla 3 muestra los porcentajes de reciclaje que intervienen en este estudio:

Tabla 3: Valores de reciclaje por elemento [23].

Elemento	Porcentaje de reciclaje	Elemento	Porcentaje de reciclaje
Al	36%	S	0%
Ca	0%	Si	0%
Cu	30%	Ni	29%
Mg	33%	Cr	20%
Na	0%	Mo	33%
K	0%	Ti	52%
Fe	50%	As	1%
C	0%	Pb	51%
Mn	37%	Sn	22%
P	0%	Zn	23%

⁴ Coste exergético de reposición.

⁵ Extracción y concentración.

3.2 Futura producción de materiales.

Los materiales en la corteza terrestre se presentan de manera finita. Finalmente la demanda agotará la oferta disponible y los materiales extraídos terminarán, en el mejor de los casos, dispersos [24].

Se debe predecir la producción de materiales y una opción es a través del llamado modelo de pico de Hubbert. En los años 50 del siglo pasado el científico estadounidense M. King Hubbert demostró que la evolución que experimenta la explotación de cualquier pozo petrolífero sigue una curva en forma de campana, llamada por ello también la “curva de Hubbert”.

El modelo de pico de Hubbert puede también ser utilizado para materiales y se basa en la tasa de extracción y la cantidad total de reservas disponibles. Es un modelo dinámico en términos de producción y generalmente genera curvas del tipo Gaussianas (forma de campana), teniendo en cuenta la producción actual y las estimaciones en el futuro respecto la cantidad de reservas.

Esta metodología también puede ser evaluada respecto a los recursos, en ese caso, la fecha del pico de producción se retrasaría. Es conveniente realizar tendencias con un método variable, debido a que los valores de reservas y recursos son datos dinámicos y varían en el tiempo en función a la factibilidad de la extracción, aumento o disminución de la extracción y el descubrimiento de nuevos depósitos mineros [24].

Como ejemplo, en la Figura 4 se presenta la tendencia de producción del Ti y el Pb (respecto a reservas) que tiene un comportamiento del tipo Hubbert:

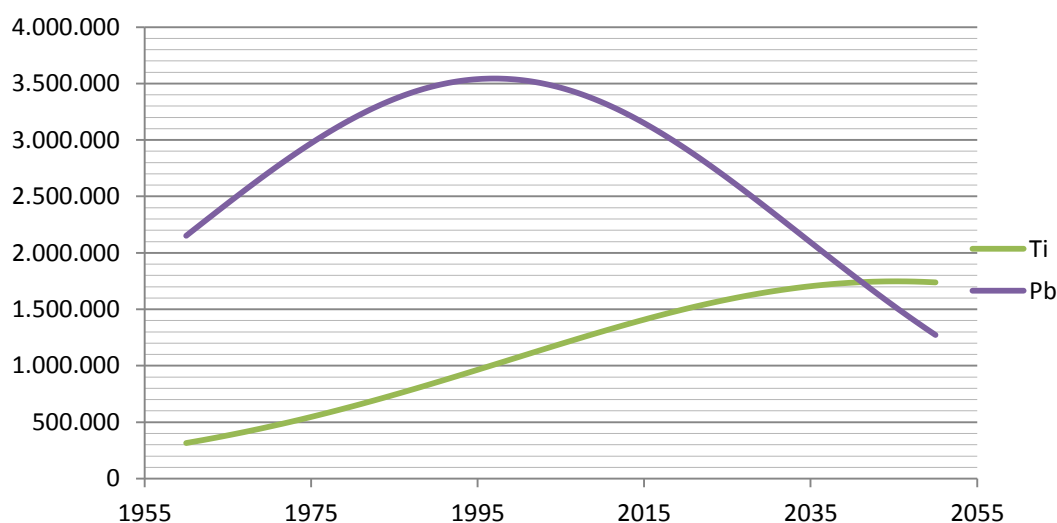


Figura 4: Titanio y Plomo (ton) (Datos actualizados de [10])

En el caso del Pb, el pico de producción ya se habría alcanzado en el año 1997 y para el Ti se llegaría a alcanzar el año 2045.

Se ha considerado el modelo de pico de Hubbert en este trabajo, debido a que muestra un enfoque directo y puede proporcionar un orden de magnitud del grado de agotamiento e información sobre posibles tendencias y límites futuros de los materiales. Los datos de producción de materiales pueden ser consultados en el Anexo III.

Con todos los pasos descritos en la metodología, a continuación se presenta el desarrollo de las tecnologías por grado de importancia en generación térmica.

4. Bioenergía.

4.1 Recurso y producción mundial.

La energía almacenada en la biomasa producida anualmente por las plantas terrestres es de 3 a 4 veces mayor que la actual demanda mundial de energía [4]. Se estima una producción actual de 120×10^5 g [3] de biomasa, la cual es acumulada como biocombustibles sólidos, leña, virutas de madera, pellets de madera y carbón.

El consumo mundial de carbón y leña permanece relativamente constante, pero el uso de virutas de madera y pellets de madera para la electricidad (biopower), generación y calefacción residencial se duplicó en la última década y se incrementarán de manera constante en el futuro. Los biocombustibles líquidos cubren bioetanol, biodiesel, pirólisis bioaceite, que son combustibles para el transporte. El biodiésel a partir de semillas oleaginosas alcanza la capacidad de producción de 21.463 millones de litros/año, con incrementos adicionales en función del desarrollo de nuevas materias primas [5].

En 2013, el suministro total de energía primaria a partir de la biomasa fue de 57,7 EJ, casi la mitad de ella está en Asia (ver Figura 5). Europa ha visto el mayor incremento anual de suministro de biomasa el período 2000 - 2013 con el 113% (ver anexo II) [2].

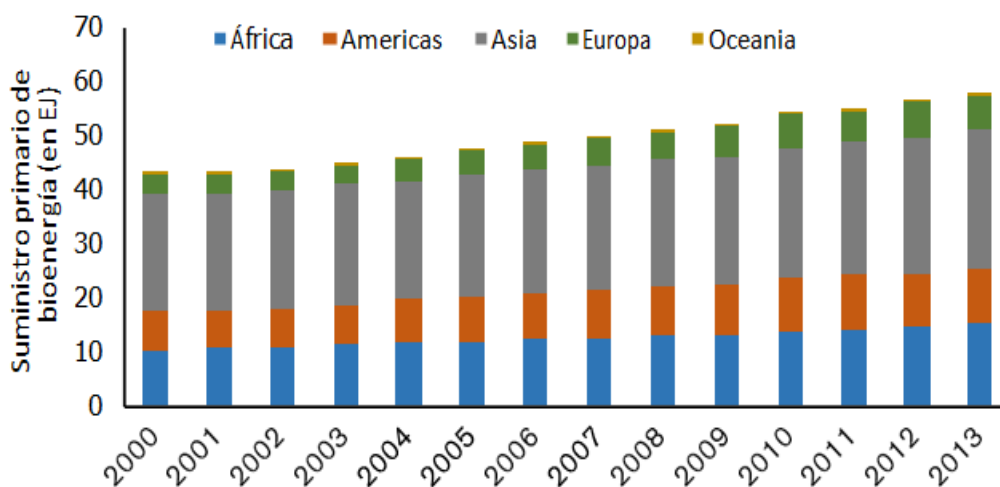


Figura 5: Suministro total de energía primaria de la biomasa a nivel mundial [2].

Mayoritariamente se utiliza el suministro global para usos tradicionales como cocinar, calentamiento de agua y calentamiento de ambientes. A continuación se establecen las cantidades de suministro por diferentes fuentes y organizaciones para conocer el estado actual de la bioenergía.

Tabla 4: Valores de suministro total de bioenergía de diferentes fuentes.

	IEA ⁶ [4]	WEC ⁷ [25]	IPCC ⁸ [26]	WBA ⁹ [2]
Año	2009	2010	2009	2013
Suministro (EJ/año)	50	50	50,3	57,7

4.2 Tecnologías de conversión.

Existen muchas maneras de obtención de bioenergía, las cuales se pueden utilizar para convertir materia prima de biomasa en bruto en un producto final de energía. Varias tecnologías de conversión se han desarrollado para que se adapten a la diferente composición química y la naturaleza física de la materia prima (diferentes especies del suministro), y para el uso final de la misma (calor, electricidad, combustible para el transporte). Las tecnologías de mejora de materias primas de biomasa (por ejemplo, peletización, la torrefacción y la pirólisis) se están desarrollando para convertir la biomasa voluminosa en sustancias de energía más densa y más práctica para el transporte, almacenamiento y uso más conveniente y eficiente.

La producción de calor por la combustión directa de la biomasa bruta es la tecnología líder como uso de bioenergía a nivel mundial y muchas veces compite en coste con la energía de origen fósil, representando para el 2010 el 10% de la energía primaria mundial [25].

El suministro de biomasa se puede clasificar en tres grandes sectores: forestal, la agricultura y los desechos, siendo el sector forestal el que más contribuye al suministro de biomasa [2]. En 2013, la proporción de la biomasa procedente del sector forestal estaba en 88% en su mayor parte en forma de combustibles leñosos (ver Tabla 5). El Carbón de leña fue la categoría de combustible segunda mayor al 10 % seguido de Black Liquor¹⁰ y biocombustibles a partir de cultivos energéticos.

Tabla 5: Fuentes de suministro de bioenergía a nivel mundial, EJ [2].

Sector	Combustible	Share	
Forestal	Leña	68%	88%
	Pellets	0,8%	
	Carbón de leña	10%	
	Residuos Forestales	1,8%	
	Black Liquor	6,8%	
	Residuos de la industria de la Madera	0,8%	
Agricultura	Bioetanol de granos	4%	9%
	Biodiesel de granos	2,1%	
	HVO ¹¹	0,3%	

⁶ IEA: Agencia Internacional de la Energía.

⁷ WEC: Consejo Mundial de la Energía.

⁸ IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

⁹ WBA: Asociación Mundial de la Bioenergía.

¹⁰ Black Liquor: Es un subproducto líquido espeso y oscuro del proceso de transformación de la madera en pulpa que luego se seca para hacer papel. Un ingrediente principal del black liquor es la lignina, que contiene la mayor parte del contenido energético de la madera.

¹¹ HVO (Hidrotreated Vegetable Oils): Consiste en hacer reaccionar el aceite vegetal con hidrógeno en presencia de un catalizador (hidrogenación) [27].

	Biogás de granos y animal	2,6%	
Residuos	Residuos Municipales	2,6%	3%

Independientemente del combustible a utilizar, la bioenergía está condicionada a la fase de cultivo de especies biomásicas.

4.3 Tendencias hacia el año 2050 en bioenergía.

Existen diferentes escenarios de predicción como uso final en bioenergía; dentro de ellas las decisiones claves incluyen: futuras políticas de cultivo, orientaciones globales o locales, afecciones al precio, producción de los productos fósiles y manejo de la sostenibilidad entre otros.

Las diferentes fuentes presentan escenarios de tendencias para el 2050, como por ejemplo la IEA nos da un valor de 160 EJ. para el 2050 donde podría representar cerca del 24% del suministro de energía primaria para calentamiento [4].

A continuación se presenta la Tabla 6, en la cual se resumen los valores de tendencias de producción de bioenergía para diferentes fuentes:

Tabla 6: Tendencias estimadas al año 2050 por diferentes fuentes.

	IEA. [28]		WEC. [25]		IPCC. [26]	
Año	2050.	2050.	2050.	2050.	2050.	2050.
			[A1]	[A2]	[B1]	[B2]
Producción anual total (EJ/año)	160	60-100	300	100	300	100

Los escenarios propuestos por el IPCC [26] corresponden a las siguientes consideraciones:

[A1]: Políticas de gobernación deficiente, resultados de alta demanda de energía, altos precios de la energía e impulso fuerte de la demanda de biomasa, supervisión limitada en la producción de biomasa y el uso, en gran parte impulsado por la demanda del mercado, mercados de bioenergía totalmente liberalizado, así como a la agricultura en su conjunto y fuerte desarrollo de la tecnología líder a una mayor demanda de productos bioquímicos y combustibles para el transporte.

[A2]: Políticas de gobernación deficiente, altos precios de los combustibles fósiles debido a la alta demanda y la innovación limitada, resultado de esto crece la demanda de biocombustibles para cubrir el consumo y aumento de la demanda de biomasa que afecta directamente al mercado de alimentos.

[B1]: Políticas de buena gobernación, políticas de sostenibilidad bien implementadas, mercados bioenergéticos desarrollados y países en desarrollo en transición a políticas de alta eficiencia.

[B2]: Políticas de buena gobernación, centrarse en las tecnologías de menor escala, la utilización de los residuos, los flujos de residuos y los planes de cultivo de menor escala y una gran variedad de esquemas específicos de cultivo local, comercio internacional de forma limitada y se mantienen las barreras comerciales.

4.4 Materias primas involucradas en bioenergía.

La producción de bioenergía en la actualidad y en el futuro, está prácticamente condicionada a la fase de cultivo, dependiendo de las especies cultivadas, el uso final de la biomasa será utilizada en las tecnologías expuestas en el apartado 4.2.

La fase de cultivo para el suministro de biomasa será estudiada en el presente documento, donde se pretende establecer los componentes más críticos del desarrollo de la bioenergía. En el desarrollo del cultivo se presentan 5 principales etapas: Preparación de la tierra, sembrado, aplicación de fertilizantes, aplicación de pesticidas e irrigación.

Considerando la clasificación de la Tabla 5, las principales tecnologías demandantes del uso final de la bioenergía desde el punto de vista del suministro son: La leña, el carbón de leña, bioetanol de granos y biodiesel de granos con 68%, 10%, 4% y 2,1% respectivamente. Se pretende establecer las principales especies que sirven de suministro en las tecnologías mencionadas.

Para identificar las materias primas que se utilizan en el cultivo de las especies se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las especies biomásicas más importantes y de mayor aportación en el suministro de cada tecnología, en el cual no se consideran las tecnologías de conversión, sino los nutrientes: Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK).

4.4.1 Leña.

La madera y otros materiales vegetales se han quemado directamente para calentar y cocinar desde los albores de los seres humanos modernos. Antes del descubrimiento de los combustibles fósiles, la leña era el principal combustible para uso doméstico. La mayoría de los materiales vegetales secos se encienden en presencia de aire para provocar una llama, la liberación de la bioenergía inherente da calor y luz [29]. En 2014, 1,8 millones de toneladas de combustible de madera se produjeron en el mundo - sobre todo en Asia y África [2].

Dentro de las especies a considerar se tienen en cuenta a las que son tipo paja, arbustos y árboles mayores como cultivos energéticos: el pasto Varilla (*Panicum virgatum*), alfalfa (*Medicago sativa*), thymothy-grass (*Phleum pratense*), miscanthus Gigante (*Miscanthus giganteus*), amur silver Grass (*Miscanthus sacchariflorus*), malva Virginia (*Sida hermaphrodita*), álamo o chopo (*Populus sp.*), caña común (*Arundodonax*), tallos del sorgo (*Sorghum spp*), paja de maíz (*Zea mays*), paja de cebada (*Hordeum vulgare*), y paja de trigo (*Triticum spp*) [30], [31].

Tabla 7: Fertilizantes por especies para suministro de leña.

Cultivo	Fertilizantes			Producción total (Ton/ ha-año.)
	N (Kg/ha-año.)	P ₂ O ₅ (Kg/ha-año.)	K ₂ O (Kg/ha-año.)	
Sorgo (tallos) [32]	100	60	50	30,64
Maíz (paja) [32]	100	60	50	25,85
Cebada (paja) [32]	60	40	0	3,62
Trigo (paja) [32]	80	40	0	6,48
Miscanthus Gigante.[33],[34]	110	87.5	170	21,66

Amur Silver Grass. [33]	70	80	120	15,26
Malva Virginia. [33],[35]	120	103	150	8,19
Alfalfa con Timothy Grass. [33]	120	90	120	13,06
Álamo o Chopo. [34]	50	120	100	12
Pasto Varilla. [34]	90	95	190	12
Caña común gigante. [34]	100	100	240	21

Elaboración propia a partir de datos de [32], [33], [34] y [35].

4.4.2 Carbón.

El carbón es un sector subestimado. En términos de volumen, la producción de carbón es el doble de grande que la fabricación de pellets. Por otra parte, debido a las bajas eficiencias de conversión entre madera y carbón y menor contenido de energía del combustible, la cantidad de madera utilizada para la producción de carbón es de 4 - 5 veces la cantidad de madera para fabricar pellets. Más de 50 millones de toneladas de carbón se producen anualmente [2]. El rendimiento del carbón es de aproximadamente un 35% la masa seca de madera original. Un carbón de calidad tiene un contenido energético de 28 -33 MJ/kg, superior a la de carbón mineral. Se quema sin llama y humo, dando una temperatura alta de aproximadamente 2700°C [36].

La producción mundial de carbón de madera ascendió a 51 millones de toneladas en 2012, un aumento del 5 % respecto de la cifra del 2008. Alrededor de 31 millones de toneladas se produjeron en los países africanos. En 2012, Brasil, India, China, EE.UU. y Rusia produjo 7,6 ; 2,9 ; 1,7 ; 0,85 y 0,053 millones de toneladas de carbón , respectivamente [37].

Las especies que se consideran para la producción de carbón son árboles mayores, y Brasil lidera la producción con cultivos energéticos en su mayoría de eucalipto (*Eucalyptus*) [38]. Además se considera al álamo o chopo (*Populus sp.*)

Tabla 8: Fertilizantes por especies para suministro de carbón.

Cultivo	Fertilizantes			Producción total (Ton/ ha-año.)
	N (Kg/ha-año.)	P ₂ O ₅ (Kg/ha-año.)	K ₂ O (Kg/ha-año.)	
Álamo [34],[39]	163	168	212	12,75
Eucalipto [39]	83	140	111	5,1

Elaboración propia a partir de datos de [34],[39].

4.4.3 Bioetanol

La biomasa es actualmente la única materia prima renovable para producir combustible líquido. Una tecnología practicada comercialmente es producir etanol (alcohol) por la fermentación de especies biomásicas (es decir, glucosa, fructosa y otros monosacáridos). El etanol puede ser utilizado como un sustituto de la gasolina para motores de gasolina de combustión interna [29].

Los datos recientes para el año 2015 muestran que la producción mundial de etanol fue de 98,3 mil millones de litros. El 57 % de la producción de bioetanol se produce a nivel mundial en

EE.UU. y el 29% en Brasil. Los 5 países - EE.UU. , Brasil , China, Canadá y Tailandia , junto con la UE - 28 producen el 96% de bioetanol mundial [2].

El bioetanol comercial es producido a partir de cultivos a base de azúcar/almidón, incluyendo la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), remolacha azucarera (*Beta vulgaris*), sorgo dulce (*Sorghum spp.*), granos de maíz (*Zea mays*), granos de trigo (*Triticum spp.*), granos de cebada (*Hordeum vulgare*), patata (*Solanum tuberosum*) y yuca (*Manihot esculenta*) [29]. La siguiente tabla muestra el rendimiento que tiene cada especie por hectárea para la producción de bioetanol:

Tabla 9: Rendimiento de las especies en la producción de bioetanol.

Cultivo	País/Región	Rendimiento del biocombustible Litros/ha.
Yuca	Mundial	2.070
Yuca	Brasil	1.863
Yuca	Nigeria	1.480
Granos de maíz	Mundial	1.960
Granos de maíz	Estados Unidos	3.751
Granos de maíz	China	1.995
Sorgo	Mundial	494
Remolacha azucarera	Mundial	5.060
Caña de azúcar	Mundial	4.550
Caña de azúcar	Brasil	5.476
Caña de azúcar	India	4.522
Trigo	Mundial	952

Compilado por [40] de [41] y [42].

Con el rendimiento de las especies y las cantidades de fertilizantes que se utilizan en el cultivo de especies se presenta la siguiente tabla que resume los valores promedios de fertilizantes por litro de bioetanol producido.

Tabla 10: Fertilizantes por litro de bioetanol para diferentes especies.

Cultivo	Fertilizantes		
	N (kg/Litro.)	P ₂ O ₅ (kg/Litro.)	K ₂ O (kg/Litro.)
Yuca [43].	0,169	0,058	0,063
Granos de maíz [32], [34], [44] ¹² , [45].	0,071	0,028	0,029
Sorgo [32], [33].	0,263	0,142	0,111
Remolacha azucarera [32], [46].	0,017	0,016	0,025
Caña de azúcar [34], [45].	0,016	0,015	0,025
Trigo [32], [34].	0,102	0,035	0,026

4.4.4 Biodiésel

Es un líquido amarillento derivado en su mayoría de aceite vegetal o residuos de grasa a través de "transesterificación" en presencia de alcohol y catalizador alcalino, se ha producido

¹² Disponible en: <http://www.ers.usda.gov/Data/FertilizerUse/> consultado 2/7/2016

comercialmente y se utiliza como sustituto de diesel de origen fósil. En estructura química, el biodiésel se presenta como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos [29].

EE.UU. y Brasil nuevamente encabezan la lista de países que producen más biodiésel. Los 5 países líderes (excluyendo la UE - 28) incluyen Estados Unidos, Brasil, Argentina, Indonesia y Tailandia, y junto con la UE - 28 producen el 85% de todo el biodiesel.

El biodiésel es producido a partir de especies que presentan características oleaginosas o en sus frutos existan aceites vegetales, especies como: soja (*Glycine max*), colza (*Brassica napus*), jatropha (*Jatropha curcas*), la mostaza (*Sinapis alba*), el lino (*Linum usitatissimum*), el girasol (*Helianthus annuus*), el aceite de palma (*Elaeis guineensis*), etc.

La Figura 6¹³ muestra los principales aceites vegetales usados para la producción de biodiésel, donde el aceite de colza es el más importante debido a la mayor producción en la UE, seguido por el de soja y el aceite de palma [47].

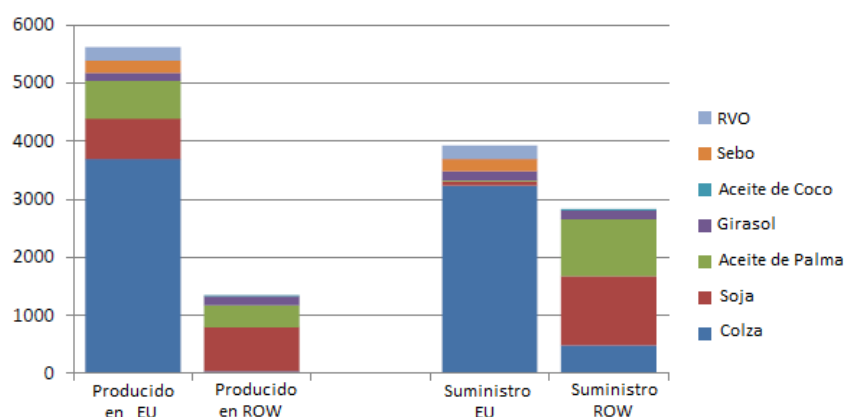


Figura 6: Materia prima utilizada para el biodiésel producido en 2008 en la UE y el resto del mundo (ktoe) [47].¹⁴

Análogamente al apartado 4.4.3 se presentan la cantidad de fertilizantes (kg) para la producción por litro de biodiesel.

