



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Revisión Ambiental sobre la Demanda, Impacto y Suministro de
Metales Hacia el Siglo XXII**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR:

Mamani Huanca, Josehp Dushan (ORCID: 0000-0003-2506-1443)

ASESOR:

Mgtr. Grijalva Aroni, Percy Luis (ORCID: 0000-0002-2622-784X)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a: A mi abuelo ESTANISLAO padres WILFREDO Y BENANCIA quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Agradecimiento

A mis docentes y en especial a mi tutor por su ayuda, paciencia y dedicación. Agradecerle también a toda mi familia por darme ánimo durante este proceso. A mi esposa ROXANA mi hijo BASTHIAN, amigos de toda la vida que me acompañan desde siempre.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de Contenidos	iv
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Tipo y diseño de investigación	12
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística	14
3.3. Escenario de estudio	16
3.4. Participantes	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.6. Procedimientos	18
3.7. Rigor científico	20
3.8. Método de análisis de información	20
3.9. Aspectos éticos	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1. Posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física	22
4.2. Vínculos limitados entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios	24
4.3. Falta de enfoque en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos	26
V. CONCLUSIONES	29
VI. RECOMENDACIONES	30
REFERENCIAS	31

Índice de tablas

Tabla N° 1.	Enfoques de modelado implementados en los artículos revisados para estimar la demanda futura de metales importantes.	9
Tabla N° 2.	Matriz de categorización apriorística	14
Tabla N° 3.	Enfoques de modelado implementados en los artículos revisados para estimar la futura capacidad de suministro de metales importantes	22

Índice de figuras

Figura N° 1. Número de publicaciones sobre las perspectivas a largo plazo de la principal demanda y oferta de metales y las implicaciones ambientales asociadas.	16
Figura N° 2. Resumen de las perspectivas de demanda de los principales metales hasta 2030, 2050 y 2100 a escala mundial. N indica el número de puntos de datos; se incluye un total de 197 puntos de datos. Los círculos abiertos representan la mediana de los datos.	19
Figura N° 3. Número de publicaciones que cubren cada implicación ambiental asociada con la extracción y el procesamiento de metales.	24
Figura N° 4. Número de publicaciones que cubren cada estrategia de eficiencia de materiales en diferentes fases del ciclo de vida. Aquí se consideran siete estrategias, que incluyen reducción de peso, sustitución, mejoras en el rendimiento de fabricación, uso más intensivo, extensión de la vida útil, reutilización, refabricación y reciclaje	27

Resumen

Esta extensa revisión explora el estado proyectado a largo plazo de seis metales principales (hierro, aluminio, cobre, zinc, plomo y níquel) con alrededor de 200 puntos de datos para la demanda global hasta 2030, 2050 y 2100. Los hallazgos mostraron que es probable que la demanda global de estos metales aumente continuamente durante el siglo XXI, aumentando aproximadamente de 2 a 6 veces según el metal. Aunque la extracción y el procesamiento necesarios para satisfacer este aumento de la demanda deben ser ambientalmente sostenibles, los escenarios de extracción y procesamiento existentes tienen pocos vínculos explícitos con la capacidad de carga de la Tierra. Además, se descubrió que las opciones de estrategia están muy sesgadas hacia los análisis de la fase del final de la vida útil, específicamente el del reciclaje del final de la vida útil. En consecuencia, se está pasando por alto una amplia gama de oportunidades a lo largo de ciclos de vida completos, incluidos los avances en el diseño de productos, la fabricación y las fases de uso. Es importante destacar que, a pesar de la aparición de numerosos escenarios, pocos proporcionan objetivos basados en la ciencia para los principales flujos de metales, existencias, circularidad y eficiencia. Estas brechas de conocimiento deben abordarse con urgencia para garantizar que la investigación futura apoye directamente la toma de decisiones y políticas basadas en la ciencia.