Tabla 11: Fertilizantes por litro de biodiésel para diferentes especies.

Cultivo	Fertilizantes		
	N (kg/litro.)	P ₂ O ₅ (kg/litro.)	K ₂ O (kg/litro.)
Girasol [49], [45]	0,280	0,184	0,184
Palma (aceite) [34], [50]	0,0188	0,0086	0,021
Colza ¹⁵ [49]	0,108	0,0687	0,056
Jatropha [34], [45]	0,0523	0,0092	0,039
Soja [45], [51]	0,00697	0,0944	0,069

¹³ RVO: Recycled vegetable oils.

¹⁴ Figura construida por [48]

¹⁵ Otros datos obtenidos de: <http://biodiesel.com.ar/>

4.5 Resultados.

4.5.1 Análisis de tendencias.

Con los datos proporcionados por los organismos oficiales de los últimos años (IEA [4], WEC [25], IPCC [26], WBA [2]), se ha realizado la proyección en función a los diferentes escenarios contemplados.

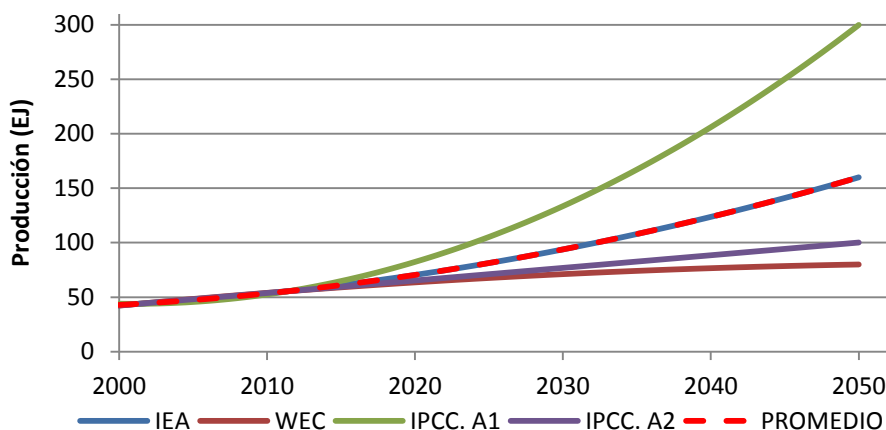


Figura 7: Análisis de tendencias hasta el 2050 en bioenergía. Fuente: Elaboración propia en base a datos de [4], [25], [26] y [2].

La tendencia promedio con lo que se realizarán los cálculos a partir del 2016 coincide con el comportamiento esperado por la Agencia Internacional de Energía (IEA).

4.5.2 Evolución de la demanda de materias primas.

Para poder evaluar la evolución de la demanda de materiales se debe tener establecido el grado de participación de las tecnologías en función a las proyecciones del anterior apartado. Dependiendo el tipo de tecnología se utiliza diferentes especies vegetales y cada una utiliza diferentes composiciones de fertilizantes.

Se ha considerado la tasa de penetración de la Tabla 5 y los valores medidos reportados hasta el 2015. En la siguiente figura se muestra la evolución de los combustibles sólidos.

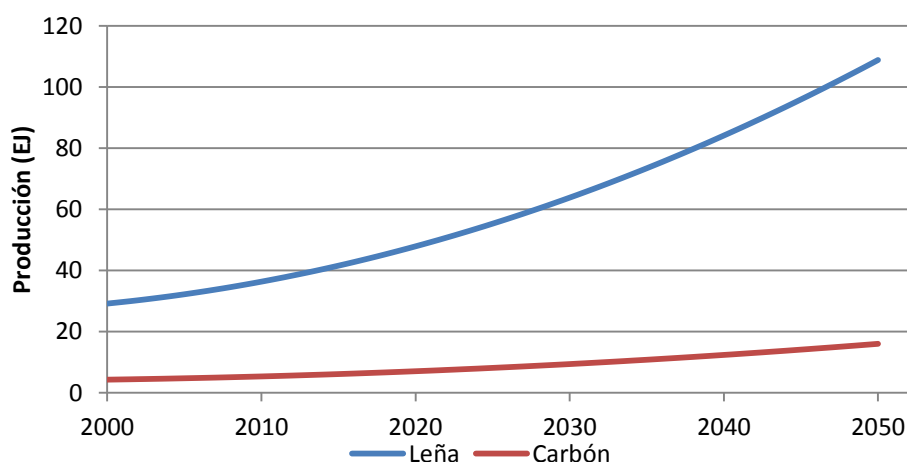


Figura 8: Valores reportados del 2000 al 2015 y proyección hasta el 2050 de leña y carbón.

De la misma manera se presentan las tendencias para los combustibles líquidos de origen biomásico y su comportamiento hasta el 2015.

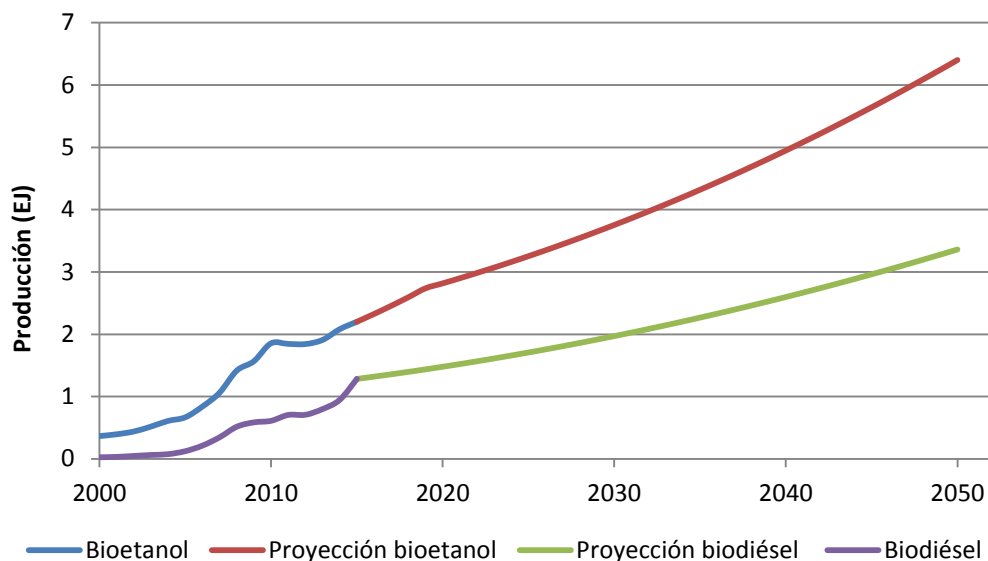


Figura 9: Valores reportados del 2000 al 2015 y proyección hasta el 2050 de bioetanol y biodiésel.

Considerando las materias primas involucrados en el apartado 4,4 se ha realizado la evolución de la demanda por tecnologías, tanto para combustibles sólidos y combustibles líquidos.

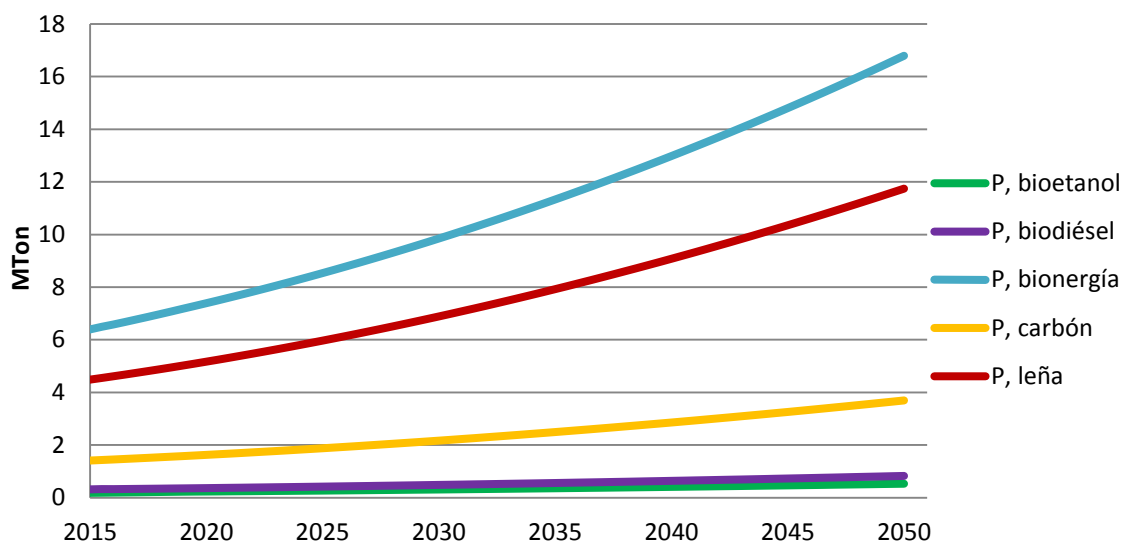


Figura 10: Proyección al 2050 de la demanda de P en bioenergía.

Se ha podido observar que la demanda de P aumentaría 3 veces respecto a los valores actuales de utilización de este fertilizante. El combustible que más demanda P es la leña y seguidamente se tiene al carbón con casi 4Mton para el año 2050. De la misma manera se presenta la Figura 11 que muestra la tendencia del requerimiento de K para las diferentes tecnologías.

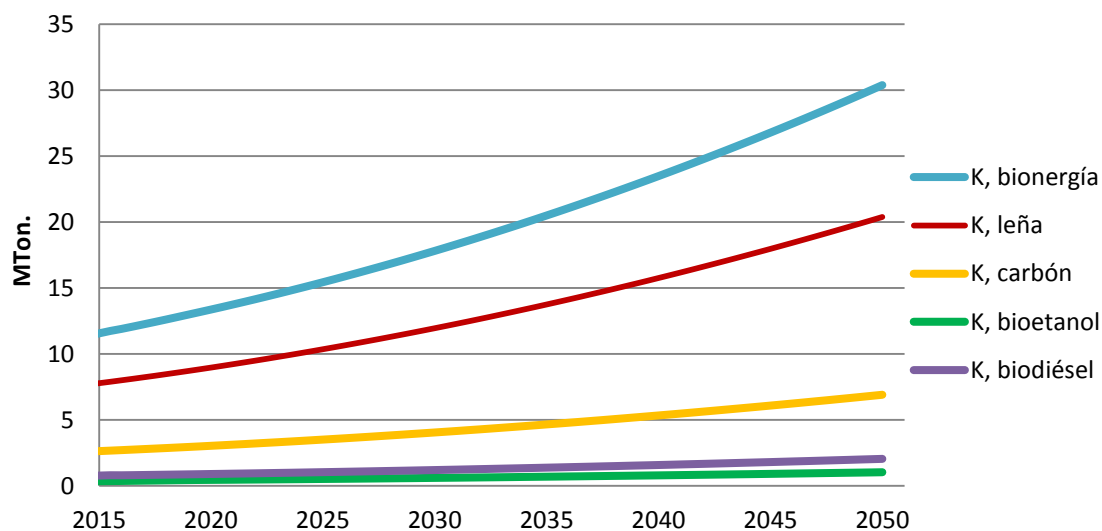


Figura 11: Proyección al 2050 de la demanda de K en bioenergía.

La cantidad de K que se demandaría para el sector de bioenergía para el año 2050 sería casi 3 veces mayor a la cantidad actual. Se debe resaltar que de la misma manera para el P, las especies biomásicas que más demandan K son para la producción de leña y seguidamente para carbón.

4.5.3 Evaluación de la posible escasez de los materiales en bioenergía.

Establecida la demanda anual de materias primas involucradas en bioenergía hasta el 2050, se pretende identificar la posibilidad de escasez de material debido a la utilización de fertilizantes en el cultivo de las especies vegetales. Estos valores de demanda son comparados con los valores de producción de materias primas respecto a reservas y recursos. A continuación, se muestra la tendencia (%) de la cantidad de P que sería destinado de la producción al desarrollo de cultivos energéticos.

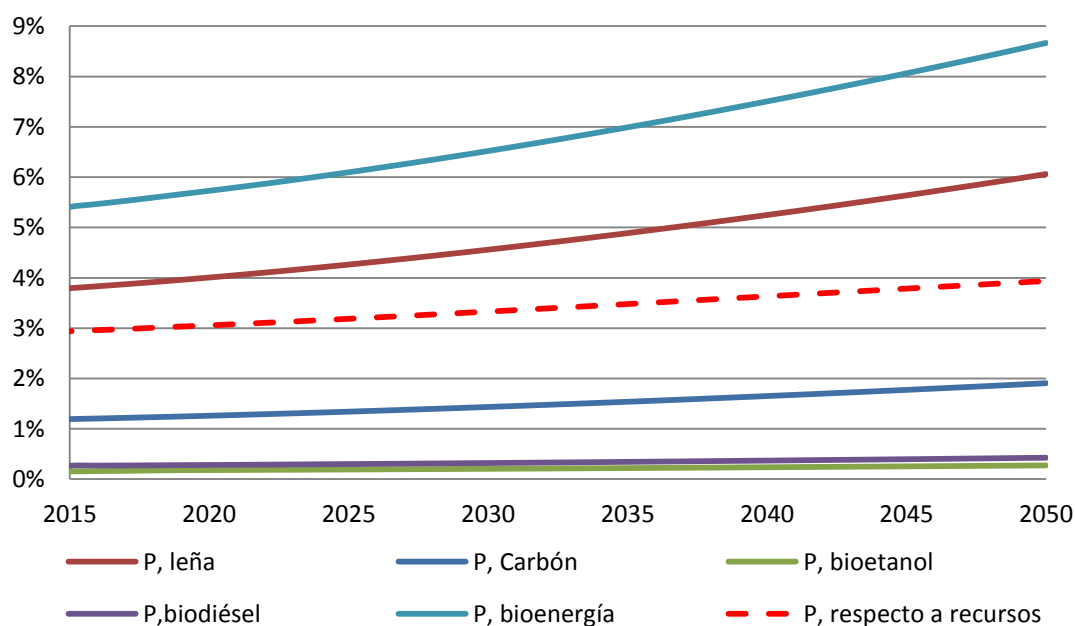


Figura 12: Evolución de la demanda de P respecto a las tendencias de producción.

Considerando que el 95% [52] de la demanda actual es destinada a la industria química y fertilizantes para especies alimenticias. En un escenario “Business as usual”, la elevada demanda de P para bioenergía llegaría a competir significativamente con la producción de alimentos. Aproximadamente el 9 % de la producción respecto a las reservas sería destinado al uso de cultivos biomásicos (el escenario menos optimista) y el 4% si se evalúa la respecto a los recursos para el año 2050.

En la Figura 13 se muestra la cantidad de K que sería destinado a la producción de bioenergía.

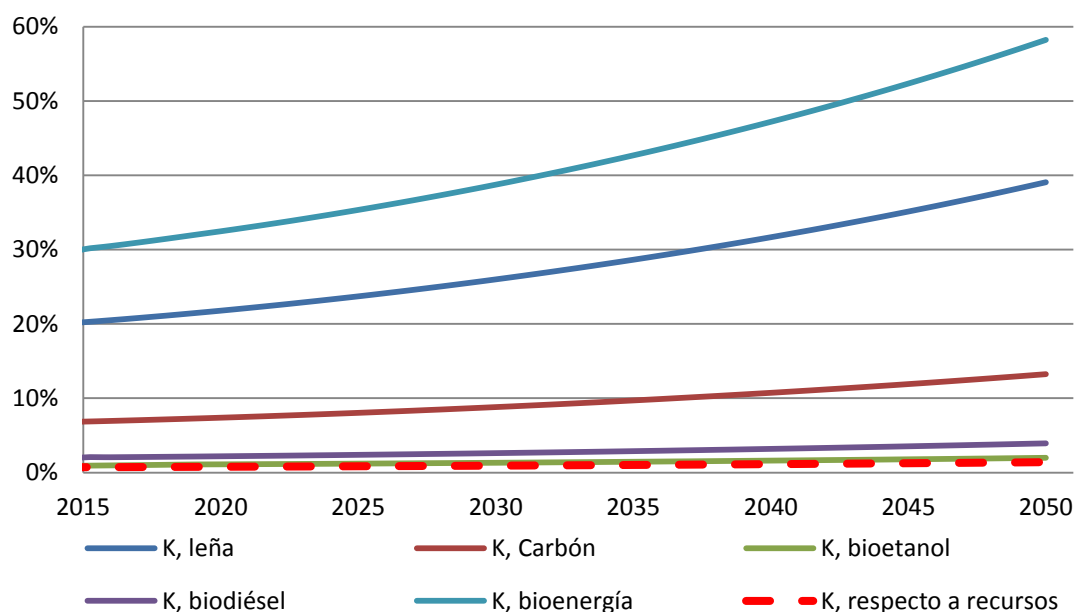


Figura 13: Evolución de la demanda de K respecto a las tendencias de producción.

Actualmente se considera que el 92% de la producción de K es destinado a fertilizantes [52]. En el escenario más desfavorable, la tendencia de producción respecto a las reservas llegaría a cubrir el 58% de la demanda para el 2050. El valor de las reservas de K (6 GTON) es muy bajo comparado con la cantidad estimada de recursos (250 GTON), y si se realiza la comparación de la curva de producción respecto a los recursos, la demanda de K para bioenergía llegaría a ser menor al 2%.

Considerando las reservas actuales y recursos de los materiales estudiados (anexo III), se pretende establecer su impacto por el uso de fertilizantes en bioenergía y la huella que podría causar en las reservas y recursos desde el año 2000 hasta el 2050. La siguiente figura muestra los resultados.

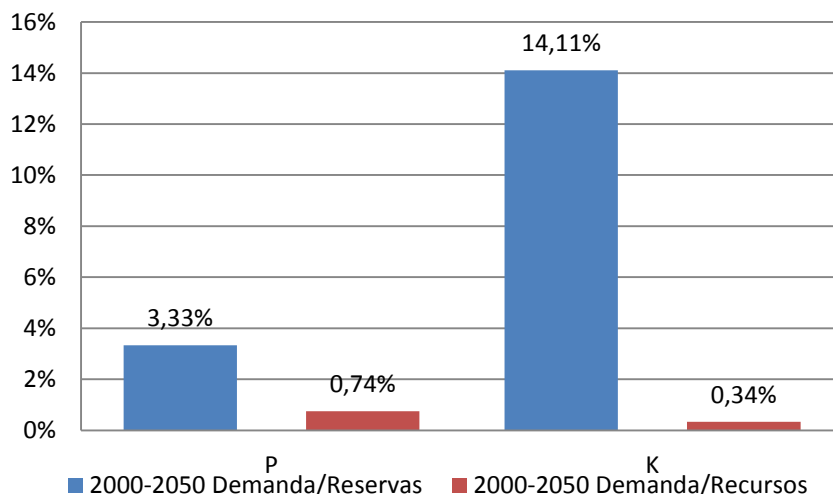


Figura 14: Demanda (2016-2050)/Reservas y Demanda (2016-2050)/Recursos.

Considerando el escenario más desfavorable, la demanda de P y K acumulado entre los años 2000 y 2050 respecto a las reservas llegaría a ser menor al 4% y 15% respectivamente. Si se realiza respecto a los recursos el impacto llegaría a ser menor al 1% para ambos elementos.

En la siguiente figura, presenta la comparación de la cantidad de exergía respecto al Poder Calorífico Inferior de cada combustible y de esa manera tener una visión de la sostenibilidad, desde el punto de vista de su contenido en materiales a través del concepto de rareza termodinámica.

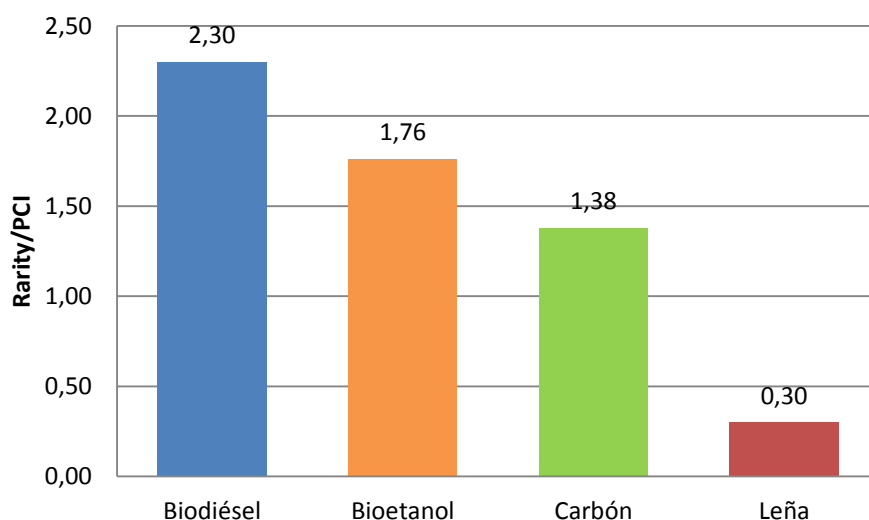


Figura 15: Comparación exergética de combustibles (GJ/GJ)

El combustible con mayor rarity es el biodiésel con 2,3 GJ/GJ, en segundo lugar se encuentra el bioetanol, seguido por el carbón y por último la leña. Esto nos proporciona una visión al elegir tecnologías que requieran estos combustibles y se debe tener en cuenta en futuras políticas. Se debe señalar, que a esta componente de la sostenibilidad habría que añadirle otros factores como es la exergía en forma de energía para fabricar las tecnologías, con un enfoque de la cuna a la tumba.

5. Energía solar.

5.1 Recurso y producción mundial.

La energía solar es limpia, la más abundante y es la de más fácil aprovechamiento entre las fuentes renovables [53]. Su naturaleza intermitente y dinámica a lo largo del globo hace una fuente de energía para utilizar mediante distintas tecnologías. Al ser una de las energías más utilizadas, se la considera la más aventajada y es el eje o la madre de todas las demás energías.

La conversión de la energía solar consiste en una larga familia de diferentes tecnologías, con un amplio rango de aplicaciones. Entre las más importantes se encuentra entregar calor, refrigeración, luz natural, electricidad y combustibles. Concretamente en este trabajo se tendrá en cuenta el uso de la energía solar como uso directo sin producción de electricidad. La cantidad de radiación solar en la superficie de la Tierra es un valor teórico disponible, y es ilustrado en la Figura 16. Este mapa identifica regiones con mayor potencial del recurso solar.

Las regiones con radiación cercana a 2000 kWh/m²/año son el Oeste de México, Estados Unidos, la mayor parte del continente Africano, Medio Oriente, Australia y la zona central de Asia. Las regiones con mayor potencial del globo por encima de una radiación a los 3000 kWh/m²/año se encuentran en el Oeste del continente Sudamericano, incluyendo países como gran parte de Chile, Oeste de Perú, Oeste de Bolivia y Noroeste de Argentina.

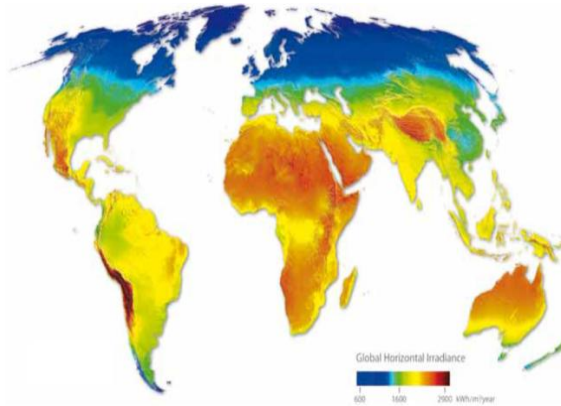


Figura 16: Mapa satelital del recurso solar [5].

La capacidad mundial instalada de aprovechamiento solar directo (calculado) para finales del 2012 es de 330 GW_t, con una producción de 281 TWh, lo que equivale a tener 471 millones de metros cuadrados de colectores solares [54].

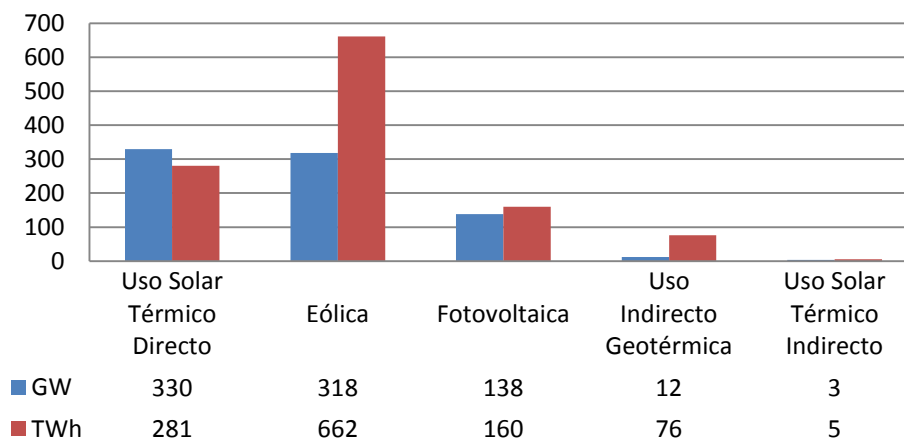


Figura 17: Capacidad Total en [GW_t]; [GW_e] y producción en [TWh_t]; [TWh_e] para finales 2012 [54].

En la Tabla 12 se consideran las fuentes de datos de distintas organizaciones, de esa manera, se conocerá la dispersión de valores que se manejan:

Tabla 12: Valores de potencia y producción de diferentes fuentes.

	SHC ¹⁶ [54]	IEA [55].	IPCC [26].
Año	2012	2011	2009
Potencia instalada (MW _t)	330.000	245.000	180.000
Producción anual (TWh/año)	281	-----	-----

Los valores proporcionados por otras fuentes corresponden a los mismos valores reportados por SHC o IEA.

5.2 Uso de la energía solar.

El aprovechamiento de la energía solar es muy amplio, a nivel global se cuentan con 8 tecnologías que son las más utilizadas. (Ver Tabla 13).

Tabla 13: Usos de la energía solar.

Tecnología	Rango de Temperaturas, °C
Calentamiento solar de agua (SHW)	0 - 100
Calentamiento solar de espacios	20 - 240
Cocinas solares	0 - 250
Sistemas térmicos solares de generación eléctrica	60 - 2000
Refrigeración térmica solar	60 - 170
Desalinización solar (eléctrico)	60-2000
Desalinización solar (uso directo)	0-80
Desalinización solar (Colectores solares)	30-120

Adaptado de [56],[54].

De los usos de la energía solar mencionados en la tabla anterior, para finales del 2012 el principal era el calentamiento de agua y aire mediante colectores solares, con una capacidad instalada de 269,3 GW_t correspondientes a un total de 348,7 millones de m², lo que corresponde a un 81% del total de la potencia instalada para uso directo de la energía solar directa [54]. Y se toma en cuenta a 58 países con 65% de la población mundial [57]. En el anexo II se presentan tablas de valores específicos por país.

La mayor cantidad de instalaciones de colectores solares en operación se encuentran en China (180,4 GW_t) y Europa (42,8 GW_t), que juntos suman el 83% del total instalado. Los restantes corresponden a USA y Canadá (17,2 GW_t). Asia excluyendo a China (10,3 GW_t), Latinoamérica (7,4 GW_t), Australia y Nueva Zelanda (5,4 GW_t), países del Medio Oriente (4,9 GW_t) y lo restante de África y Suráfrica (1,0 GW_t).

De toda la capacidad mencionada en colectores solares, se dividen en colectores solares planos (FPC): 71 GW_t, tubos de vacío (ETC): 174,1 GW_t, captadores sin cubierta 22,7 GW_t, y captadores de aire con cubierta y sin cubierta 1,6 GW_t [54], [28]. A nivel mundial la tecnología predominante es la de tubos de vacío que representa el 65%, seguidamente con el 26% tenemos a los colectores planos y colectores sin cubierta con el 8%. (Ver Figura 18).

¹⁶ Solar Heating & Cooling Programme

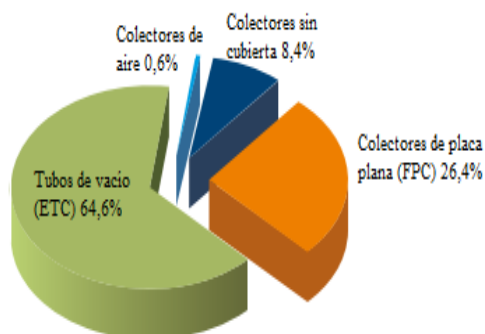


Figura 18: Distribución a nivel mundial del total de la capacidad instalada en operación, fines 2012 [54].

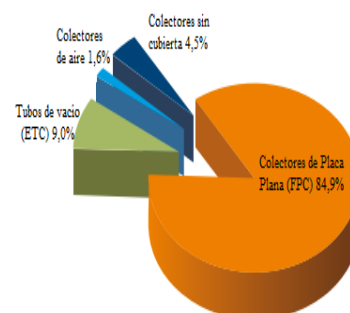


Figura 19: Distribución de colectores en Europa, fines 2012 [54].

En contraste con China, la tecnología más utilizada en Europa son los colectores de placa plana con un 84,9%. El mercado mundial está a expectativas de la evolución de China, en la Figura 20 se puede apreciar a China que se encuentra superior por casi 11 veces al segundo país en capacidad instalada (Estados Unidos).

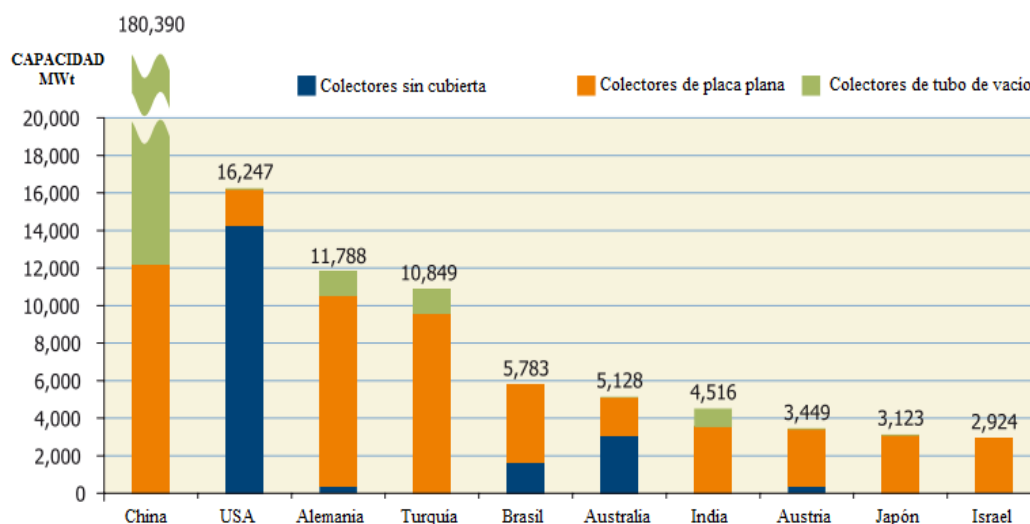


Figura 20: Países líderes de potencia acumulada en MWt. [54],[58],[59].

5.3 Tendencias hacia el 2050 del uso de la energía solar.

Se pretende contemplar el despliegue y desarrollo de la energía solar directa, según los datos proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) para el año 2050 [28] se espera una producción de 16,5 EJ (4.583 TWh) de aprovechamiento (ver Figura 21), donde llegaría a representar más del 16% de la energía total utilizada para calentamiento. Agua caliente y calentamiento de espacios tendrían una capacidad cercana a 3.500 GW_t [28].

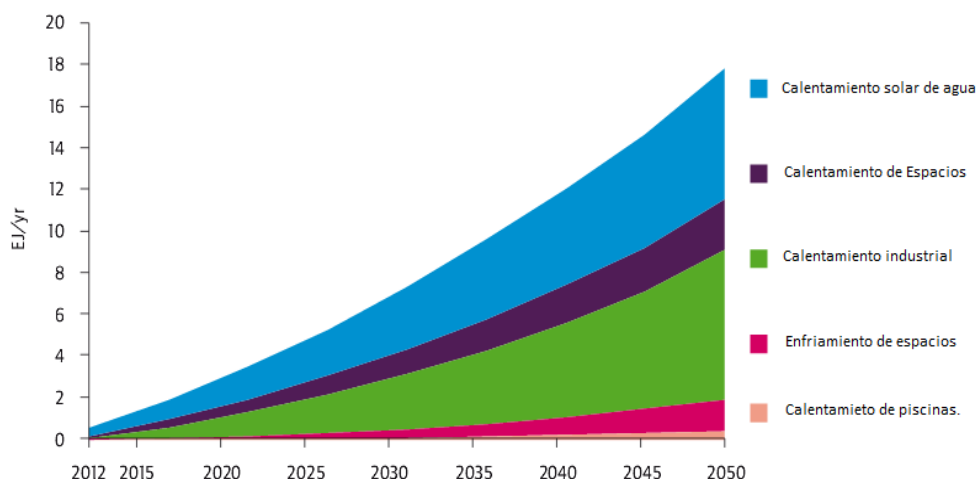


Figura 21: Visión del uso solar directo para el 2050 (EJ/año) [28].

Independientemente de las 6 tecnologías mencionadas, resulta evidente que la tecnología de aprovechamiento predominante será por captadores solares térmicos.

Se debe conocer las tendencias que manejan las organizaciones, considerando los criterios de cada una de ellas, se presenta en la siguiente tabla, los valores resumidos de proyección para el uso directo de la energía solar:

Tabla 14: Tendencias estimadas de uso directo de la energía geotérmica de diferentes fuentes.

Año	IEA. [28]	IPCC. [26]		GWEC ¹⁷ y EREC ¹⁸ . [60]
	2050	2020	2050	2020 E[R]evo
Potencia instalada total (GW _t)	7.700	1 ¹⁹ 2 3	230 1.875 2.210	2.054.000
Producción anual total (TJ/año)	16.500.000	---	---	---

El escenario E[R]evo propuesto por GWEC y EREC, considera que al menos 90% de la energía demandada será de fuentes renovables para el 2050.

5.4 Materiales involucrados en energía solar.

Se ha establecido en la Figura 21, que la tecnología para aprovechamiento de energía solar directa sea mediante colectores solares. A continuación se presentan los materiales detallados (ver Tabla 15). Para identificar los materiales que se utilizan en la fabricación de FPC y ETC se ha llevado a cabo un estudio del estado del arte a partir de la bibliografía. En la siguiente tabla se muestra una lista del inventario de los materiales utilizados para producir colectores por diferentes autores.

¹⁷ GWEC (Global Wind Energy Council)

¹⁸ EREC (European Renewable Energy Council)

¹⁹ Considera escenarios del EREC, 1:Reference Scenario; 2:Revolution Scenario; 3:Advanced Scenario

Tabla 15: Inventario de materiales, [61], [62], [63], [64].

Parte	Material	kg ²⁰ [62]	kg ²¹ [64]
FPC	Cobre	8,2	2,82
	Anticongelante (Propylene glycol)	0,9	1,01
	Pintura Epoxy	0,3	
	Cobre (Lámina)	0,46	2,82
	HDPE	0,87	
	Latón	0,04	
	PVC	0,01	
	Varillas de Soldadura	0,1	
	Lana de Roca		2,03
	Vidrio	10,5	9,12
	PUR Rígido	4,2	
	PUR Flexible	0,01	
	Aluminio	4	1,8
	Acero inoxidable	6,1	4,14
	Acero galvanizado	33,9	
ETC	Tubos de cobre		2,8
	Acero		4
	Lana de roca		2,03
	Cartón corrugado		3,33
	Tubos de vidrio		14,2
	Anticongelante (Propylene glycol)		0,65
	Cobre (revestimiento)		2,8
HST	Acero galvanizado	50	
	Acero inoxidable	21	
	Cobre	3,8	
	Latón	0,1	
	Magnesio	0,2	
	PUR Rígido	4,8	
	Pintura Epoxy	0,7	
	Lana de roca	0,2	
Soporte	Acero galvanizado	27	
	Acero inoxidable	0,5	

En el presente estudio se toma en cuenta ambas tecnologías predominantes FPC y ETC debido a que la construcción de una demandará diferentes cantidades de materiales que la otra. Además, se toma en cuenta el tanque de almacenamiento (Hot Storage Tank-HST) y el soporte.

²⁰ Basado en un colector de 2.13 m²

²¹ Basado en un colector de 2.4 m²

5.5 Resultados.

5.5.1 Evolución de la generación térmica solar.

Con los valores obtenidos de diferentes fuentes en la Tabla 12 (SHC [54], IEA. [55] e IPCC [26]), proporcionándonos valores de potencia instalada en los años anteriores y las tendencias del crecimiento de la generación térmica (ver Tabla 14) se ha podido establecer una tendencia desde el 2016 hasta el 2050 para colectores solares del tipo placa plana (FPC) y tubos de vacío (ETC).

Una de las consideraciones importantes para definir el porcentaje de ETC y FPC se basa en la Figura 18. Para futuras proyecciones se ha considerado un escenario similar con una penetración del 64,6% para ETC y 27% para FPC (asumiendo que el calentamiento de aire se considera como FPC).

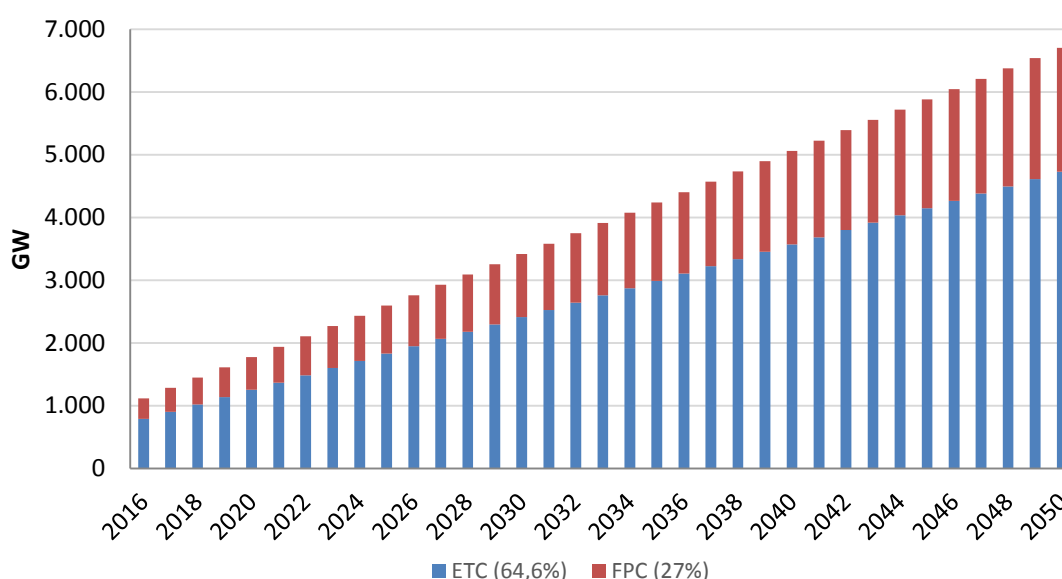


Figura 22: Proyección de la potencia acumulada en solar térmica por tipo de colector (GW_t).

Es evidente que a partir de la figura anterior, se considera predominante la tecnología ETC y presenta un crecimiento lineal, teniendo en cuenta que el porcentaje de participación será el mismo hasta 2050.

En este caso el efecto de repotenciación no se ha considerado, ya que su vida útil es mayor que las tecnologías para producir electricidad. Según el ciclo de vida de las instalaciones solares térmicas se extiende de 20 a más de 30 años [65], por lo que a lo largo del periodo de estudio (2016-2050) los efectos de repotenciación no son significativos. Por otra parte este tipo de instalaciones son más fáciles de reparar que las renovables para la generación de electricidad, pero no se debe descuidar la frecuencia de las tareas de mantenimiento, lo cual contribuye a incrementar su vida útil.

5.5.2 Caracterización de materiales en solar térmica.

Con los datos proporcionados en la Tabla 15, se realiza la lista de elementos que intervienen para las dos tecnologías de generación térmica. En caso de presentarse 2 o más

valores se ha realizado el promedio y para valores únicos como el del HST²² y del soporte se ha considerado solo una referencia bibliográfica. Otra consideración importante, para conocer los materiales de los compuestos detallados se ha tenido en cuenta la composición típica de los elementos: acero²³, lana de roca, vidrio y latón²⁴.

La siguiente tabla resume los materiales utilizados por las tecnologías FPC (área de 2.13 m²) y ETC (área de 2,4 m²) y se ha considerado los materiales involucrados para la fabricación del tanque de almacenamiento (HST) y el soporte.

Se debe resaltar que para futuros cálculos se ha considerado la equivalencia de 1,428m² para una potencia de 1kW_t.²⁵

Tabla 16: Inventario de materiales en solar térmica, contribución en masa (g) por unidad de colector (típico) incluyendo HST y soporte.

	FPC	ETC	Ubicación en el colector
Al	1.239,29	452,77	Marco.
Ca	636,56	1.328,66	Lana de roca.
Cu	9.650,41	9.908,82	Absorbedor, serpentín, lámina de revestimiento y latón.
Mg	342,41	582,74	HST, Lana de roca y vidrio.
Na	752,27	1.408,81	Lana de roca, vidrio
K	74,45	151,60	Lana de roca y vidrio
Fe	86.855,32	97.057,94	Marco, Soporte, HST
C	119,48	133,18	Aleación del acero, marco, HST y soporte
Mn	995,69	1.109,90	Aleación del acero, marco, HST y soporte
P	44,80	49,94	Aleación del acero, marco, HST y soporte
S	29,87	33,30	Aleación del acero, marco, HST y soporte
Si	3.432,78	6.437,51	Aleación del acero, marco, HST y soporte. Lana de roca y vidrio
Ni	497,95	555,06	Aleación del acero, marco, HST, soporte y latón.
Cr	9.956,50	11.098,59	Aleación del acero, marco, HST y soporte.
Mo	497,83	554,93	Aleación del acero, marco, HST y soporte.
Ti	20,43	99,48	Lana de roca, pintura aislante de la cara del colector.
As	0,03	0,04	Latón, conexiones y absorbedor.
Pb	1,12	1,26	Latón, conexiones y absorbedor.
Sn	0,12	0,14	Latón, conexiones y absorbedor
Zn	14,39	16,21	Latón, conexiones y absorbedor

Elaborado en base a datos de [61], [62], [63] y [64].

5.5.3 Cantidad de materiales en uso (stock in use)

Se pretende establecer la importancia de la evaluación de la cantidad de materiales que la tecnología demanda y acumula (stock in use), con el objetivo de favorecer políticas de reciclaje.

En la Figura 23 se puede observar la cantidad de Fe y Cu que se acumula por ambas tecnologías de calentamiento. Los valores para el Fe y Cu de materiales en uso llegarían a ser aproximadamente 6 veces más de los utilizados en la actualidad.

²² HST: Hot Storage Tank

²³ www.inoxcentrosac.com/index.php/acero-inoxidable

²⁴ www.latonesdelcarrion.com/products/barras.php

²⁵ Equivalencia obtenida de [54].

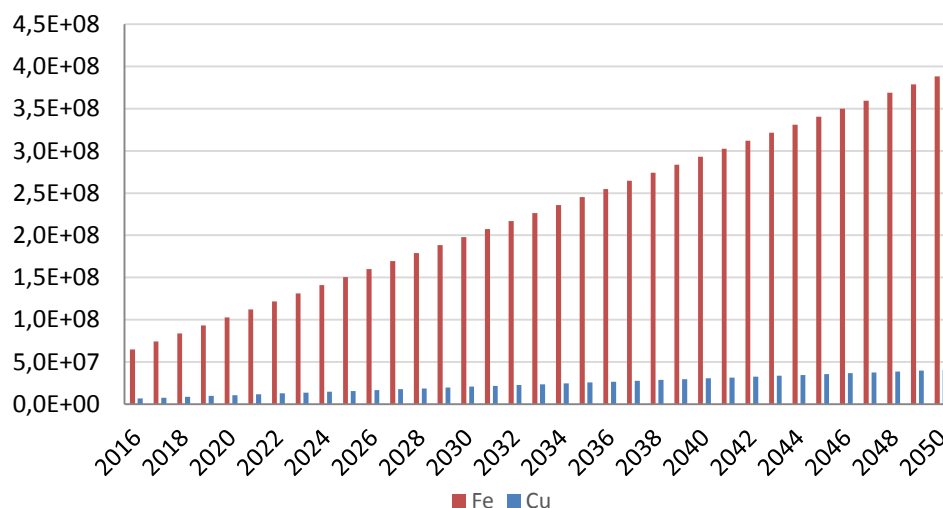


Figura 23: Evolución de la cantidad de Fe y Cu acumulado para el total solar de térmica, stock in use. (Ton/año).

De la misma manera se presenta para el Al, Mo y Ni, que su porción acumulativa aumentarán 6 veces más. (Ver Figura 24).