Palabras clave: Análisis de flujo de materiales, Economía circular, Escenario, Impacto medioambiental, Metales

Abstract

This extensive review explores the long-term projected status of six major metals (iron, aluminum, copper, zinc, lead, and nickel) with about 200 data points for global demand through 2030, 2050 and 2100. The findings showed that global demand for these metals is likely to increase continuously during the 21st century, increasing approximately 2 to 6 times according to the metal. Although the extraction and processing needed to meet this increased demand must be environmentally sustainable, the existing mining and processing scenarios have few explicit links to the Earth's carrying capacity. In addition, it was found that strategy options are highly biased towards end-of-life phase analyses, specifically end-of-life recycling. As a result, a wide range of opportunities are being overlooked over full life cycles, including advances in product design, manufacturing and use phases. It is important to note that, despite the emergence of numerous scenarios, few provide science-based targets for major metal flows, stocks, circularity, and efficiency. These knowledge gaps need to be addressed urgently to ensure that future research directly supports science-based policy and decision-making.

Keywords: Material flow analysis, Circular economy, Scenario, Metals, Environmental impact

I. INTRODUCCIÓN

La oferta sostenible de metales requiere una estrategia bien coordinada y un conjunto de políticas basadas en un conocimiento científico sólido de la demanda y la oferta a largo plazo y de los impactos ambientales asociados. Sin embargo, esta información estaba muy fragmentada en varios estudios de casos.

Las funciones de la sociedad moderna dependen principalmente de los metales en forma de vehículos, edificios, maquinaria e infraestructura (Gerst y Graedel 2008). En particular, la humanidad utiliza los "metales de base" históricos para proporcionar a la sociedad los bienes y servicios necesarios para satisfacer las necesidades básicas de la humanidad. Sin embargo, la minería y el reciclaje de estos metales exacerba problemas ambientales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y los efectos de las partículas en la salud (Hertwich et al. 2020). Esta situación plantea el serio enigma de cómo se puede satisfacer la demanda de bienes y servicios metálicos por parte de una población mundial en aumento sin exceder la capacidad de carga de la Tierra (Jaramillo y Destouni 2015).

Si bien abordar este desafío requiere que se brinde una guía clara a los gobiernos y las empresas basada en una comprensión científica sólida de cómo las intervenciones políticas y las actividades comerciales transformarán el uso de metales a largo plazo, el conocimiento científico en este dominio actualmente está muy fragmentado entre varios estudios de casos. Esta fragmentación hace difícil que los gobiernos y las empresas apliquen directamente los resultados de esos estudios y desarrollen futuros proyectos de investigación que tengan en cuenta los progresos y las limitaciones en esa esfera.

En consecuencia, lo que se requiere es una descripción general y una evaluación integrales de las perspectivas a largo plazo de la demanda y el suministro de metales principales y las implicaciones ambientales asociadas

junto con el papel de las estrategias, como el concepto 3R, la economía circular, y la eficiencia material (Stahel 2016). Esta información también está disponible para metales clave asociados con las nuevas tecnologías (Watari, Nansai y Nakajima 2020), pero no para metales básicos como el hierro y el aluminio. En la actual revisión crítica de los principales metales, Chen y Graedel (2012) resumieron el estado actual del conocimiento sobre los ciclos de metales antropogénicos, y Müller et al. (2014) Proporcionaron una visión general del marco analítico. Sin embargo, ninguno de estos estudios se centró en las proyecciones a largo plazo de los principales metales, que son importantes para la formulación de políticas y estrategias.

En consecuencia, este estudio tiene como objetivo llenar este vacío de conocimiento mediante la revisión de la información existente sobre las perspectivas a largo plazo y el análisis de escenarios para la futura demanda, suministro e impactos ambientales de los principales metales. Los hallazgos deben proporcionar una mejor comprensión de la situación actual y destacar las perspectivas previamente descuidadas en la investigación en curso. Entre los metales y sus aplicaciones únicas, el foco está en el hierro, aluminio, cobre, zinc, plomo y níquel, que son los metales más utilizados y más comunes (Elshkaki et al. 2018). En particular, estos metales representan más del 98% de la calidad de todos los metales y productos metálicos utilizados en el mundo (U.S. Geological Survey 2020).

Sobre la base de realidad problemática presentada se planteó el problema general y los problemas específicos de la investigación. El problema general de la investigación fue ¿Cuáles son los principales impactos ambientales, demanda y suministro de metales hasta 2100? Los problemas específicos de la investigación fueron los siguientes:

- **PE1:** ¿Cuáles son las posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales?
- **PE2:** ¿Qué limitaciones se aprecian en los vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios?