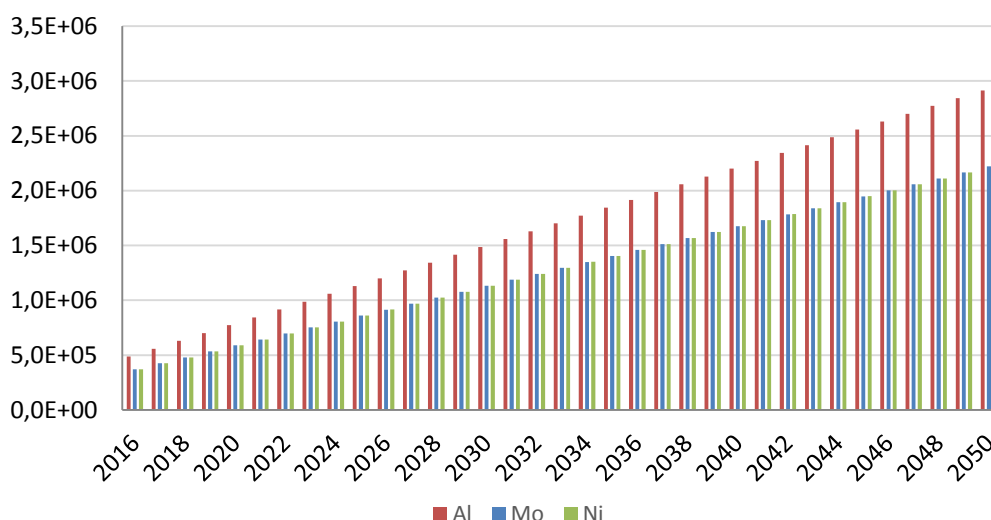


Figura 24: Evolución de la cantidad de Al, Mo y Ni acumulado para el total de solar térmica, stock in use. (Ton/año).

De la Figura 23 y Figura 24, se observa como el crecimiento en acumulación de materiales es lineal y el más demandado es el Fe. Los elementos como el Ni, Cr y Mo presentan crecimientos notables debido a estar presentes en la aleación del acero.

5.5.4 Evaluación de la posible escasez de los materiales.

Evaluada la demanda esperada de los materiales 2016-2050. El objetivo es identificar la posibilidad de presentarse escasez de material debido a la utilización de colectores solares térmicos. Para tal propósito, se consideran los valores de reciclaje de la Tabla 3. Es decir, que los valores de demanda anual de materiales serán afectados por el porcentaje de reciclaje y lo

restante sería extraído de los depósitos mineros, y a su vez serán comparados con los valores de producción de materiales, los cuales se asumen que presentan una tendencia del tipo de curva de Hubbert y son respecto a las reservas (Los valores proporcionados son actualizados de [10]).

Los materiales que presentan mayor participación respecto a su producción son el Cr, Cu, Mo y Ni, con valores en promedio de 13%, 6%, 17% y 6% respectivamente. Es decir, que del total de producción, estos porcentajes serían destinados a la fabricación de colectores solares. Se debe resaltar que los valores de Cr, Ni y Mo son altos debido a que se presentan en la aleación del acero.

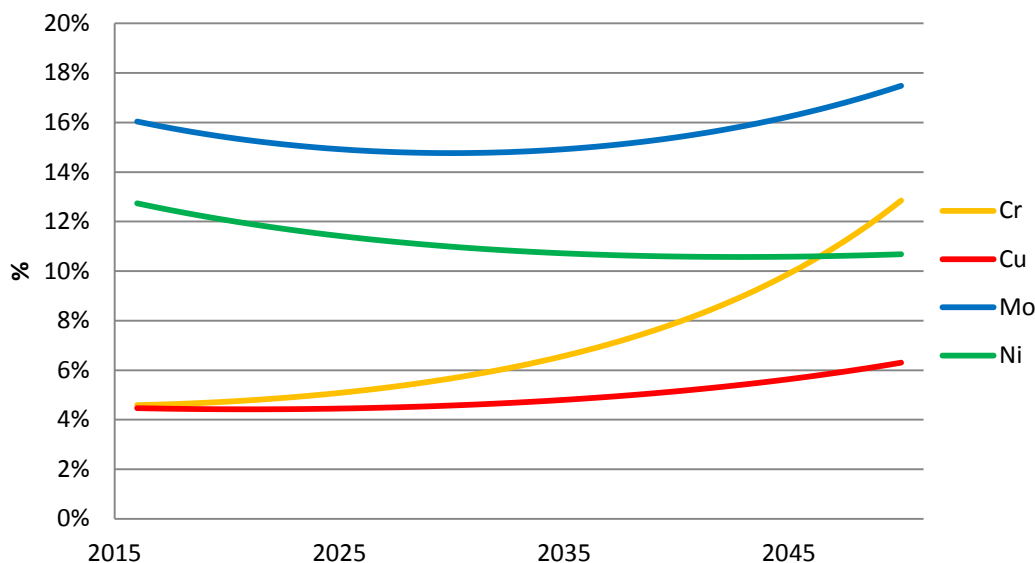


Figura 25: Comparación demandada mundial de Cu, Cr, Mo y Ni respecto a la proyección de producción.

No se presenta una posible restricción física prevista hasta el año 2050. No obstante, el Cu en colectores solares térmicos llegaría a ocupar el 6% de la demanda y desplazaría a otros sectores como el eléctrico con el 41%, el sector de la construcción con el 13% o el automotriz con el 10% [52]. De la misma manera, el Mo con el 17% llegaría a competir con la industria petroquímica con el 33%, automotriz con el 14%, construcción con el 6 % entre otros [52].²⁶

El crecimiento exponencial del Cr llegaría a demandar el 13% de la producción total compitiendo con otras tecnologías, debido a que el 97% de la producción de Cr se destina a la fabricación de acero.

La siguiente figura muestra el resto de los materiales involucrados en los colectores solares respecto a sus producciones. Que como en el caso anterior, no se presenta restricción física alguna, debido a que no superan el 1%.

Es evidente que en muchos de los materiales, la producción disminuirá a medida que se quiera satisfacer las demandas por la instalación de colectores solares térmicos.

²⁶ Los índices de uso final de los elementos por sectores están considerados para la actualidad.

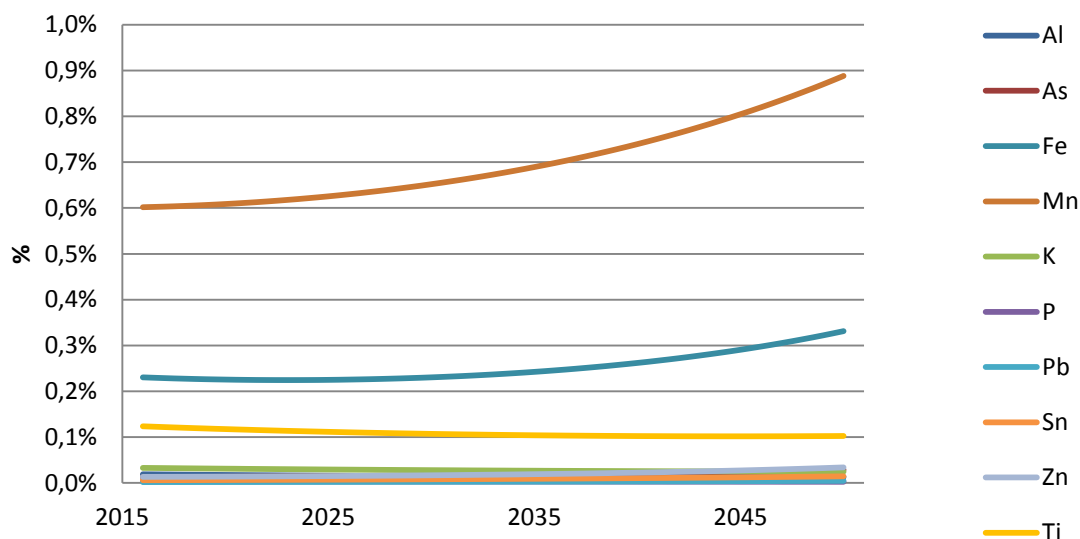


Figura 26: Resto de materiales demandados mundialmente respecto a la proyección de producción desde el 2015 al 2050.

Considerando las reservas y recursos actuales de los materiales estudiados (anexo III), se pretende establecer su impacto por el uso de colectores y la cantidad de materiales que se demandarían entre el año 2016 y el 2050 respecto a las reservas y a los recursos. La siguiente figura muestra los resultados.

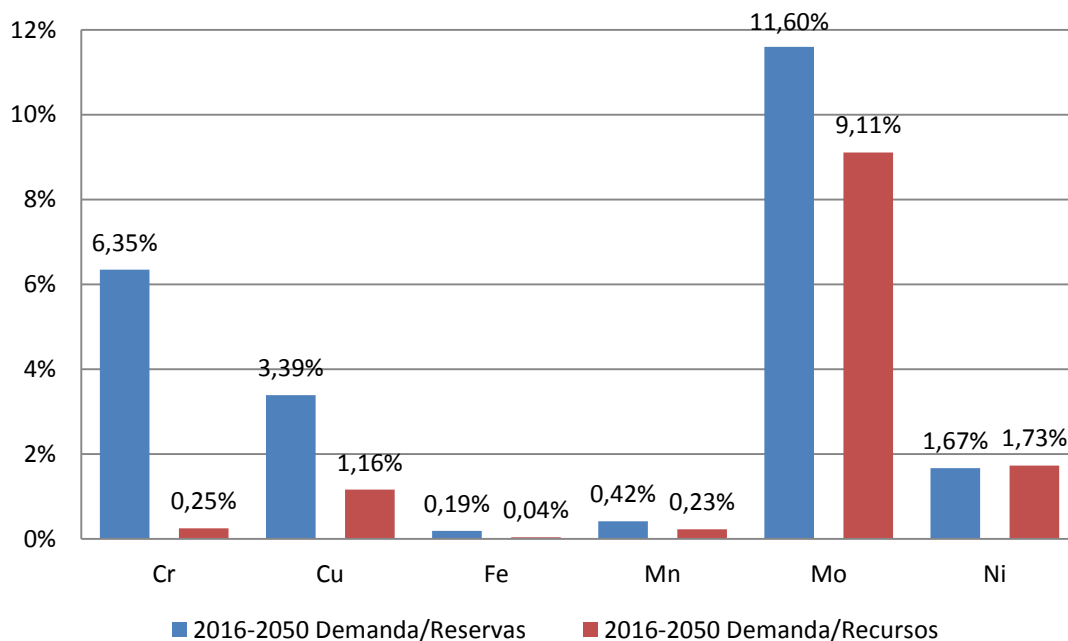


Figura 27: 2016-2050 Demanda/Reservas y Demanda/Recursos.

5.5.5 Análisis de la rareza termodinámica por tipo de colector solar.

Hay que destacar que la Figura 28 se encuentra en base logarítmica de base 10, debido a la diferencia de valores, y muestra la comparación entre el análisis de exergía (rareza) y masa en un colector FPC.

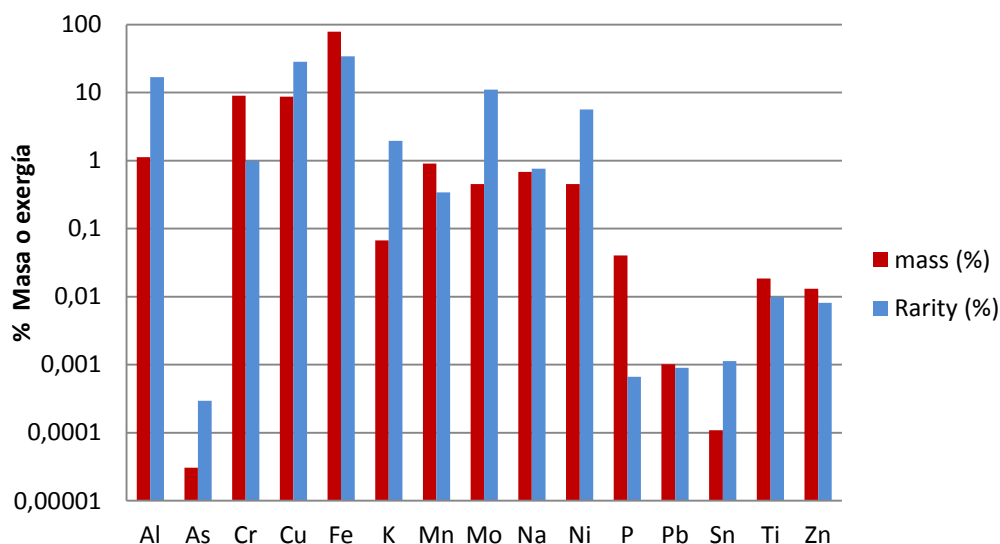


Figura 28: Comparación entre masa y exergía-rarity en un absorbedor FPC.

Desde un punto de vista de la masa, el Fe constituye alrededor del 79 % de la tecnología FPC. Sin embargo, en términos de rareza, Fe constituye sólo el 34 %. Esto se debe a la presencia de metales más valiosos como el Cu, Al y Mo contenidos en la fabricación de colectores y presentan un mayor contenido exergético.

La Figura 29 muestra los resultados para un absorbedor ETC. Como en el caso anterior, Fe es el más relevante, pero en exergía (rareza) el Cu, Al y Mo se convierten en la contribución más relevante.

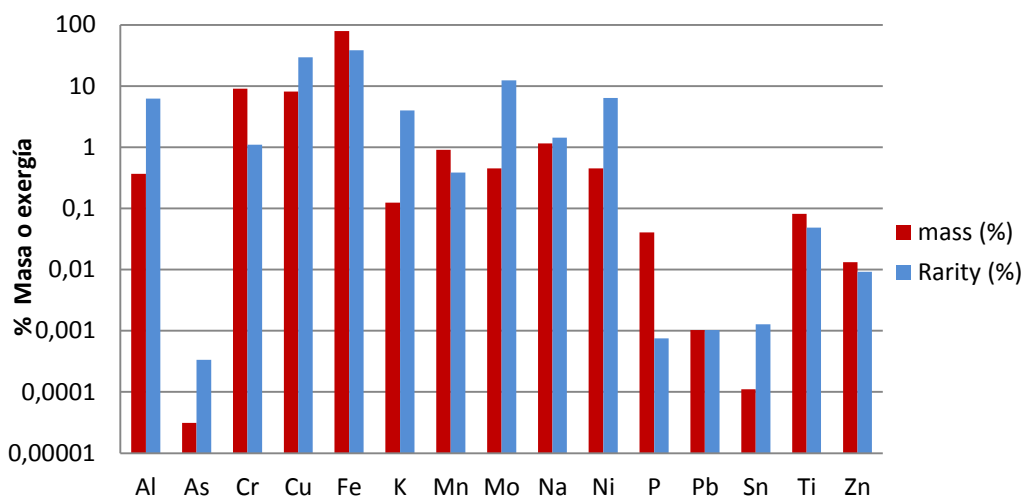


Figura 29: Comparación entre masa y exergía-rarity en un absorbedor ETC.²⁷

A continuación se puede observar de manera acumulativa como principalmente el Cu, Al y Mo adquieren una representación predominante en términos de exergía (Rarity) respecto a la contribución en masa, donde el Fe era mayoritario. El eje horizontal está ordenado de mayor a menor en función a la contribución en masa de cada elemento.

²⁷ El eje de ordenadas es logarítmico en base 10.

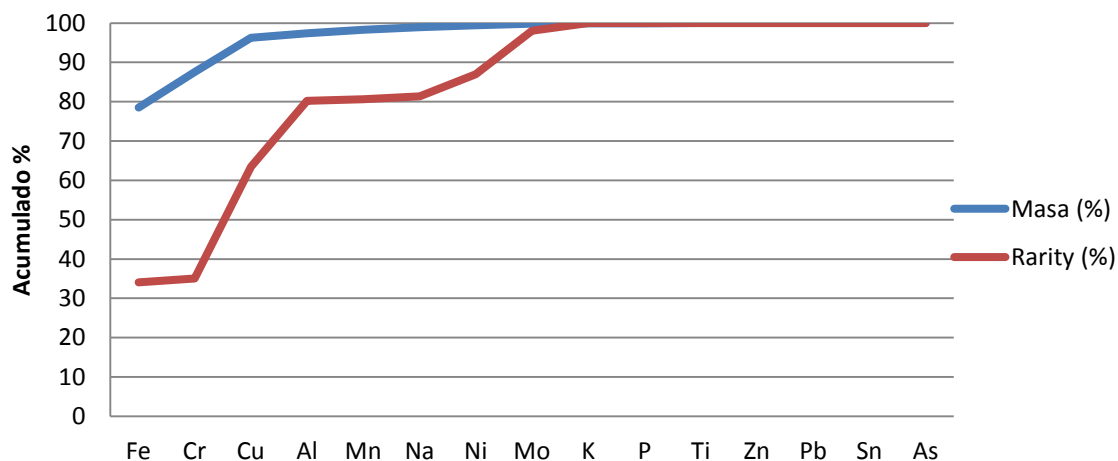


Figura 30: Comparación entre masa y exergía-rarity acumulativa en FPC (%).

A continuación se muestra el comportamiento para la tecnología ETC. Como en el anterior caso, Cu, Al y Mo adquieren más relevancia en contribución en términos de exergía. El eje horizontal ha sido ordenado de tal manera que se pueda comparar con la tecnología FPC.

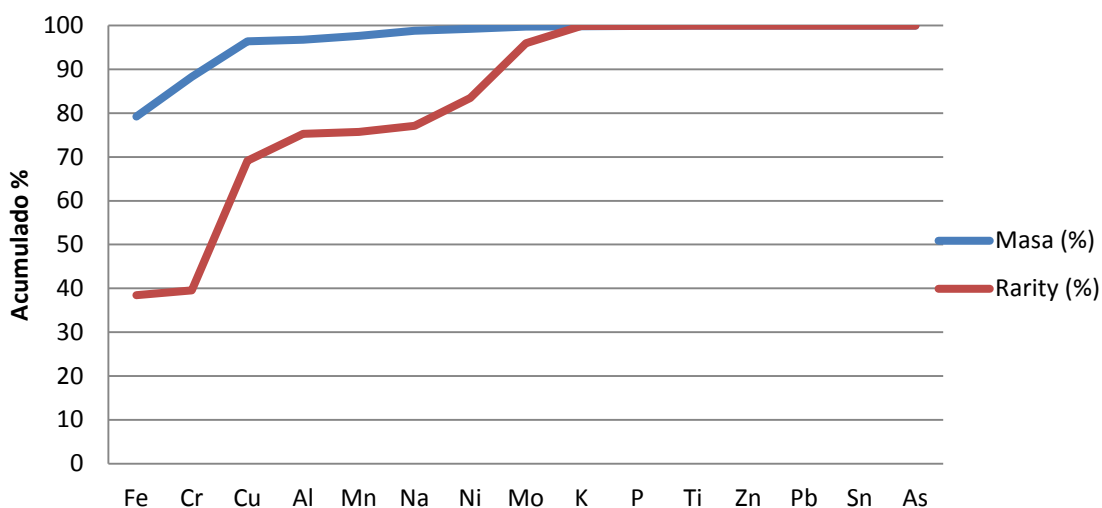


Figura 31: Comparación entre masa y exergía-rarity acumulativa en ETC (%).

En la Tabla 17 se presenta la cantidad de exergía que contienen los diferentes colectores solares.

Tabla 17: Diferencia de exergía entre colectores FPC y ETC.

Exergía	FPC	ETC
GJ/MW	3.156	2.769

Se puede apreciar que el valor de exergía más elevado corresponde al tipo FPC, pero si se compara por las dimensiones de cada módulo que habitualmente se encuentra en el mercado su valor en exergía es similar, teniendo 4,70 GJ para un colector FPC de 2,13 m² y para un colector ETC de área 2,40 m² se tiene 4,65 GJ.

6. Energía geotérmica.

6.1 Recurso y producción mundial.

La energía geotérmica como uso directo de suministro de calor, es uno de los más comunes, antiguos y versátiles a lo largo de los tiempos, ya que se encuentra en documentos que se han estado utilizando en los últimos 2000 años [6].

La energía geotérmica se forma en lo profundo de la corteza terrestre, y se aprovecha para la generación de calor y electricidad. El medio de la transferencia de energía es mediante fluidos geotermales. En la superficie, estos se manifiestan como fuentes calientes: fumarolas, géiseres y aguas termales [66]. Los principales parámetros geológicos para determinar el potencial de un recurso geotérmico son: formación geológica (litología), estructuras tectónicas (fallas), la permeabilidad (conductividad hidráulica) y la temperatura. La profundidad a la que se encuentran estos parámetros también debe ser considerada.

En la Figura 32 se puede apreciar de una manera global las regiones del mundo con actividades geotérmicas.

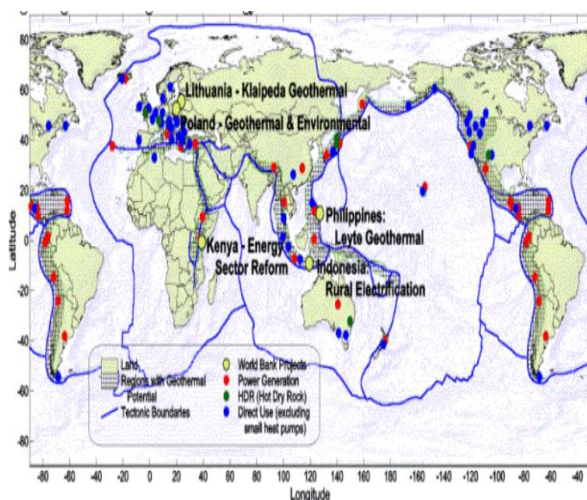


Figura 32: Vista global de la energía geotérmica [67].

Los recursos geotérmicos varían desde la temperatura de 25 a 350 °C, y pueden ser de vapor seco, de dos fases (una mezcla de vapor y agua) o simplemente agua líquida. Con el fin de extraer el calor geotérmico de la tierra, el agua es el medio de transferencia de origen natural, y está disponible para esta tarea en la mayoría de lugares. La temperatura del recurso es determinante para escoger el tipo de tecnología necesaria para extraer el calor y los usos a los que se puede utilizar. [67]

El uso directo de la energía se encuentra más desarrollado en regiones como el occidente del continente Europeo, Asia y la parte Oeste de Norte América.

Se debe tener en cuenta que el recurso geotérmico a nivel mundial no presenta un porcentaje de aprovechamiento notable, en la Figura 33 se puede apreciar de manera global el potencial del recurso geotérmico a nivel mundial.

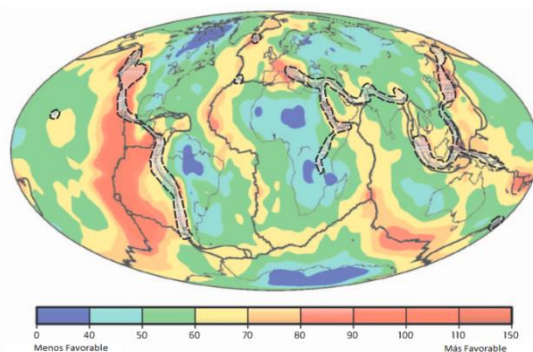


Figura 33: Recurso geotérmico [1].

Considerando la Figura 33, en azul se encuentran las regiones de aprovechamiento menos favorables y de color rojo se encuentran las zonas de aprovechamiento de recurso más favorables, se presenta una mayor actividad geotérmica en el mar y dentro de las regiones de Europa, Asia y Oeste de Estados Unidos.

Los países líderes en la utilización de la energía directa geotérmica son (teniendo en cuenta bombas de calor) en capacidad instalada (MW_t): China, USA, Suecia, Turquía y Alemania sumando un total de 65,8% de la capacidad mundial. Y como producción anual de energía se consideran líderes en el uso directo de la energía geotérmica con un total de 63,2% (TJ/año) a: China, USA, Suecia, Turquía e Islandia [6].

Tabla 18: Líderes mundiales del uso directo de la energía geotérmica [6]

MW_t	(TJ/año)
China (17.870)	China (174.352)
USA (17.416)	USA (75.862)
Suecia (5.600)	Suecia (51.920)
Turquía (2.937)	Turquía (45.892)
Alemania (2.849)	Islandia (26.717)

En potencia instalada y producción, China es el líder a nivel global con 17.870 MW_t y 174.352 TJ/año respectivamente. Un dato curioso resulta que Alemania presenta una potencia instalada mayor que Islandia, pero en producción Islandia presenta un valor anual más alto. Esto es debido a las condiciones climatológicas de ambas regiones y la disponibilidad del recurso geotérmico característico de Islandia.

El factor de capacidad a nivel global es del 0,265 (equivalente a 2.321 horas), el cual presenta una disminución respecto al año 2010, que se contaba con un factor de 0,28; 0,31 en 2005 y 0,40 en el 2000. La tasa de factor de capacidad y menor crecimiento para el uso anual de energía en la actualidad se debe al aumento de las instalaciones de bombas de calor geotérmicas que tienen un bajo factor de carga en todo el mundo de 0,21 [6]. Las proporciones de crecimiento de la capacidad instalada y el consumo anual de energía en los últimos 20 años se muestran en la Figura 34.

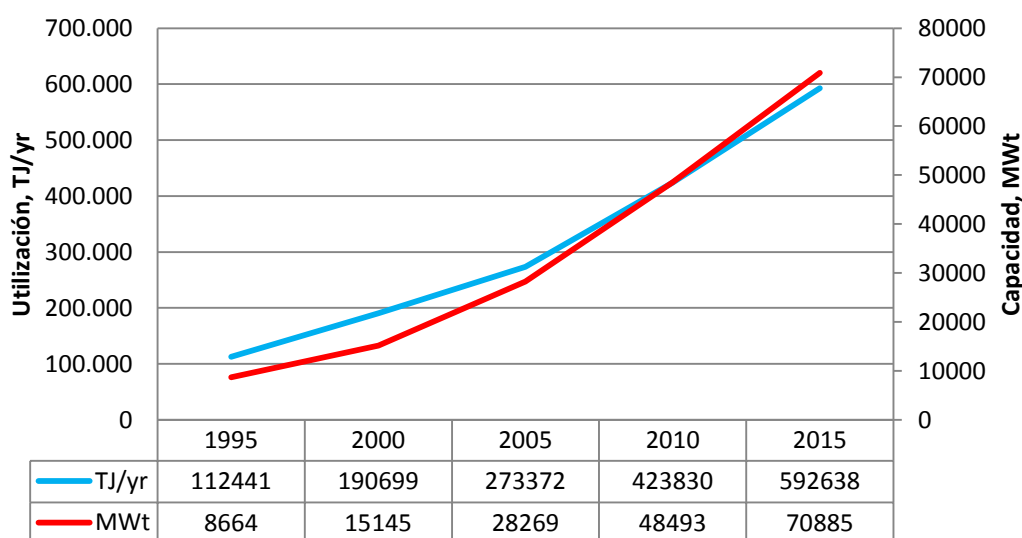


Figura 34: Potencia instalada y producción anual del uso directo de la energía geotérmica [6].

Se presenta un crecimiento en potencia instalada mundial desde el 2005 al 2015 casi 10 veces mayor desde 8.664 a 70.885 y en producción anual alrededor a 5 veces. El crecimiento anual es aproximadamente de 7,9% para potencia instalada y 6,9% para energía producida.

En la siguiente tabla se presentan las cifras que manejan diferentes fuentes para potencia instalada actual y la producción anual:

Tabla 19: Valores de potencia y producción de diferentes fuentes

	Congreso Mundial de Geotermia.[6]	IEA. [55]	Consejo Mundial de Energía. [25]	IPCC. [26]
Año	2015	2009	2009	2015 Proyección
Potencia instalada (MW_t)	70.885	50.600	50.583	85.200
Producción anual (TJ/año)	592.638	440.000	438.071	800.000

Los valores del Congreso Mundial de Geotermia han sido elaborados en base a datos proporcionados por los países afiliados a la Asociación Internacional de Geotermia (IGA). Y los datos de la columna 5 del IPCC han sido proyectados en base a datos proporcionados para el 2012.

6.2 Uso directo de la energía geotérmica.

Se entiende por uso directo a las aplicaciones en las que, en principio, se usa el calor de los recursos geotérmicos, así como también la utilización de las sustancias que liberan estas fuentes. Éstas pueden estar clasificadas según la temperatura del recurso (ver Figura 35).

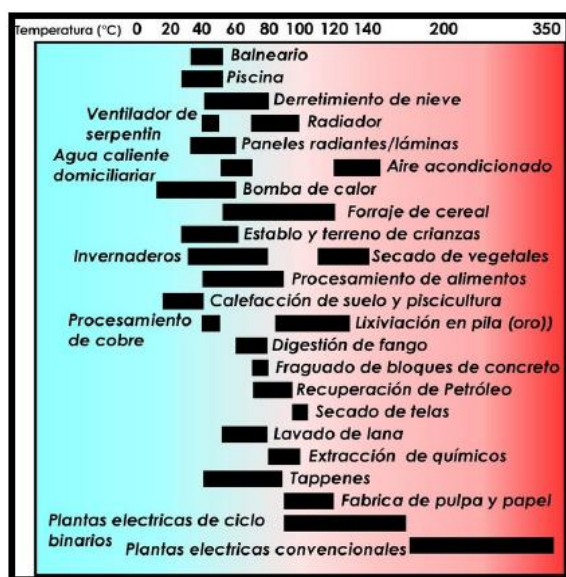


Figura 35: Aplicaciones de la energía geotérmica [68].

El límite inferior de temperatura para el aprovechamiento del recurso geotérmico es de 20 °C y el límite superior se presenta a 150 °C para generación térmica directa, ya que a mayor temperatura es utilizada para generar electricidad.

Se pueden considerar que la mayoría de los usos de energía geotérmica son de uso directo. Dentro de las actividades más importantes encontramos: calentamiento de agua de piscinas, derretimiento de nieve, calentamiento de agua sanitaria, piscicultura, acuicultura, secado, uso industrial, calefacción y refrigeración de espacios entre otros [69].

La creciente toma de conciencia y la ganancia de popularidad de los recursos geotermiales ha hecho el uso de la bomba de calor como el aprovechamiento de mayor instalación, con un crecimiento anual de 1,63 veces respecto a los datos reportados en el 2010. Las bombas de calor crecen desde una potencia instalada de 33.134 MW_t en el 2010 hasta 50.258 MW_t en el 2015 con una producción de energía desde 200.149 TJ/año hasta 326.848 TJ/año comprendidos en los mismos años [6]. Se presenta el desempeño de las principales tecnologías de uso directo de la energía geotérmica (ver Figura 36).

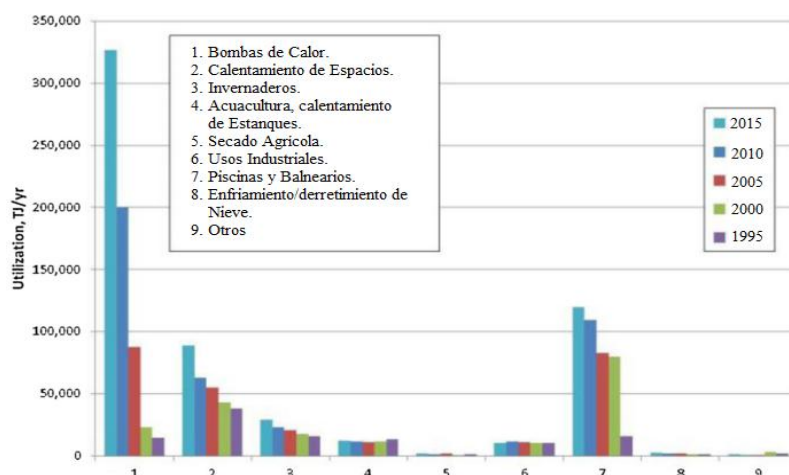


Figura 36: Comparación a nivel mundial del uso de la energía geotérmica directa en TJ/año [6].

Las bombas de calor son claramente la tecnología más utilizada en la actualidad. La Figura 36 muestra los valores de producción de cada una de las tecnologías geotérmicas durante los últimos 20 años. Además, en el Anexo II se presentan los valores de potencia instalada por países, teniendo como líder a USA con 16.800 MW_t y líder en producción a China con 100.311 TJ/año.

6.3 Tendencias hacia el 2050 del uso directo de la energía geotérmica.

Se ha podido observar en la Figura 36 que el crecimiento de las bombas de calor geotérmicas para el año 2015 es de 1,6 veces respecto al año 2010, lo que convierte esta tecnología en la predominante. Para el año 2050 se espera que continúe siendo la tecnología más utilizada. Se pretende una capacidad cercana a los 820 GW_t, donde aproximadamente 740 GW_t tendrían lugar las bombas de calor, representando el 89%. En la Figura 37 se presenta el crecimiento según el EIA:

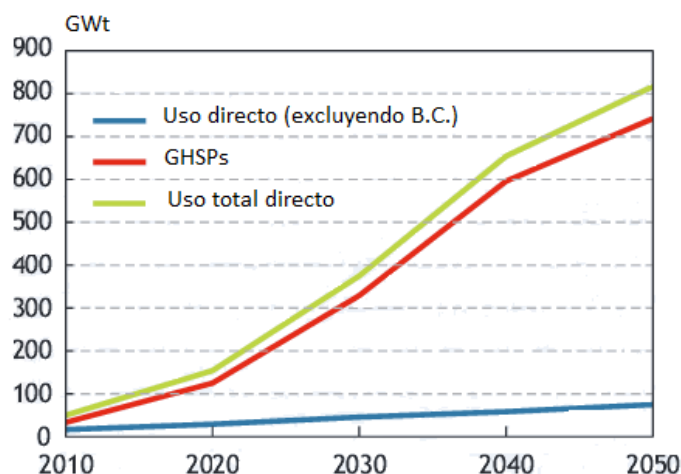


Figura 37: Uso directo de Energía Geotérmica y crecimiento de GHSPs (2050) [55].

A continuación, se consideran diferentes fuentes que presentan valores y tendencias para el año 2050. En la siguiente tabla se resumen los valores mencionados:

Tabla 20: Tendencias estimadas de uso directo de la energía geotérmica de diferentes fuentes.

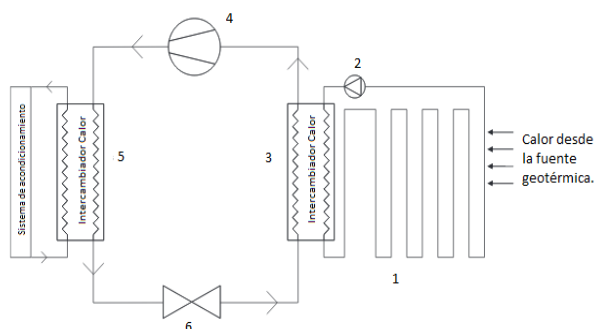
Año	IGA. [70]	IEA. [55],[1]	IPCC. [26]		
	2050	2050	2020	2030	2050
Potencia instalada total (MW _t)	---	820.000	143.600	407.800	800.000
Potencia instalada GHSP (MW _t)	---	740.000	---	---	---
Producción anual total (TJ/año)	5.100.000	5.800.000	1.360.000	3.860.000	7.570.000
Producción GHSP (TJ/año)	4.200.000	---	---	---	---

Se debe tener en cuenta que los valores reportados en [26], la potencia instalada para 2020 y 2030 han sido extrapolados a partir del 2015. Estas estimaciones se han realizado utilizando una tasa de crecimiento anual media exponencial del 11%.

6.4 Materiales involucrados en energía geotérmica.

Conociendo la tecnología predominante, se espera que para el año 2050 esta tecnología ocupe el 89% de la capacidad.

Las bombas de calor funcionan extrayendo calor de bajo grado de una fuente (aire, tierra o agua) y su conversión en calor de alta calidad para la calefacción de espacios [71]. Para el recurso geotérmico se cuenta con las bombas del tipo GSHP (Ground Source Heat Pump), el esquema de funcionamiento se presenta en la Figura 38.



Donde:

1. Colector de calor.
2. Bomba de circulación.
3. Evaporador.
4. Compresor.
5. Condensador.
6. Válvula de expansión.

Figura 38: Funcionamiento bomba de calor [71].

Según [71], mediante datos proporcionados por fabricantes, personas que reciclan y bases de datos²⁸ se cuentan con los materiales presentes en una bomba de calor GSHP (Ver Tabla 21). Los valores reportados son en masa por una bomba de 10 kW y se presenta como ejemplo de la recopilación de autores:

Tabla 21: Componentes detallados de una bomba de calor [71].

Componente del sistema	GSHP	Masa (kg)
Evaporador y Condensador	Acero de baja aleación	20
Compresor	Acero reforzado	75
Cableado, tuberías y válvula de expansión	Cobre	22
Aislante de tuberías	Elastómero	10
Aislante de cables	Cloruro de vinilo	1

²⁸ Ecoinvent V2.1 database. Switzerland: Swiss Centre For Life Cycle Inventories Dübendorf, www.ecoinvent.org ; 2010.

Aceite de lubricación	Aceite de ésteres.	1,7
Ventilador de aire	Cobre	3,09
Refrigerante	R-134a	4,9
Ensamblaje de las unidades de las bombas	Electricidad	337 MJ
	Gas natural	875 MJ
Sistema de acondicionamiento	Arena	4.650
	Cemento	900
	Aluminio	126
	LDPE	101
	Poli estireno	66
Colector de calor de tuberías	HDPE (horizontal, HHC)	301,2
	HDPE (vertical, VHC)	183,1
Aislante del colector de tuberías	LDPE	4,7
Colector	Latón	6,6
Relleno	Cemento (solo VHC)	19,1
	Bentonita	3,8
Andamios, barras y soportes	Acero reforzado	33
Instalación	Diesel VHC	810 MJ
	Diesel HHC	9.720 MJ

De manera resumida y para mejor entendimiento se presenta la siguiente tabla con los materiales que se utilizan para la fabricación de bombas de calor según diferentes fuentes bibliográficas (ver Tabla 22), se deben resaltar los materiales de origen mineral.

Tabla 22: Resumen de materiales GHSP.

Material	kg/kW [71]	kg/kW [72]	kg/kW [73]
Hierro fundido	2,00	5,44	5,87
Acero	10,80	6,43	9,03
Aluminio	12,60	3,63	6,79
Cobre	2,51	2,07	2,44
Níquel		0,22	0,24
Plomo		0,22	0,24
Cromo		0,18	0,20
Polietileno		0,53	0,99
Zinc		0,10	0,11
Estaño		0,002	0,0036
PVC		0,01	0,02
Caucho			0,06
Latón	0,66		

6.5 Resultados.

6.5.1 Análisis de tendencias.

Con los valores de potencia instalada y tendencias de diferentes autores para el año 2050 se pretende establecer un promedio, con el cual se realizarán los demás cálculos.

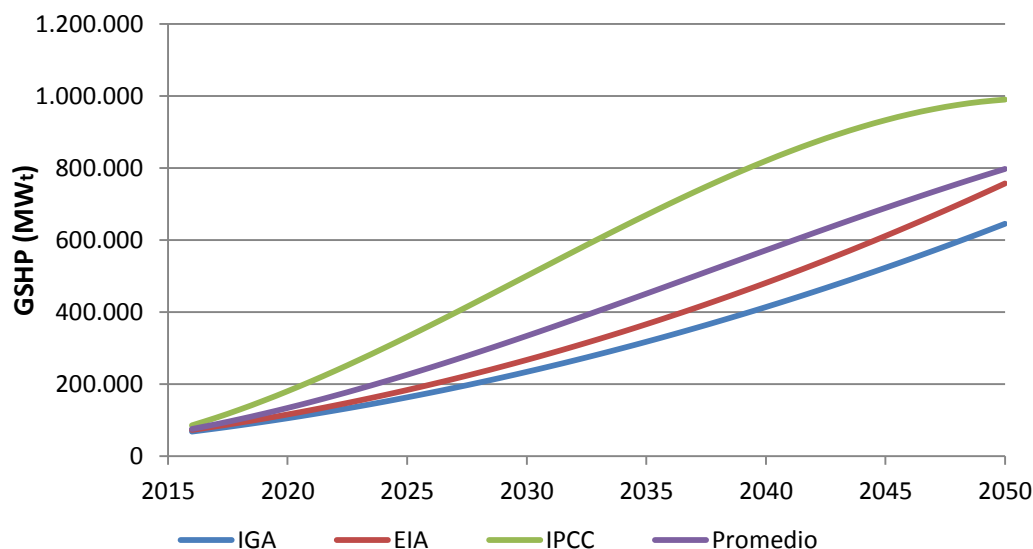


Figura 39: Análisis de tendencia bombas de calor geotérmicas. (Fuente: Elaboración propia en base a datos de [70], [55], [1] y [26].)

Se puede observar que el organismo más optimista es el IPCC. El valor resultante promedio 797.376 MW_t para el 2050 se asemeja a la tendencia presentada por el IEA.

6.5.2 Evolución de la potencia en bombas de calor geotérmicas.

Considerando los valores de diferentes fuentes presentados en la Tabla 21 (IGA [70], IEA. [55], [1] y IPCC. [26]) y el análisis de tendencias de la *Figura 39*, se ha podido establecer el crecimiento que se espera de la potencia instalada desde el 2016 al 2050.

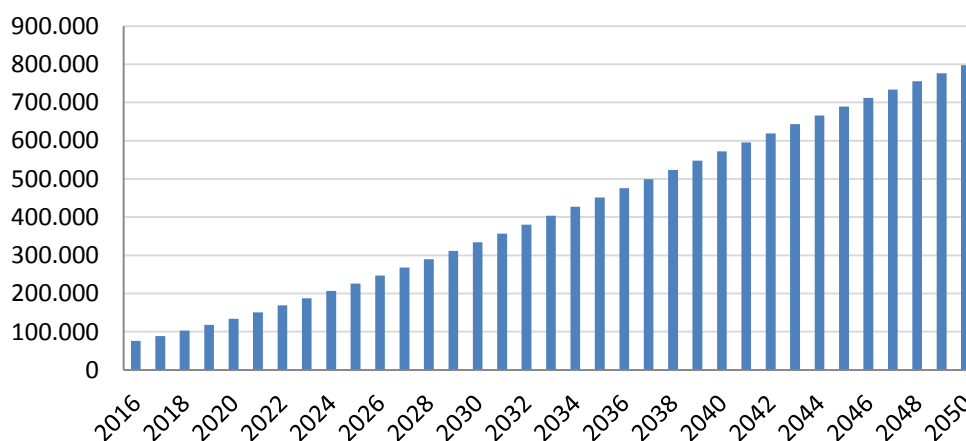


Figura 40: Proyección de la potencia acumulada en GSHP (MW_t).

A continuación, la Figura 41 presenta la potencia que se espera que se instale hasta el año 2050 y se ha obtenido mediante la diferencia de potencias acumuladas por año.

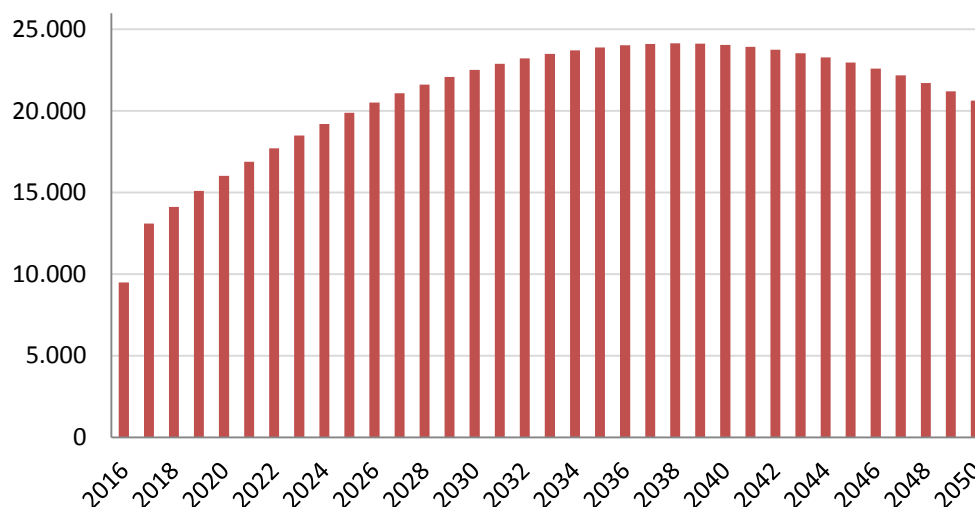


Figura 41: Proyección de la nueva potencia a instalar por año en GSHP (MW_t).

Un factor importante para evaluar la demanda futura de los materiales es el efecto de la repotenciación de instalaciones de bombas geotérmicas en el final de su vida útil. De acuerdo con la vida útil que se considera de 20 años [71] y los valores reportados por IGA [6] (anexo II). En la Figura 42 se presenta el comportamiento de la repotenciación hasta el 2050.

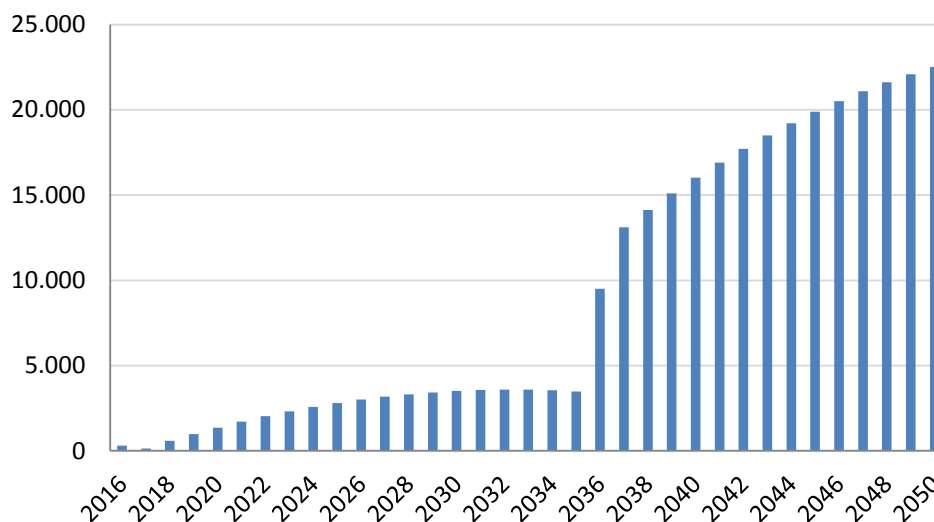


Figura 42: Proyección de la repotenciación en GSHP (MW_t).

Considerando la repotenciación (repowering) y la potencia nueva a instalar de las anteriores proyecciones, se puede establecer la proyección de la potencia total a instalar hasta el 2050.