- **PE3:** ¿Cómo son necesarios enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos?

El objetivo general fue Revisar los principales impactos ambientales, demanda y suministro de metales hasta 2100. Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- **OE1:** Explorar las posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales.
- **OE2:** Identificar las limitaciones en los vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios.
- **OE3:** Analizar la necesidad de enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos.

II. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los antecedentes más relevantes en respuesta a revisar la literatura sobre los principales impactos ambientales, demanda y suministro de metales hasta 2100; y cómo esto podría vincularse a un marco para la generación de estrategias de seguimiento.

Ciacci et al. (2020) en su trabajo, combinan el análisis de flujo de materiales, el análisis de regresión y la evaluación del ciclo de vida para explorar la posible evolución de cuatro escenarios de demanda de cobre en Europa hasta el año 2050 y los potenciales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en condiciones de circularidad material. Los resultados muestran que, para tres de los cuatro escenarios, la producción secundaria no cumpliría con el objetivo de reducción de emisiones de dióxido de carbono del 50% por debajo de los niveles de 2000 ni en el caso de una combinación de reciclaje agresivo, descarbonización moderada de la electricidad y mejoras en la eficiencia energética. En este caso, los flujos secundarios de cobre se acercarán gradualmente a la demanda esperada, sentando las bases para una economía cíclica con alto potencial para conservar el capital natural y mitigar el cambio climático. Sin embargo, como hemos discutido, este posible futuro requiere cambios significativos en los patrones actuales de producción y consumo de materiales.

Hertwich et al. (2020) de la mano del Programa Ambiental de las Naciones Unidas, revelaron que el mundo debe comenzar de inmediato a reducir más y más rápidamente las emisiones de gases de efecto invernadero para mantener el aumento de la temperatura mundial en 1,5°C. Sus investigaciones muestran que la extracción y el procesamiento de los recursos naturales representan más del 90% de la pérdida de diversidad biológica mundial y la escasez de agua y aproximadamente la mitad de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. El nuevo informe *Resource Efficiency and Climate Change: Materials Efficiency Strategy for a Low Carbon Future*, encargado por el Grupo de los Siete, tiene como objetivo

reducir las nuevas oportunidades de tales impactos mejorando la eficiencia material de los hogares y los automóviles. De acuerdo con el modelo PRI, las emisiones del ciclo de materiales en los hogares del G7 y China pueden reducirse en al menos un 80% para 2050 a través de una serie de estrategias de eficiencia de materiales. Entre las estrategias más prometedoras figuran un uso doméstico más intensivo, menos materiales de construcción y una recuperación más eficiente de los materiales de construcción.

Watari, Nansai y Nakajima (2020) investigan el estado de las proyecciones a largo plazo de varios materiales clave que cubren 48 proyectos, 546 puntos de datos de necesidades globales, hasta 2030 y 2050. Los resultados muestran que todavía no hay demanda a largo plazo de ciertos metales. Los estudios también encontraron que los impactos sociales y ambientales del crecimiento de la demanda fueron ignorados en gran medida, lo que dio lugar a que los consumidores y productores prestaran menos atención a las diferencias espaciales en las cadenas de valor mundiales. Además, de economía circular que incluyen la reutilización y la refabricación de componentes apenas se han incorporado a los marcos de modelado presentados en estos estudios, mientras que el reciclaje al final de su vida útil se centra en gran medida. Además, se subestiman los vínculos elementales (p. ej., indio-zinc-acero), lo que conduce a una falta de comprensión de la disponibilidad futura y los ciclos sostenibles. Todas estas conclusiones apuntan a la necesidad de seguir investigando la condición a largo plazo de los metales principales, que está estrechamente vinculada con el desarrollo sostenible de las Naciones Unidas y la aplicación del Acuerdo de París.