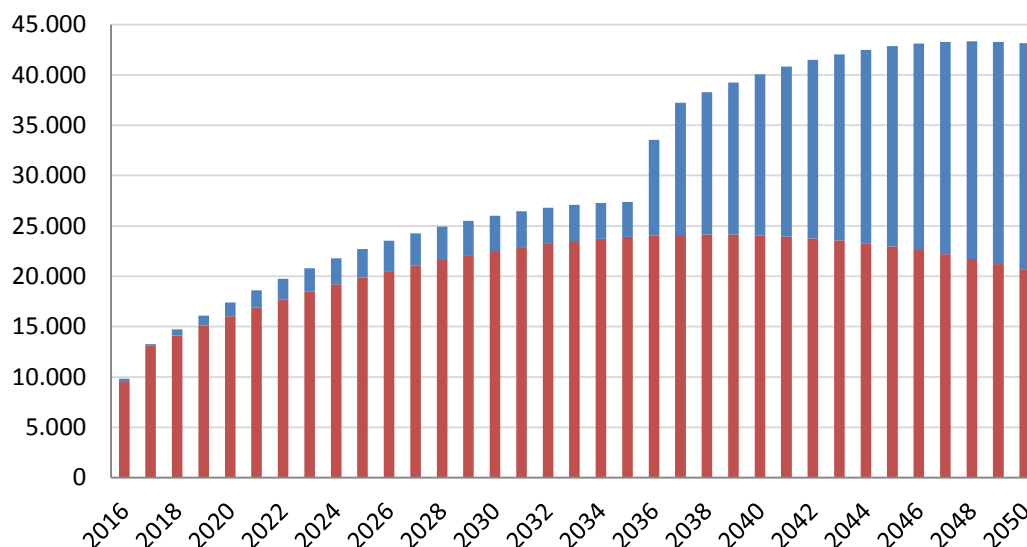


Figura 43: Proyección de la potencia anual esperada a instalar en GSHP (MW_e).

De la Figura 43, se espera que a partir del año 2036 se llevaran a cabo altos índices de repotenciación. Además, se espera que para el año 2050 los índices de repotenciación y nuevas instalaciones de GSHPs sean similares.

6.5.3 Caracterización de materiales en bombas de calor (GSHP).

Con los valores de los componentes reportados en la Tabla 21 y Tabla 22, se realiza la caracterización de los materiales involucrados mediante la composición típica del acero, latón y excluyendo a los materiales orgánicos debido a que no son objeto de este estudio.

Tabla 23: Contenido de materiales en GSHP.

Tecnología	Elemento	kg/MW	Ubicación en la GHSP
GSHP	Al	7.673,92	Compresor, ventilador y cubierta.
	As	0,561	Latón.
	C	10,50	Acero.
	Cr	1.063,76	Acero
	Cu	2.738,75	Cableado, tuberías, válvula de expansión y ventilador.
	Fe	12.055,42	Compresor, evaporador, condensador y cubierta.
	Mn	87,52	Acero
	Mo	43,76	Acero.
	Ni	272,37	Acero y elementos de seguridad
	P	3,93	Acero.
	Pb	245,98	Latón.
	S	2,62	Acero.
	Si	65,64	Acero.
	Sn	4,93	Latón.
	Zn	345,37	Latón.

Elaboración propia en base a datos proporcionados por [71], [72] y [73].

Para cubrir todas las posibilidades de las restricciones físicas de los materiales, se ha realizado el análisis de todos los materiales involucrados, no solo los críticos reportados por la CE [8]. También, se han considerado materiales convencionales como el Fe, Al y Cu que son los mayoritarios en la fabricación de bombas de calor.

6.5.4 Cantidad de materiales en uso (stock in use).

Se pretende establecer la importancia de la evaluación de la cantidad de materiales que la tecnología demanda y acumula (stock in use), con el objetivo de favorecer políticas de reciclaje.

Se presenta la Figura 44, donde se puede observar la cantidad de Fe, Al y Cu. Los valores para el Fe, Al y Cu de materiales en uso llegaría a ser 11 veces más de los utilizados en la actualidad.

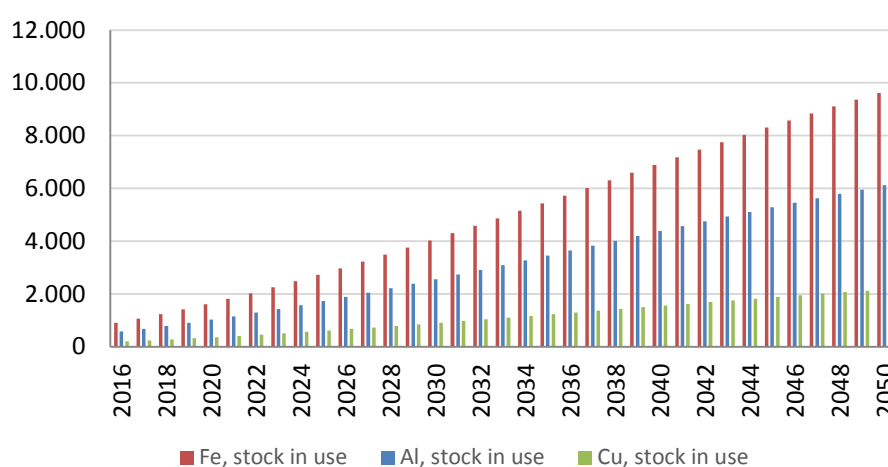


Figura 44: Evolución de la cantidad de Fe, Al y Cu acumulada para GSHP, stock in use. (kTon/año).

De la misma manera se presenta para el Pb y Ni, que su porción acumulativa aumentará 10 veces más (ver Figura 45).

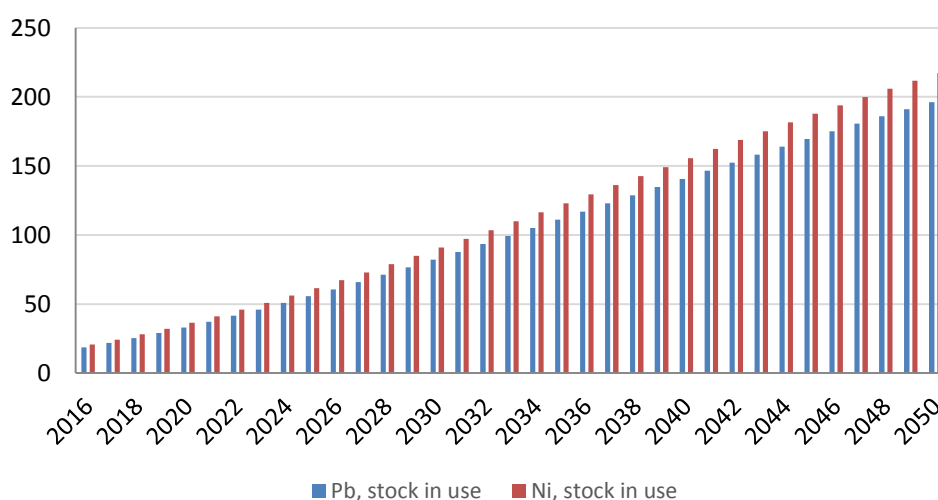


Figura 45: Evolución de Pb y Ni acumulada para GSHP, stock in use. (kTon/año).

Resulta evidente que los materiales más demandados para el aprovechamiento térmico de un recurso geotérmico son y serán el Fe, Al y Cu principalmente.

6.5.5 Evaluación de la posible escasez de los materiales.

De manera análoga al apartado 5.5.5. se pretende realizar la comparación de la demanda anual con la producción de materiales, considerando los valores de reciclaje y una tendencia de producción del tipo curva de Hubbert (Anexo III) respecto a las reservas.

Los materiales más demandados como el Fe y Al no presentan valores elevados respecto a la producción, para el 2050 apenas alcanzan 0,005% y 0,041% respectivamente. Esto es debido a la baja potencia instalada respecto a otras tecnologías y la alta cantidad de producción de estos dos materiales. A continuación se presenta las tendencias para el Cu y para el Ni.

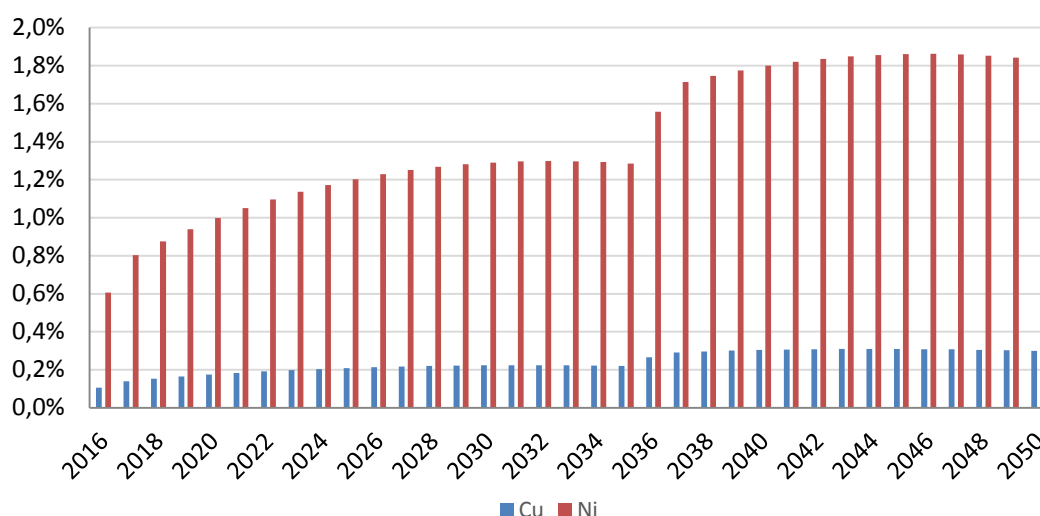


Figura 46: Evolución de la demanda de Cu y Ni respecto a las tendencias de producción.

De la misma manera se presenta para el Mo, Pb y Zn. Los valores de demanda anual respecto a la producción de depósitos mineros no superan el 0,7% en el periodo 2015 al 2050.²⁹

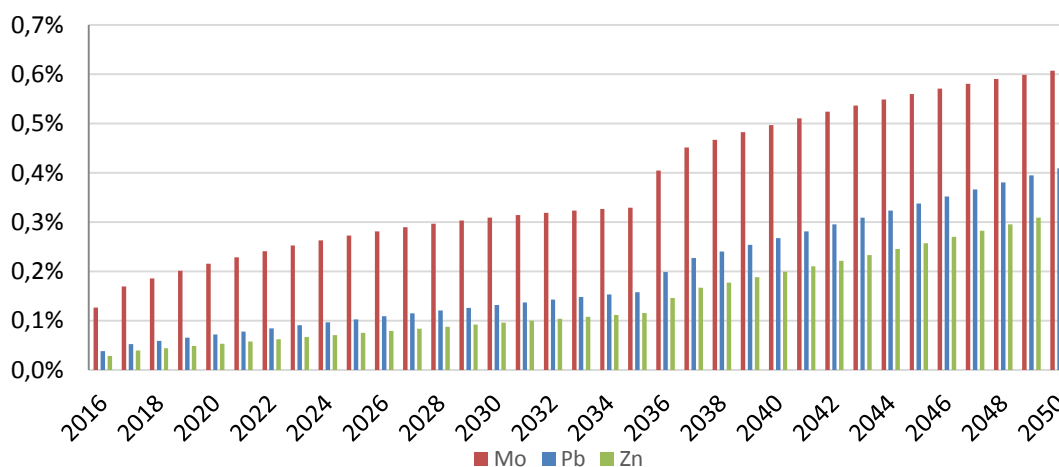


Figura 47: Evolución de la demanda de Mo, Pb y Zn respecto a las tendencias de producción.

²⁹ Valores respecto a reservas (anexo III).

Considerando las reservas actuales de los materiales estudiados (anexo III), se pretende establecer el impacto por el uso de las bombas de calor geotérmicas y la cantidad de materiales demandados en el periodo 2016-2050 respecto a las reservas y recursos.

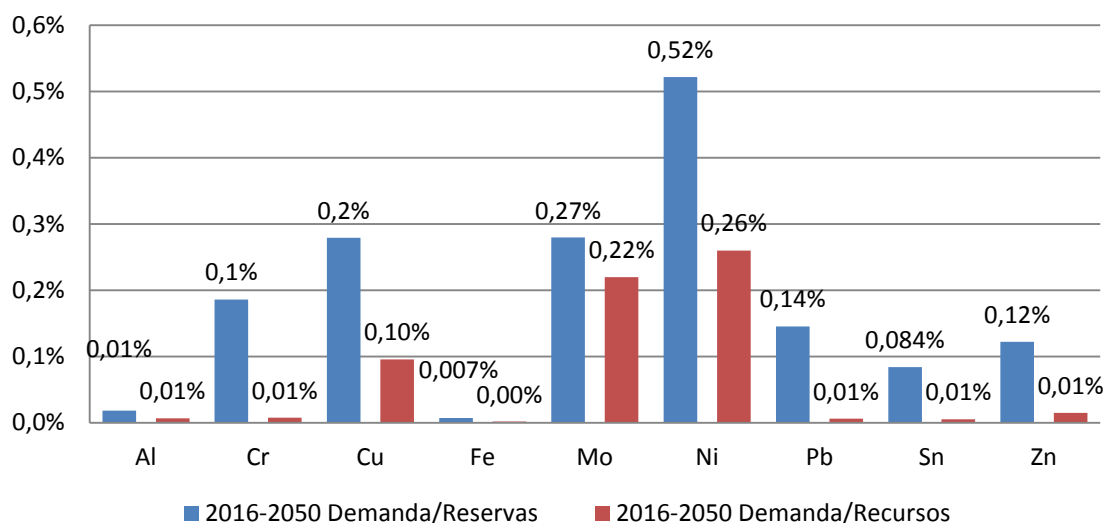


Figura 48: Demanda (2016-2050)/Reservas y Demanda (2016-2050)/Recursos.

El impacto de las GHSP a las reservas no superaría el 0,6% para el año 2050, esto es debido a la baja instalación esperada respecto a otras tecnologías. La mayor cantidad de materiales que acumularía la tecnología geotérmica llegaría a ser a partir del año 2036 donde se presentarían altos índices de repotenciación.

6.5.6 Análisis de la rareza termodinámica de las bombas de calor geotérmicas

La Figura 49 muestra el análisis de comparaciones entre la masa y la exergía (rarity) de las bombas de calor geotérmicas. Desde el punto de vista de la masa, el Fe constituye el 49 % de los GSHP. Lo cual cambia desde el punto de vista de rareza (rarity) que solo llega a constituir el 3,9%, esto es debido a la presencia de materiales más valiosos como el Al, Cu y Ni que cuentan con un mayor contenido exergético.

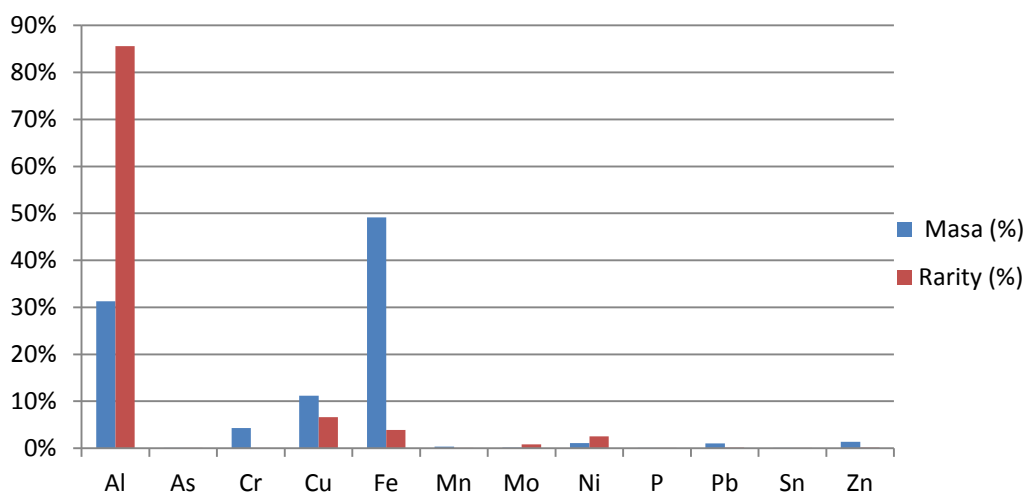


Figura 49: Comparación entre masa y exergía para GSHP (%).

A continuación se puede observar de manera acumulativa como el Al, Cu, Zn y Ni adquieren una representación más relevante en términos de exergía respecto a la contribución en masa, donde el Fe era predominante. El eje horizontal está ordenado de mayor a menor según su aportación en masa.

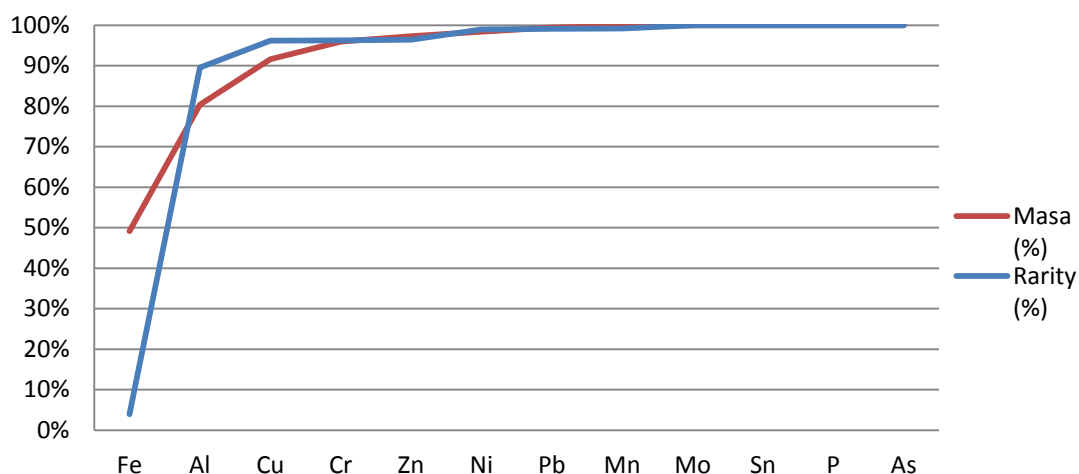


Figura 50: Comparación entre masa y exergía acumulativa (%).

A continuación se presenta el valor de la exergía de una bomba de calor, el cual se ha obtenido mediante la Tabla 2 y la cantidad de masa que demanda.

Tabla 24: Rarity de una bomba de calor GSHP.

Exergía	GSHP
GJ/MW	5712

7. Conclusiones.

Se tiene la certeza de que el aprovechamiento de generación térmica directa a partir de fuentes renovables tendrá un aumento a través del tiempo. El desarrollo de las tecnologías involucradas no solamente conlleva el uso de materiales, sino también de energía, que pueden considerarse limitantes para futuras instalaciones.

Se ha establecido que la tecnología predominante para el aprovechamiento geotérmico son las bombas de calor (GHSP), representando el 90% de la potencia instalada del total reportado. Para el aprovechamiento solar se cuenta con los colectores solares del tipo tubos de vacío (ETC) y placa plana (FPC). Desde el punto de vista del suministro en bioenergía, la tecnología más importante con el 68% es el cultivo de especies leñosas, seguidamente se tiene al carbón y la producción de biocombustibles.

Se ha realizado una revisión de fuentes oficiales y se ha establecido la capacidad instalada o producción energética en los últimos años y los escenarios que se esperan para los próximos 35 años. Se ha establecido a partir del análisis de tendencias que el valor de suministro bioenergético llegaría a ser alrededor de 160 EJ, una potencia esperada en colectores solares del tipo FPC y ETC de 6.702 GW_t y en geotérmica una potencia de bombas de calor GSHP cercana a los 800 GW_t. En la siguiente figura en el eje vertical izquierdo se muestran los valores de evolución en GW_t para solar térmica y geotérmica y en el eje vertical derecho se presentan en EJ los valores para bioenergía (Ver Figura 51).

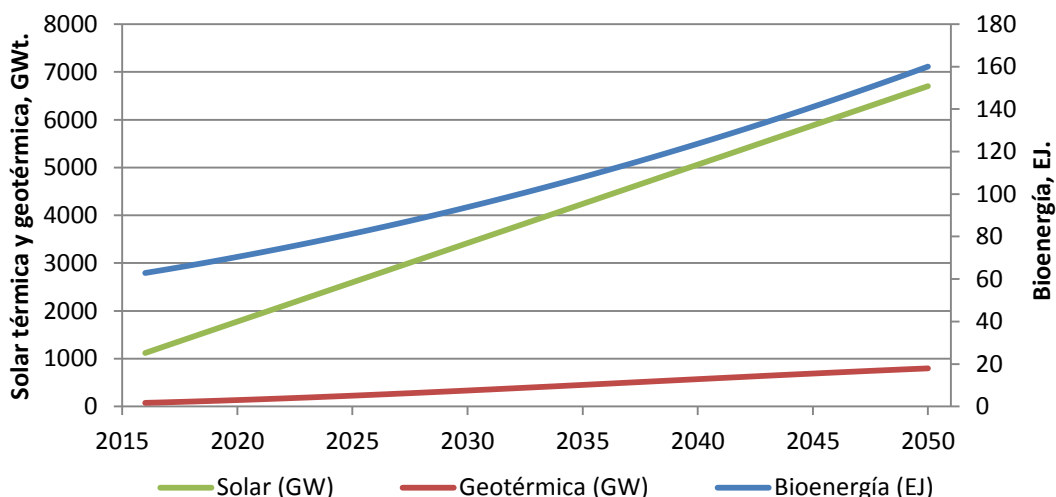


Figura 51: Evolución de las tecnologías de generación térmica.

En el despliegue de las tecnologías los materiales más demandados desde un punto de vista exergético son:

- **Geotérmica:** Al, Cu, Ni y Mo. La fabricación de una bomba de calor de 10 kW demandaría aproximadamente 57,12 GJ.
- **Solar térmica:** Al, Cu, Cr, Fe, Mo y Ni para colectores FPC y ETC donde tienen un contenido en exergía de 3.156,16 GJ/MW para FPC y ETC exige 2.769,93 GJ/MW.
- **Bioenergía:** Considerando la fase del cultivo, los materiales más demandados son el P y K con 0,7 GJ/ton y 1.227,3 GJ/ton respectivamente.

Resulta más conveniente comparar las tecnologías respecto a sus valores de rareza para tener una visión de su sostenibilidad, que respecto a los materiales, puesto que cada tecnología requiere diferentes materiales. Esta comparación de la sostenibilidad se realiza desde el punto de vista de su contenido en materiales a través del concepto de la rareza. A continuación se presenta de manera gráfica los resultados.