Lèbre et al. (2019) en su documento, ofrecen una metodología que evalúa las complejidades inherentes a los proyectos extractivos. Incluye ocho categorías de riesgo ESG que superponen las ubicaciones de yacimientos de hierro, cobre y aluminio no desarrollados que serán críticos para el suministro futuro. Reservas y recursos globales encontrados en entornos ESG complejos (cuatro o más riesgos simultáneos medios y altos): el hierro

representó el 47%, el cobre el 63% y el aluminio el 88%. Este trabajo contribuye a la investigación mediante una mejor comprensión de las limitaciones a nivel de las fuentes y los riesgos de la oferta.

Van der Voet et al. (2019) desarrollaron un método para evaluar los impactos ambientales de los escenarios de metales. El método se basa en el ciclo de vida, pero permite mirar hacia el futuro y aumentar la escala. El método tiene como objetivo traducir escenarios de demanda de metales en escenarios de suministro específicos de tecnología, necesarios para hacer la traducción en impactos ambientales. Los escenarios de demanda para siete metales principales se toman de la literatura. Se tradujeron en escenarios de suministro específicos de tecnología, y se especifican series temporales futuras de impactos ambientales, incluidas las tasas de reciclaje, la transformación del sistema de energía, la mejora de la eficiencia y la disminución de la ley del mineral. Las proyecciones muestran que se espera que los impactos ambientales relacionados con la producción de metales aumenten abruptamente. En la mayoría de los casos, la exposición es causada por el hierro, y los cambios en los sistemas de producción y energía no afectan las emisiones. Para otros metales, la conversión de energía puede traer beneficios significativos. Hasta ahora, la opción más eficaz para todos los metales parece ser aumentar la proporción de la producción secundaria. Esto reducirá las emisiones, pero se espera que sea eficaz sólo en la segunda mitad del siglo XXI.

Kuipers et al. (2018) cuya investigación tuvo como objetivo estimar las implicaciones ambientales de los escenarios de demanda de cobre desde el presente hasta mediados de siglo mediante la aplicación de una metodología de análisis de sostenibilidad del ciclo de vida (LCSA). Los resultados indican que se espera que los impactos ambientales relacionados con el suministro mundial de cobre aumenten sustancialmente entre 2010 y 2050; por ejemplo, se estima que la huella de carbono aumentará entre un 100 % y un 200 %, según el escenario. El estudio analizó los principales factores que contribuyen al creciente impacto del escenario mundial del cobre en el medio

ambiente e identificó posibles áreas en las que deberían centrarse las políticas de mitigación.

Watari et al. (2018) cuya investigación consistió en: (1) Estimación del impacto de la expansión de la tecnología de energía con bajas emisiones de carbono en la demanda futura de metales basada en el Índice Internacional de Energía. escenarios de la Agencia (IEA); (2) estimación de los efectos potenciales del reciclaje de tecnología de energía baja en carbono en el equilibrio futuro de oferta y demanda; (3) identificación de metales críticos que requieren medidas prioritarias. Los resultados muestran que la introducción de la energía solar de próxima generación y los vehículos pueden verse obstaculizados por el agotamiento de los recursos. Para los metales estudiados, se encontró que los metales clave requerían mediciones específicas, incluyendo metales, plata, litio, níquel y platino. Dado que el reciclaje puede reducir la demanda primaria entre un 20 % y un 70 % de tecnología energética con bajas emisiones de carbono, se deben considerar contramedidas, incluido el reciclaje.

Valero (2018), cuyo análisis ofrece un nuevo método para identificar posibles cuellos de botella en la demanda futura y la oferta geológica. Dado el impacto en 31 materias primas, este enfoque se adoptó entre 2016 y 2050 como parte del desarrollo global de los vehículos eólicos, solares fotovoltaicos, solares térmicos y eléctricos. Así, se han identificado 13 elementos de alto riesgo o alto riesgo, lo que significa que pueden crear cuellos de botella futuros: cadmio, cromo, cobalto, cobre, injertos, óxidos, litio, manganeso, níquel, plata, xenón, estaño y zinc. El telurio, que se demanda principalmente para fabricar células solares fotovoltaicas, presenta el mayor riesgo. Para superar estas limitaciones, las medidas consistentes en mejorar las tasas de reciclaje del 0,1 % al 4,6 % anual podrían evitar la escasez de materiales o las restricciones en las tecnologías verdes. Por ejemplo, la tasa de reciclaje de litio debería aumentar del 1% al 4,8% en 2050. Este estudio tiene como objetivo servir como guía para desarrollar estrategias de reciclaje y diseño ecológico.

Se procede a explicar las bases teóricas y conceptos asociados a las posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales, las limitaciones en los vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios, y la necesidad de enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos.

Claramente, las demandas de metal proyectadas están sujetas a grandes incertidumbres debido a una variedad de factores, incluidas las opciones de metodología, las variables socioeconómicas asumidas y el año utilizado para iniciar las proyecciones. Se ha descubierto que se utilizaron dos enfoques generales de modelado para estimar la demanda futura: enfoques basados en el flujo de entrada y basados en las existencias.

Los enfoques basados en el flujo de entrada intentan determinar directamente la demanda futura de metales o los flujos de entrada mediante el uso de variables socioeconómicas, como el PIB y la urbanización. Este método incluye modelos de regresión, modelos de tasa de crecimiento específica, modelos de consumo logístico, modelos de intensidad de uso, modelos de equilibrio general computable, modelos de consumo constante y modelos de consumo lineal (consulte la Tabla 1 para ver la correspondencia entre los estudios existentes y cada modelo).

Todos estos métodos intentan explicar directamente las futuras entradas de metales en función de parámetros socioeconómicos. Por otro lado, el enfoque basado en acciones se basa en el concepto de que las futuras entradas de metales están impulsadas por la dinámica de las acciones. Por lo tanto, este enfoque primero estima el crecimiento futuro de las existencias en función de la saturación de las existencias per cápita o la relación con las variables socioeconómicas, y luego explora las entradas futuras que se requerirían para crear ese crecimiento de las existencias.

De los 65 estudios que proyectaron la demanda futura, 43 (66 %) emplearon un enfoque basado en la afluencia, 17 (26 %) emplearon un enfoque basado

en las existencias y los cinco restantes (8 %) utilizaron ambos enfoques. Aunque es difícil verificar el efecto de diferentes variantes de modelo en los resultados y su efectividad, Shipper et al. (2018) tuvieron en cuenta que cada práctica tiene sus ventajas y desventajas. Es decir, los pronósticos a largo plazo, como los realizados en estudios que estimaron la demanda futura para el año 2100 utilizando el enfoque basado en el flujo de entrada, pueden conducir a una sobreestimación de la demanda futura debido a la falta de explicaciones mecanicistas del ciclo del metal y la prestación del servicio.

Por el contrario, el enfoque basado en acciones puede capturar dichos mecanismos, pero tiende a utilizar muchos datos, lo que dificulta la realización del análisis con facilidad. Por ejemplo, la demanda de acero en 2100 estimada por el enfoque basado en existencias está en el rango de 2200–2500 Mt (Xylia et al. 2018), mientras que el valor mediano estimado por el enfoque basado en el flujo de entrada es de aproximadamente 4200 Mt (Van der Voet et al. 2019). Estos hallazgos destacan la importancia de elegir métodos basados en el alcance y los recursos, así como la necesidad de comprender mejor cada enfoque.

Tabla Nº 1. Enfoques de modelado implementados en los artículos revisados para estimar la demanda futura de metales importantes.

Enfoque de modelado	Referencias
Modelo de regresión	(Ciacci et al., 2020; Dhar et al., 2020; Dong et al., 2019; Edelenbosch et al., 2017; et al., 2020, 2018, 2017; A., Elshkaki; Kuipers et al., 2018; Schipper et al., 2018; Van der Voet et al., 2019; Xuan and Yue, 2016)
Modelo de tasa de crecimiento específico	(de Koning et al., 2018; Graus et al., 2011; Hoogwijk et al., 2010; Karali et al., 2016; et al., 2015, 2014; Legarth, 1996; and; Kermeli et al., 2015; Northey et al., 2014; Wang et al., 2014; Yellishetty et al., 2010)