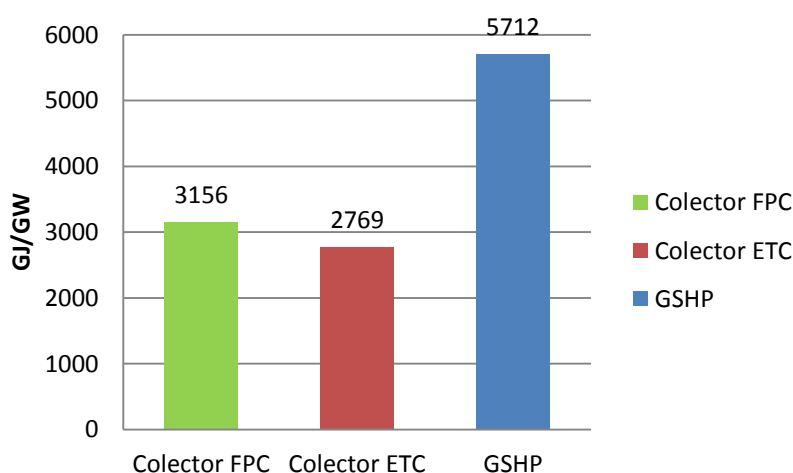


Figura 52: Comparación exergética de tecnologías térmicas.

La tecnología con mayor rarity es la bomba de calor geotérmica GSHP con 5712 GJ/GW, en segundo lugar se tiene a la tecnología de colectores FPC y en último lugar a los colectores del tipo ETC. Estos valores nos proporcionan una visión a considerar de lo valioso que llegan a ser algunos elementos dentro de las tecnologías, a pesar de no ser los mayoritarios en masa. Además, se deben tener en cuenta en futuras tecnologías de generación térmica y la mejora de productos (ecodiseño). Se debe señalar, que a esta componente de la sostenibilidad habría que añadirle otros factores como es la exergía en forma de energía necesaria para fabricar las distintas tecnologías, con un enfoque de la cuna a la tumba.

De la misma manera, en la siguiente tabla se presenta los resultados de la evaluación del valor de la rarity respecto su PCI para combustibles de origen biomásico.

Tabla 25: Comparación exergética de combustibles biomásicos.

	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Leña
	GJ/GJ	GJ/GJ	GJ/GJ	GJ/GJ
Rarity/PCI	2,30	1,76	1,38	0,30

El combustible con mayor rarity respecto a su PCI es el biodiésel con 2,3 GJ/GJ, en segundo lugar se encuentra el bioetanol, seguido por el carbón y por último la leña. Esto nos proporciona una visión al elegir tecnologías que requieran estos combustibles y estos valores se deben tener en cuenta en futuras políticas de desarrollo.

Considerando un escenario base para la producción de metales y utilizando una tendencia similar del tipo Hubbert, para el despliegue de las GSHP se considera que no se presentará restricción en el abastecimiento de materiales. En el mismo caso tenemos el aprovechamiento solar, la fabricación de colectores solares no implicará riesgo de crecimiento según los escenarios esperados. No obstante, es importante mencionar que debido a la demanda de materiales provenientes de la aleación del acero (Ni, Cr y Mo) se manifiesta en mayor necesidad la importancia del reciclaje.

Por otra parte, sin tener en cuenta los materiales de aleación del acero, para GSHP los materiales con mayor demanda son el Cu y Al mientras que para la fabricación de colectores solares térmicos es el Cu, los cuales son utilizados en otras tecnologías comprometiendo su disponibilidad y de la misma manera, deberán ser considerados en políticas de reciclaje.

El Cu para colectores solares térmicos y bombas de calor demandarían el 6,3% de la producción mundial para el año 2050, llegando a desplazar a otros sectores importantes como el sector eléctrico que actualmente demanda el 41%, el sector de la construcción con el 13% o el automotriz con el 10% y de esa manera verse comprometido su despliegue.

En lo que respecta al suministro de fertilizantes para la generación de biomasa y realizando las comparaciones con las tendencias de producción respecto a las reservas, el P presenta riesgo de abastecimiento con el 9% de la demanda, debido a que llegaría a competir con el sector de fertilizantes para el sector alimenticio y crearía un impacto en las reservas, en el caso menos optimista, menor al 4% hasta el 2050. Del mismo modo, si se compara la tendencia de producción respecto a los recursos (el escenario más optimista), para el año 2050 la demanda de P llegaría a ser menor al 4% y su demanda acumulada de materias primas entre el año 2000 y 2050 llegaría a ser menor al 1%.

Actualmente se considera que el 92% de la producción de K es destinado a fertilizantes [52]. En el escenario más desfavorable, la tendencia de producción respecto a las reservas llegaría a cubrir el 58% de la demanda para el 2050. El valor de las reservas de K (6 GTon) es muy bajo comparado con la cantidad estimada de recursos (250 GTon), y si se realiza la comparación de la curva de producción respecto a los recursos, la demanda de K para bioenergía llegaría a ser menor al 2%.

Para finalizar se presenta la Tabla 26, en la cual se resumen los principales resultados del trabajo.

Tabla 26: Resumen de resultados.

Recurso	Tecnología predominante	Evolución esperada hacia el 2050	Restricción de despliegue	Materiales críticos	Demanda vs producción, respecto a reservas o recursos para el año 2050.	Impacto sobre las reservas (demanda 2016-2050/reservas)	Impacto sobre los recursos (demanda 2016-2050/recursos)	Valores exergéticos por tecnología
Bioenergía	Leña, carbón, bioetanol y biodiésel	160 EJ	Sí	P	a reservas: <9%	<4%	<1%	Leña 2,3 GJ/GJ
					a recursos: <4%			Carbón 1,7 GJ/GJ
				K	a reservas: <58%	<14%	<1%	Bioetanol 1,3 GJ/GJ
					a recursos: <2%			Biodiésel 0,3 GJ/GJ
Solar	FPC y ETC	6702 GW	No	Cu	a reservas: 6,3%	<3,5%	<1,5%	FPC 3156 GJ/MW
								ETC 2769 GJ/MW
Geotérmico	GHSP	800 GW	No	Ni	a reservas: 1,8%	<0,6%	<0,26%	GHSP 5712 GJ/MW
				Cu	a reservas: 0,29%			

8. Referencias.

- [1] N. Tanaka, «TECHNOLOGY ROADMAP, GEOTHERMAL HEAT AND POWER, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY», 2012.
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Roadmap.pdf
- [2] A. Lang, D. Bradley, y G. Gauthier, «Global Bioenergy Statistics, World Bioenergy Association», 2016.
<http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/WBA%20GBS%202016.pdf>
- [3] M. Guo, W. Song, y J. Buhain, «Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 712–725, feb. 2015.
- [4] IEA, «Technology Roadmap - Bioenergy for Heat and Power», 2012.
- [5] Franz Mauthner y Werner Weiss, «Solar-Heat-Worldwide-2014, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.», 2014. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-bioenergy-for-heat-and-power-.html>
- [6] J. W. Lund y T. L. Boyd, «Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review», *Geothermics*, vol. 60, pp. 66-93, mar. 2016.
- [7] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, y V. Lo Brano, «Life cycle assessment of a solar thermal collector», *Renew. Energy*, vol. 30, n.º 7, pp. 1031-1054, jun. 2005.
- [8] European Commission, «On the review of the list of raw materials for the EU and the implementation of the Raw materials initiative.», 2014.
- [9] A. Valero Delgado, A. Valero Capilla, y A. Domínguez, «Exergy Replacement Cost of Mineral Resources», *Environ. Account. Manag.*, pp. 147–159, 2013.

- [10] A. Valero y A. Valero, *Thanatia. The destiny of the Earth's mineral resources*. World Scientific Press, 2014.
- [11] N. Georgescu-Roegen, «The Entropy Law and the economic process in retrospect.», vol. 12, pp. 3-25, 1986.
- [12] J. Szargut, D. Morris, y Steward, «Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes.», vol. 11, pp. 245-261, 1987.
- [13] A. Valero Delgado y S. Usón Gil, *Ecología Industrial: cerrando el ciclo de materiales*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2011.
- [14] A. Valero, A. Agudelo, y A. Valero, «The crepuscular planet. A model for the exhausted atmosphere and hydrosphere», *Energy*, vol. 36, n.º 6, pp. 3745–3753, jun. 2011.
- [15] A. Valero y A. Valero, «Exergy of comminution and the Thanatia Earth's model», *Energy*, vol. 44, n.º 1, pp. 1085–1093, ago. 2012.
- [16] Valero Capilla, Antonio y Valero Delgado, Alicia, *Exergy analysis of resources and processes*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.
- [17] Faber, M, «A biophysical approach to the economy entropy, environment, and resources. In: *Energy and Time in Economic and Physical Science*.», 1984.
- [18] A. Valero y A. Valero, «Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth's mineral capital. The case of bauxite–aluminium and limestone–lime chains», *Energy*, vol. 35, n.º 1, pp. 229–238, ene. 2010.
- [19] Kennecott Utah Copper Corporation, «Copper Environmental Profile , Life cycle assessment.»
- [20] C. D. y Singer, D, «Mineral deposit models», Tech. rep., US Geological Survey.
- [21] A. Valero, A. Valero, y J. B. Gómez, «The crepuscular planet. A model for the exhausted continental crust», *Energy*, vol. 36, n.º 1, pp. 694–707, 2011.
- [22] G. Mudd, «Global Trends and Environmental Issues in Nickel Mining: Sulfides versus laterites», 2010.
- [23] UNEP, U. N., «Recycling report», 2011.
http://www.unep.org/pdf/Metals_Recycling_Rates_Summary.pdf
- [24] G. Calvo, A. Ortego, A. Valero, y A. Valero, «Raw materials: Hubbert peaks and future production».
- [25] World Energy Council, «World Energy Resources», 2013. [//www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf)
- [26] IPCC, «Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Summary for Policymakers and Technical Summary. SPECIAL REPORT OF IPCC», 2012.
https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf
- [27] D. Garraín y Y. Lechón, «PRODUCCIÓN DE ACEITE VEGETAL HIDROTRATADO EN ESPAÑA : CONFORMIDAD CON LA DIRECTIVA 2009 / 28 / EC EN EL AHORRO», pp. 11–13, 2012.
- [28] M. Van Der Hoeven, «TECHNOLOGY ROADMAP, SOLAR HEATING AND COOLING. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY», 2012.
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Heating_Cooling_Roadmap_2012_WEB.pdf
- [29] M. Guo, W. Song, y J. Buhain, «Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 712–725, feb. 2015.
- [30] M. Oleszek, M. Matyka, J. Lalak, J. Tys, y E. Paprota, «Characterization of *Sida hermaphrodita* as a feedstock for anaerobic digestion process», *J. Food Agric. Environ.*, 2013.
- [31] USDA Forest Service., «Desk Guide & Toolkit, WOODY BIOMASS». https://www.forestsandrangelands.gov/Woody_Biomass/documents/biomass_deskguide.pdf

- [32] E. Christoforou, P. A. Fokaides, C. J. Koroneos, y L. Recchia, «Life Cycle Assessment of first generation energy crops in arid isolated island states: The case of Cyprus», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 14, pp. 1–8, abr. 2016.
- [33] K. J. Jankowski, B. Dubis, W. S. Budzyński, P. Bórawski, y K. Bułkowska, «Energy efficiency of crops grown for biogas production in a large-scale farm in Poland», *Energy*, vol. 109, pp. 277–286, 2016.
- [34] S. Fazio y L. Barbanti, «Energy and economic assessments of bio-energy systems based on annual and perennial crops for temperate and tropical areas», *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 233–241, 2014.
- [35] H. Borkowska, R. Molas, y A. Kupczyk, «Virginia fanpetals (sida hermaphrodita rusby) cultivated on light soil; height of yield and biomass productivity», *Pol. J. Environ. Stud.*, 2009.
- [36] M. J. Antal y M. Grønli, «The Art, Science, and Technology of Charcoal Production», pp. 1619-1640, 2003.
- [37] Food and Agriculture Organization of The United Nations, «FAO. FAOStat— forestry database.», Geneva, Switzerland, 2013.
- [38] M. R. Peláez-Samaniego, M. García-Perez, L. B. Cortez, F. Rosillo-Called, y J. Mesae, «Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy.», *Renew Sustain Energy*, p. Rev 12: 1063-1086.
- [39] S. González-García, M. T. Moreira, G. Feijoo, y R. J. Murphy, «Comparative life cycle assessment of ethanol production from fast-growing wood crops (black locust, eucalyptus and poplar)», *Biomass Bioenergy*, 2012.
- [40] U.N. Food and Agriculture Organization (FAO), «Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities», Rome, 2008.
- [41] D. Rajagopal et al., «Challenge of Biofuel: Filling the Tank without Emptying the Stomach?», vol. 2, 2007.
- [42] Rosamond L. Naylor et al., «The Ripple Effect: Biofuels, Food Security, and the Environment», vol. 49, n.º 9, pp. 30-43, nov. 2007.
- [43] J. Hong, Y. Zhang, X. Xu, y X. Li, «Life cycle assessment of corn- and cassava-based ethylene production», *Biomass Bioenergy*, vol. 67, pp. 304–311, 2014.
- [44] US Department of Agriculture, USDA, «Fertilizer Use and Price Economic Research Service», mar. 2007.
- [45] C. Gracia, *Biocombustibles: ¿energía o alimento?* 2009.
http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/Cap%C3%ADulo%205_Biodiesel.pdf
- [46] S. Foteinis, V. Kouloumpis, y T. Tsoutsos, «Life cycle analysis for bioethanol production from sugar beet crops in Greece», *Energy Policy*, vol. 39, n.º 9, pp. 4834–4841, 2011.
- [47] ECOFYS, «Renewable energy progress and biofuels sustainability, Technical report, Report for the European Commission», 2012.
- [48] Emilio Font de Mora Rullán, «Application of Thermoconomics to Assess and Improve the Efficiency of Bioenergy Production Plants and Land-To-Tank Cycles», Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2013.
- [49] A. Iriarte, J. Rieradevall, y X. Gabarrell, «Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 4, pp. 336–345, 2010.
- [50] A. G. Queiroz, L. França, y M. X. Ponte, «The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“Dendê”) in the Amazon», vol. 36, pp. 50-59, 2012.
- [51] É. G. Castanheira, R. Grisoli, S. Coelho, G. Anderi da Silva, y F. Freire, «Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe: comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil», *J. Clean. Prod.*, vol. 102, pp. 188–201, 2015.

- [52] «ANNEXES TO THE REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU REPORT OF THE AD HOC WORKING GROUP ON DEFINING CRITICAL RAW MATERIALS Report on Critical raw materials for the EU», 2014.
- [53] A. Bahadori y C. Nwaoha, «A review on solar energy utilisation in Australia», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 1-5, feb. 2013.
- [54] W. Weiss y F. Mauthner, «SOLAR HEATING AND COOLING», p. 59, 2014. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Heating_Cooling_Roadmap_2012_WEB.pdf
- [55] P. Frankl, «Renewable Energy Essentials: Geothermal». https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Essentials.pdf
- [56] R. Zhao, L. Zhao, S. Deng, y N. Zheng, «Trends in patents for solar thermal utilization in China», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 852-862, dic. 2015.
- [57] S. Seddegh, X. Wang, A. D. Henderson, y Z. Xing, «Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 517-533, sep. 2015.
- [58] W. Weiss y P. Biermayr, «Renewable Energy Essential: Potential of Solar Thermal in Europe», 2009.
- [59] Z. Wang, W. Yang, F. Qiu, X. Zhang, y X. Zhao, «Solar water heating: From theory, application, marketing and research», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 68-84, ene. 2015.
- [60] REN21& Institute for Sustainable Energy Policies, «Renewables Global Futures Report - Scenario Profiles Report». http://www.martinot.info/REN21_GFR_2013_scenarios.pdf
- [61] A. De Laborderie *et al.*, «Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment», 2011.
- [62] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, y V. Lo Brano, «Life cycle assessment of a solar thermal collector», *Renew. Energy*, vol. 30, n.º 7, pp. 1031–1054, jun. 2005.
- [63] E. Carnevale, L. Lombardi, y L. Zanchi, «Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale», *Energy*, vol. 77, pp. 434–446, dic. 2014.
- [64] Y. Hang, M. Qu, y F. Zhao, «Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States», *Energy Build.*, vol. 45, pp. 181–188, feb. 2012.
- [65] Great Britain Parliament: House of Lords: Science Technology Commite, «Energy Efficiency, 2nd Report of Session», 2006 2005.
- [66] E. S. P. Aradóttir *et al.*, «Toward Cleaner Geothermal Energy Utilization: Capturing and Sequestering CO₂ and H₂S Emissions from Geothermal Power Plants», *Transp. Porous Media*, vol. 108, n.º 1, pp. 61-84, 2014.
- [67] M. Mburu, «GEOTHERMAL ENERGY UTILISATION». <http://os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-19-0203.pdf>
- [68] Mary H. Dickson y M. F. Mario Fanelli, «What is Geothermal Energy?», presentado en International Geothermal Association, 2004.
- [69] B. Zheng, J. Xu, T. Ni, y M. Li, «Geothermal energy utilization trends from a technological paradigm perspective», *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 430-441, may 2015.
- [70] Prof. Ladislaus Rybach y Dr. Sc. Beata K_{pi}ska, «Financing Renewable Energy Transition - IGA», 2008.
- [71] B. Greening y A. Azapagic, «Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK», *Energy*, vol. 39, n.º 1, pp. 205-217, mar. 2012.
- [72] F. J. Rey Martínez *et al.*, «Life cycle assessment of a semi-indirect ceramic evaporative cooler vs. a heat pump in two climate areas of Spain», *Appl. Energy*, vol. 88, n.º 3, pp. 914–921, 2011.

- [73] F. J. Rey *et al.*, «Life Cycle Assessment and External Environmental Cost Analysis of Heat Pumps», *Environ. Eng. Sci.*, vol. 21, 2004.

ANEXOS

Anexo I: Suministro de energía primaria hasta el consumo
final de energía de todas las fuentes.

Suministro total de energía primaria – Mundial

	Total	Carbón	Petróleo	Gas natural	Nuclear	Renovables	Renovables (%)
2000	421	98,1	153	86,5	28,3	54,9	13,0%
2005	481	124	168	98,5	30,2	60,7	12,6%
2010	535	147	173	115	30,1	71,0	13,3%
2011	550	159	173	117	28,2	72,8	13,3%
2012	558	161	176	119	26,9	75,3	13,5%
2013	567	164	177	121	27,1	78,1	13,8%
Prom.	2,3%	4,0%	1,1%	2,6%	-0,3%	2,8%	

Todos los valores en EJ. (Fuente: IEA reportados por [2])

Suministro de energía primaria y consumo final de energía de todas las fuentes para el 2013, EJ

Combustibles	Primaria	Energía Final				
		Total	Electricidad	Calor derivado	Calor directo	Transporte
Fósiles	462	282	47,1	10,7	120	105
Nuclear	27,1	7,44	7,41	0,02	0,00	0,00
Renovables (total)	78,1	65,0	15,5	0,77	46,0	2,70
Bioenergía	57,7	49,5	1,38	0,74	44,6	2,70
Hidroeléctrica	13,6	11,6	11,6	0,00	0,00	0,00
Eólica	1,90	1,90	1,90	0,00	0,00	0,00
Solar PV	0,42	0,42	0,42	0,00	0,00	0,00
Solar térmica	1,19	1,10	0,02	0,0004	1,09	0,00
Geotérmica	2,77	0,32	0,21	0,03	0,08	0,00
Tidal, Olas, etc.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	567	355	70.0	11.5	166	107

Todos los valores en EJ. (Fuente: IEA reportados por [2])

Suministro total de energía primaria de renovables – Mundial

	Total	Bioenergía	Hidroeléctricas	Eólica	Solar PV	Geotérmica	Solar térmica	Tidal, Olas, etc.
2000	54,9	42,9	9,43	0,11	0,00	2,19	0,21	0,002
2005	60,7	47,2	10,6	0,37	0,01	2,25	0,30	0,002
2010	71,0	53,9	12,4	1,23	0,12	2,70	0,64	0,002
2011	72,8	54,9	12,6	1,57	0,23	2,76	0,78	0,002
2012	75,3	56,1	13,2	1,88	0,36	2,78	0,92	0,002
2013	78,1	57,7	13,6	2,29	0,50	2,77	1,19	0,003

Todos los valores en EJ. (Fuente: IEA reportados por [2])

ANEXO II: Potencia instalada en geotérmica, solar térmica y suministro de biomasa por países.

Resumen de datos del uso de energía directa geotérmica (2015).

Country	MWt	TJ/yr	GWh/yr	Load factor
Albania	16,23	107,59	29,89	0,21
Algeria	54,64	1.699,65	472,16	0,99
Argentina	163,6	1.000,03	277,81	0,19
Armenia	1,5	22,5	6,25	0,48
Australia	16,09	194,36	53,99	0,38
Austria	903,4	6.538,00	1.816,26	0,23
Belarus	4,73	113,53	31,54	0,76
Belgium	206,81	864,36	240,12	0,13
Bosnia & Herzegovina	23,92	252,33	70,1	0,33
Brazil	360,1	6.622,40	1.839,70	0,58
Bulgaria	93,11	1.224,42	340,14	0,42
Canada	1.457,78	11.388,00	3.163,59	0,25
Caribbean Islands	0,1	2,78	0,77	0,85
Chile	19,91	186,12	51,7	0,3
China	17.870,00	174.352,00	48.434,99	0,31
Columbia	18	289,88	80,53	0,51
Costa Rica	1	21	5,83	0,67
Croatia	79,94	684,49	190,15	0,27
Czech Republic	304,5	1.790,00	497,26	0,19
Denmark	353	3.755,00	1.043,14	0,34
Ecuador	5,16	102,4	28,45	0,63
Egypt	6,8	88	24,45	0,41
El Salvador	3,36	56	15,56	0,53
Estonia	63	356	98,9	0,18
Ethiopia	2,2	41,6	11,56	0,6
Finland	1.560,00	18.000,00	5.000,40	0,37
France	2.346,90	15.867,00	4.407,85	0,21
Georgia	73,42	695,16	193,12	0,3
Germany	2.848,60	19.531,30	5.425,80	0,22
Greece	250,05	1.484,45	412,38	0,19
Greenland	1	21	5,83	0,67
Guatemala	2,31	56,46	15,68	0,78
Honduras	1,93	45	12,5	0,74
Hungary	905,58	10.268,06	2.852,47	0,36
Iceland	2.040,00	26.717,00	7.421,98	0,42
India	986	4.302,00	1.195,10	0,14
Indonesia	2,3	42,6	11,83	0,59
Iran	81,5	1,103,12	306,45	0,43
Ireland	265,54	1,240,54	344,62	0,15
Israel	82,4	2,193,00	609,22	0,84
Italy	1.355,00	11.065,00	3.073,86	0,26
Japan	2.186,17	26.130,08	7.258,94	0,38

Jordan	153,3	1.540,00	427,81	0,32
Kenya	22,4	182,62	50,73	0,26
Korea (South)	835,8	2.682,65	745,24	0,1
Latvia	1,63	31,81	8,84	0,62
Lithuania	94,6	712,9	198,04	0,24
Macedonia	48,68	601,11	166,99	0,39
Madagascar	2,81	75,59	21	0,85
Mexico	155,82	4.171,00	1.158,70	0,85
Mongolia	20,16	340,46	94,58	0,54
Morocco	5	50	13,89	0,32
Nepal	3,32	81,11	22,53	0,78
Netherlands	899	8.064,00	2.294,63	0,28
New Zealand	487,45	8.621,00	2.394,91	0,56
Norway	1.300,00	8.260,00	2.294,63	0,2
Pakistan	0,54	2,46	0,68	0,14
Papua New Guinea	0,1	1	0,28	0,32
Peru	3	61	16,95	0,64
Philippines	3,3	39,58	11	0,38
Poland	488,84	2.742,60	761,89	0,18
Portugal	35,2	478,2	132,84	0,43
Romania	245,13	1.905,32	529,3	0,25
Russia	308,2	6.143,50	1.706,66	0,63
Saudi Arabia	44	152,89	42,47	0,11
Serbia	116,54	1.808,82	502,49	0,49
Slovak Republic	149,4	2.469,60	686,05	0,52
Slovenia	187,83	1.264,50	315,28	0,21
South Africa	2,3	37	10,28	0,51
Spain	64,13	344,85	95,8	0,17
Sweden	5.600,00	51.920,00	14.423,38	0,29
Switzerland	1.733,08	11.836,80	3.288,26	0,22
Tajikistan	2,93	55,4	15,39	0,6
Thailand	128,51	1.181,20	328,14	0,29
Tunisia	43,8	364	101,12	0,26
Turkey	2.936,8030	45.892,00	12.748,80	0,5
Ukraine	10,9	118,8	33	0,35
United Kingdom	283,76	1.906,50	529,63	0,21
United States	17.415,91	75.862,20	21.074,52	0,14
Venezuela	0,7	14	3,89	0,63
Vietnam	31,2	92,33	25,65	0,09
Yemen	1	15	4,17	0,48
Total	70.884,64	592.638,00	164.634,84	0,27

Fuente: IGA y reportados en [6].

Resumen de datos del uso de energía solar térmica directa (final del 2012).

Country	Water Collectors			Air Collectors		TOTAL MWth
	unglazed	FPC	ETC	unglazed	glazed	
Albania		77,8	0,6			78,3
Australia	3.045,0	2.035,6	47,6	196,0	5,0	5.329,2
Austria	391,0	3.002,7	55,7		1,3	3.450,8
Barbados*		92,2				92,2
Belgium	31,5	230,6	38,5			300,7
Brazil	1.620,3	4.163,1				5.783,4
Bulgaria		84,0	1,4			85,5
Canada	544,7	43,0	25,0	244,8	16,9	874,4
Chile***		56,0				56,0
China		12.177,7	168.212,3			180.390,0
Croatia#		84,0				84,0
Cyprus	1,5	605,7	16,2			623,4
Czech Republic	327,6	235,1	61,5			624,2
Denmark	14,4	444,0	6,0	2,3	12,6	479,3
Estonia		2,8	1,8			4,6
Finland	8,2	21,2	4,5			34,0
France (mainland) +	74,0	1.623,3	29,5	3,5	0,8	1.731,1
Germany	409,9	10.095,4	1.282,4		21,5	11.809,2
Greece		2.872,9	12,5			2.885,4
Hungary	9,5	118,1	35,8	1,3	1,0	165,6
India		3.521,7	994,0		14,1	4.529,8
Ireland		129,2	61,2			190,4
Israel	22,3	2.901,5		0,4		2.924,2
Italy	30,6	2.048,6	333,5			2.412,7
Japan		3.064,8	58,3		352,1	3.475,2
Jordan***	4,2	611,4	171,3			786,8
Korea. South		1.179,4				1.179,4
Latvia		2,0	0,8			2,8
Lebanon***		163,8	204,4			368,2
Lithuania		2,3	1,9			4,2
Luxembourg		24,5	3,3			27,9
Macedonia*		17,5	0,5			18,0
Malta		25,2	8,6			33,8
Mexico	582,1	610,6	228,2	0,2	5,6	1.426,7
Morocco***		343,9				343,9
Mozambique		0,2				0,2
Namibia**		14,5	0,9			15,4
Netherlands	293,1	300,2	11,9			605,2

New Zealand*	4,9	100,1	6,8			111,8
Norway	1,4	22,0	1,9		2.1	27,4
Poland		641,6	206,5			848,1
Portugal	1,5	661,9	15,5			678,9
Romania		56,5	21,0			77,5
Russia#		12,3	0,9			13,2
Slovakia		88,1	14,8			102,9
Slovenia		117,3	13,5			130,8
South Africa	606,8	266,7	80,9			954,5
Spain	93,9	1.862,9	117,2			2.074,0
Sweden	91,0	182,0	42,0			315,0
Switzerland	148,1	686,7	51,1	613,3		1.499,2
Taiwan	1,6	927,1	75,3			1.003,9
Thailand		84,3				84,3
Tunisia		415,1	32,3			447,5
Turkey		9.580,2	1.268,4			10.848,5
United Kingdom		376,6	120,2	13,3		510,1
United States	14.311,4	1.853,3	82,1	66,7	14,0	16.327,4
Uruguay**		8,8				8,8
Zimbabwe		13,1	0,6			13,7
TOTAL	22.670	70.983	174.061	1.142	447	269.303

Fuente: IEA Solar Heating & Cooling Programme (Datos reportados en [5])

Note: Si el dato no es dado: no existe una base confiable para ese tipo de colector.

FPC: Colector de Placa Plana; ETC: Colector de tubos de vacío.

* Se refiere a la capacidad total para el año 2009

** Se refiere a la capacidad total para el año 2011

*** Capacidad total en operación es basada en estimaciones para nuevas instalaciones en el 2012

Nuevos países incluidos en comparación con la edición de 2013 de este informe

+ Las cifras correspondientes a Francia se refieren a la Francia metropolitana solamente, territorios de ultramar de Francia (DOM) no se consideran.

Suministro total de energía primaria de biomasa. Países top 10 (2013).

Countries	TPES (2013) EJ	crecimiento 200-2013
1 China	9,03	6,36%
2 India	7,89	26,6%
3 Nigeria	4,56	56,20%
4 USA	4,08	32,90%
5 Brazil	3,40	74,20%
6 Indonesia	2,30	9,82%
7 Ethiopia	1,87	60,90%
8 Pakistan	1,27	26,60%
9 Thailand	1,03	68,80%
10 Tanzania	0,84	60,90%
Total (Top 10)	36,3	-
EU-28	5,87	113%
World	57,7	34%

Fuente: IEA y WBA³⁰ (Datos reportados en [2])

³⁰ World Bioenergy Association

ANEXO III: Datos de reservas y producción de materiales.

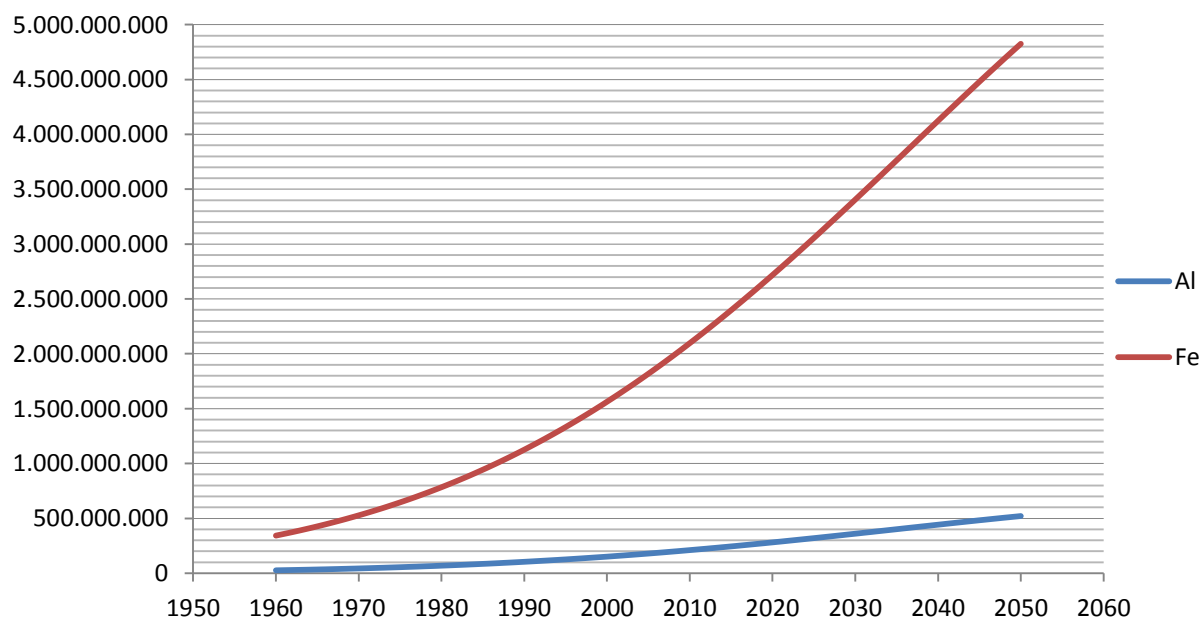
Reservas mundiales de materiales.

Elemento	Reservas mundiales (kton)
Al	28000000
As	1080
Cr	480000
Cu	720000
Fe	87000000
Mn	570000
Mo	11000
Ni	38880
K	6000000
P ³¹	67000000
Pb	87000
Sn	4800
Ti	397000
Zn	230000

Fuente: Datos actualizados de [10]

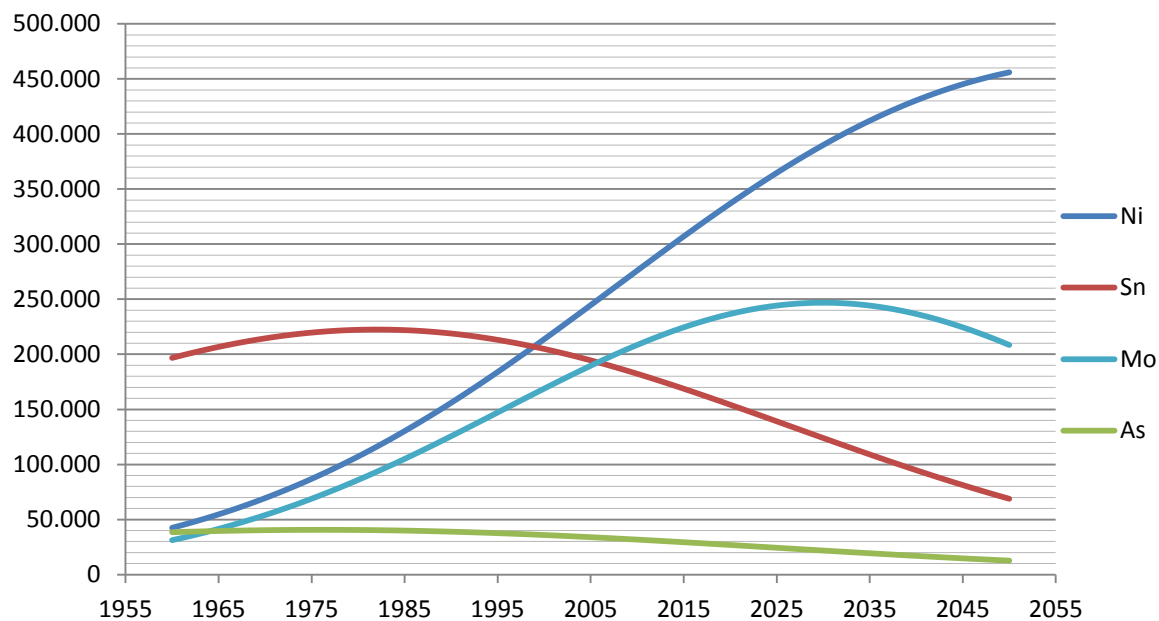
Tendencias de producción de materiales.

Hierro y aluminio (ton)

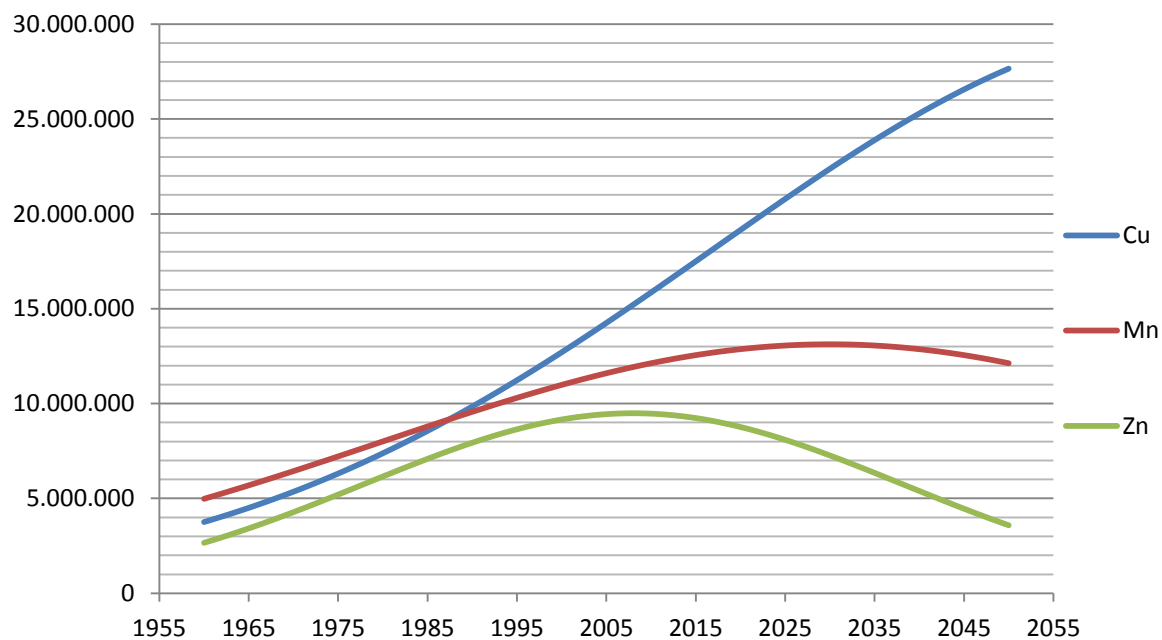


Fuente: Datos actualizados de [10]

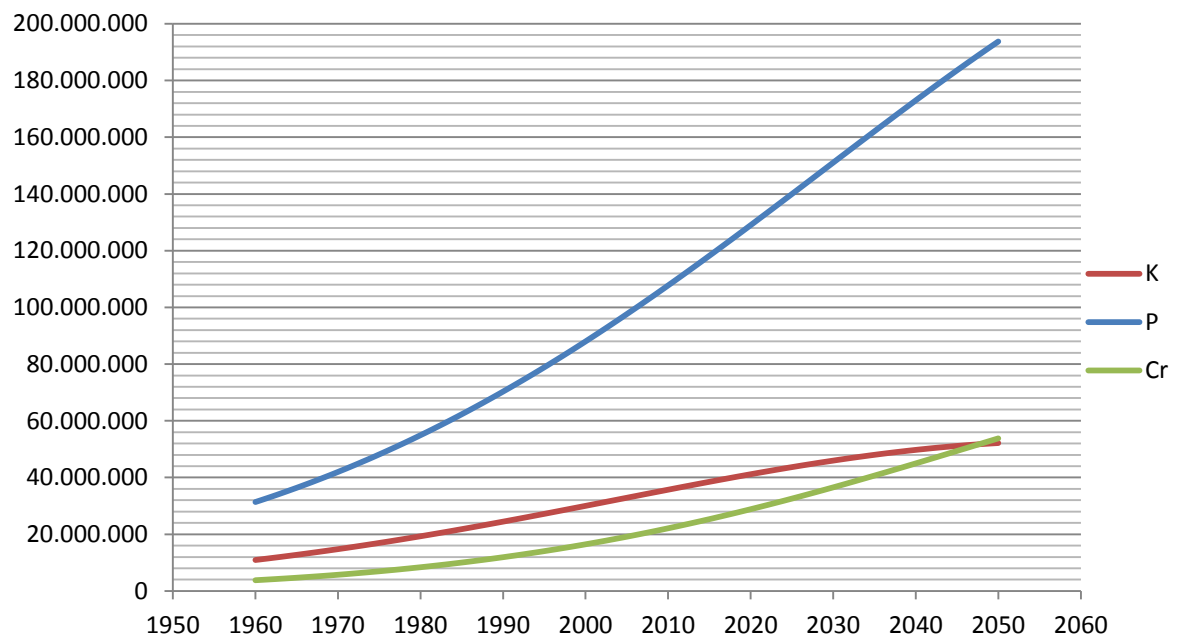
³¹ Roca Fosfórica.

Níquel, arsénico, molibdeno y estaño (ton)

Fuente: Datos actualizados de [10]

Cobre, manganeso y zinc (ton)

Fuente: Datos actualizados de [10]

Fósforo, potasio y cromo (ton)

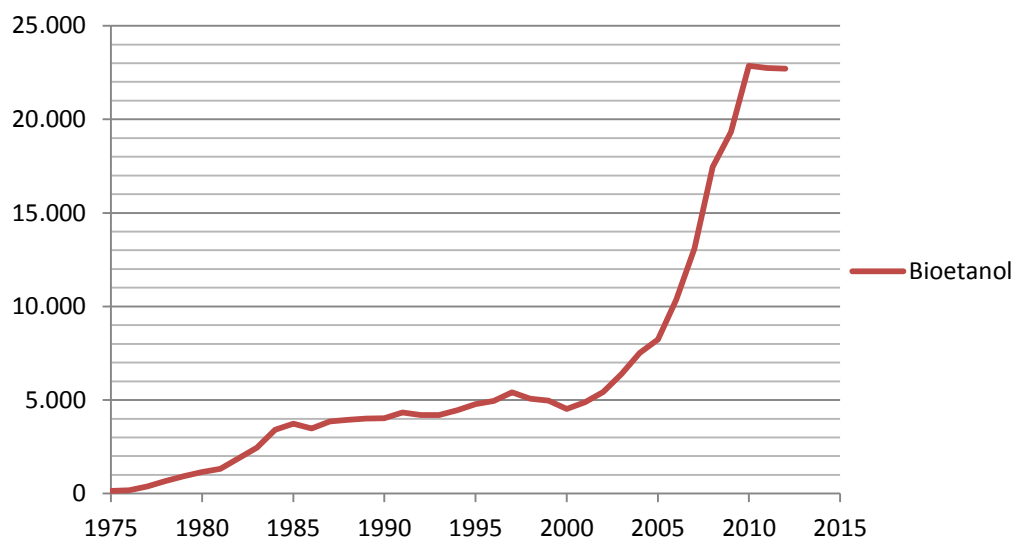
Fuente: Datos actualizados de [10].

ANEXO IV: Datos históricos de producción de biocombustibles.

Producción mundial de bioetanol. (1975-2012)

Año	Producción	Año	Producción
	Millones de galones		Millones de galones
1975	147	1994	4.458
1976	175	1995	4.775
1977	388	1996	4.954
1978	668	1997	5.420
1979	933	1998	5.073
1980	1.154	1999	4.972
1981	1.315	2000	4.519
1982	1.889	2001	4.874
1983	2.452	2002	5.420
1984	3.403	2003	6.394
1985	3.732	2004	7.517
1986	3.485	2005	8.227
1987	3.857	2006	10.353
1988	3.937	2007	13.089
1989	4.013	2008	17.453
1990	4.019	2009	19.317
1991	4.325	2010	22.861
1992	4.196	2011	22.742
1993	4.201	2012	22.715

Fuente: Compilado por Earth Policy Institute con datos de 1975-1998 desde F.O. Licht, World Ethanol and Biofuels Report, vol. 6, no. 4 (23 October 2007), p. 63; 1999-2002 from F.O. Licht, World Ethanol and Biofuels Report, vol. 7, no. 18 (26 May 2009), p. 365; 2003-2012 from F.O. Licht, World Ethanol and Biofuels Report, vol. 10, no. 16 (24 April 2012), p. 323.

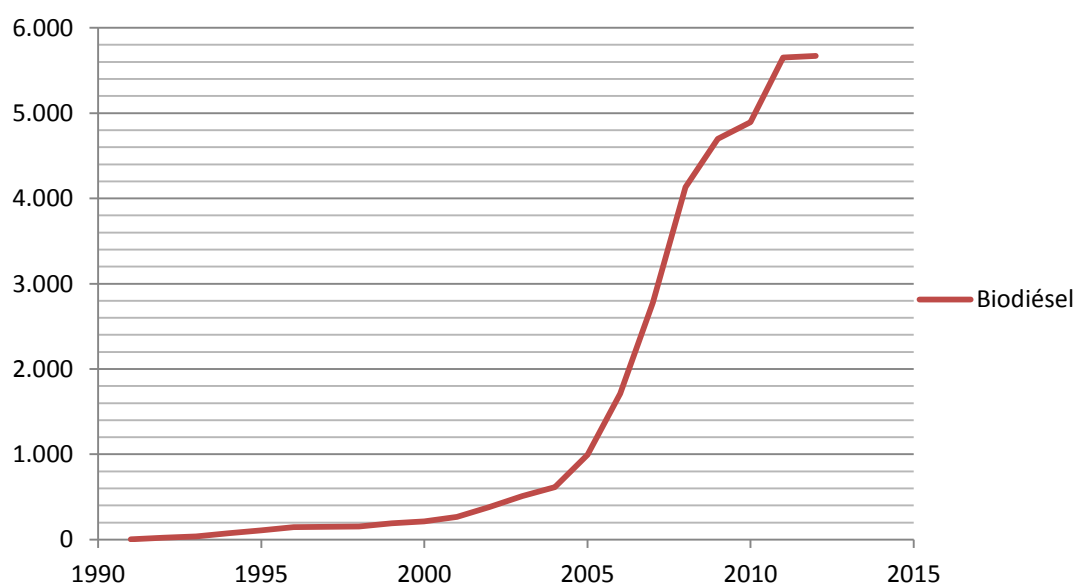


Fuente: Elaboración propia con datos de Earth Policy Institute

Producción mundial de biodiésel.

Año	Producción	Año	Producción
	Millones de galones		Millones de galones
1991	3	2002	383
1992	23	2003	510
1993	38	2004	614
1994	75	2005	995
1995	108	2006	1.710
1996	144	2007	2.775
1997	151	2008	4.132
1998	155	2009	4.699
1999	190	2010	4.893
2000	213	2011	5.651
2001	265	2012	5.670

Fuente: Compilado por U.N. Food y Agriculture Organization (FAO) de D. Rajagopal et al., "Challenge of Biofuel: Filling the Tank without Emptying the Stomach?" Environmental Research Letters, vol. 2 (2007); y de Rosamond L. Naylor et al., "The Ripple Effect: Biofuels, Food Security, and the Environment," Environment, vol. 49, no. 9 (November 2007), pp. 30–43, in FAO, The State of Food and Agriculture 2008 - Biofuels: Prospects, Risks y Opportunities (Rome: 2008), p. 16.



Fuente: Elaboración propia con datos de U.N. Food y Agriculture Organization (FAO)