Enfoque de modelado	Referencias
Modelo de consumo logístico	(Akashi et al., 2014; Allwood et al., 2010; Gauffin et al., 2017; Giurco and Petrie, 2007; Oda et al., 2013; Zeng et al., 2018)
Modelo de intensidad de uso	(Halada et al., 2008; Hidalgo et al., 2005; Kapur, 2006, 2005; Tokimatsu et al., 2017; Vuuren et al., 1999; Watari et al., 2018; Zhou et al., 2013)
Modelo de equilibrio general computable	(Gielen y Moriguchi, 2002; Hatfield-Dodds et al., 2017; Schandl et al., 2020)
Modelo de consumo constante	(Valero et al., 2018; Yokoi et al., 2018)
Modelo de consumo lineal	(Legarth, 1996; Zeltner et al., 1999)
Modelo de saturación de existencias	(Daigo et al., 2014; Hatayama et al., 2012; Liu et al., 2013; Milford et al., 2013; Morfeldt et al., 2015; Xylia et al., 2018; Yokoi et al., 2018; Yoshimura and Matsuno, 2018; Yu et al., 2020)
Modelos de existencias individuales para tecnologías que contienen metales	(Chen et al., 2014; de Koning et al., 2018; Dong et al., 2019; Gerst, 2009; Schipper et al., 2018; Valero et al., 2018; Watari et al., 2018)

Schipper et al. (2018) consideraron que los factores que afectan las estimaciones altas se deben a la combinación de análisis de regresión, que son altamente sensibles al crecimiento del PIB, y *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) 5, que asumen tasas de crecimiento del PIB extremadamente altas en comparación con otros SSP (Riahi et al. 2017). De hecho, incluso utilizando el mismo modelo de regresión, los cinco escenarios de PFC, con diferentes tasas de crecimiento demográfico y PIB, proporcionan un rango de aproximadamente 45-120 toneladas de cobre en la estimación de 2050.

Por otro lado, Yoshimura y Matsuno (2018) señalaron que solo consideraron 19 países, que representan alrededor del 86 % del consumo total de cobre, debido a datos limitados, y que esto puede haber explicado por qué sus estimaciones fueron menores que las de otros países. estudios. En otro ejemplo dirigido al aluminio, Liu et al. (2013) demostraron la importancia de los valores de saturación de existencias asumidos y el año de saturación en la demanda futura al aplicar el modelo de saturación de existencias.

Según su análisis, para escenarios que asumieron diferentes valores de saturación de existencias (200, 400, 600 kg/cap) y años de saturación (2050, 2075, 2100), la demanda estimada varió en el rango de aproximadamente 130–400 Mt para 2050 y aproximadamente 160–480 Mt para 2100. Así pues, la amplia gama de necesidades estimadas que se muestra en el gráfico 2 se debe a los complejos efectos de diferentes hipótesis relacionadas con variables como la población, el PIB y la saturación de existencias, y la sensibilidad de cada método a estas variables.

Es importante señalar que al analizar escenarios no es importante preguntar si estos escenarios son correctos, sino verificar que estos escenarios describan una manera razonable en la que la evolución social/material global puede tener lugar (Elshkaki et al. 2018). Por consiguiente, el alcance de las evaluaciones de este estudio debe interpretarse como una posible incertidumbre y no como una precisión.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Una revisión sistemática implica un resumen crítico y reproducible de los resultados de las publicaciones disponible sobre un mismo tema o pregunta clínica concreta (Linares-Espinós et al. 2018). El carácter sistemático de la investigación da por certero que se basó en una disciplina, y que el análisis se basó en estrictos procedimientos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.34).

Un estudio de enfoque cualitativo es representado por el análisis sistemático de fenómenos, contrario a lo que comúnmente sucede, no se inicia con una teoría marcada para confirmar si esta es apoyada por los datos y resultados, sino que el proceso empieza examinando los hechos en sí y revisando los estudios previos, ambas acciones de manera simultánea, a fin de generar una teoría que sea consistente con lo que está observando que ocurre (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.46).

La presente investigación se propuso revisar los principales impactos ambientales, demanda y suministro de metales hasta 2100; y cómo esto podría vincularse a un marco para la generación de estrategias de seguimiento; en este caso, en un tiempo único, referido a cómo se encuentran desarrollados esos conceptos en la actualidad, tratándose de una investigación Transversal descriptiva (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.217).

Que el diseño cualitativo sea sistemático implica que hay una disciplina para realizar la investigación científica y que no se dejan los hechos a la casualidad. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p.34)

Esta investigación cumple con el propósito fundamental de producir conocimiento y teorías, investigación básica (Hernández Sampieri &

Mendoza Torres, 2018, p. 29), puesto que responde al propósito de responder sobre las posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales, las limitaciones en los vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios, y la necesidad de enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos.

3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

Tabla Nº 2. Matriz de categorización apriorística

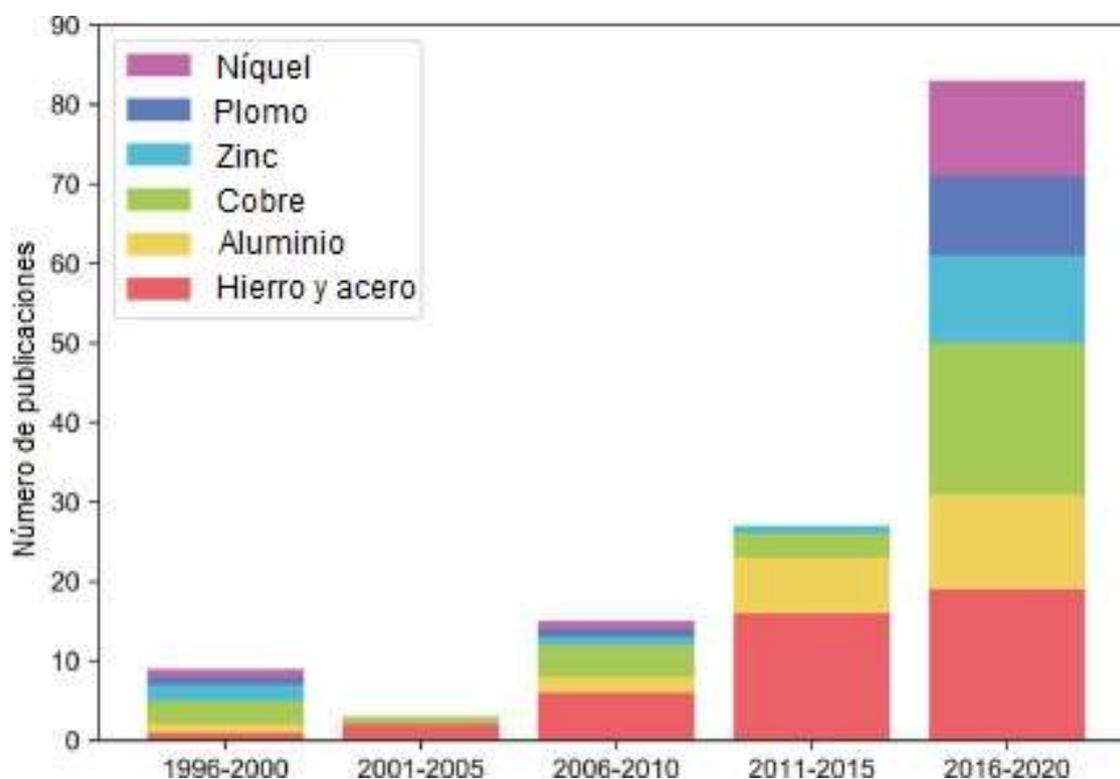
OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA
Revisar los principales impactos ambientales, demanda y suministro de metales hasta 2100	Explorar las posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales.	Restricciones de suministro debido a la disponibilidad física de los metales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelo de curva de Hubbert ▪ Modelo de programación ▪ Modelo de dinámica de sistemas ▪ Modelo de programación lineal. ▪ Modelo depredador-presa
	Identificar las limitaciones en los vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios.	Vínculos entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requerimientos energéticos. ▪ GEI. ▪ Ecotoxicidad acuática. ▪ Uso de la tierra. ▪ Agotamiento de recursos abióticos. ▪ Uso del agua. ▪ Ecotoxicidad terrestre. ▪ Acidificación ▪ Toxicidad humana ▪ Agotamiento de ozono. ▪ Radiación ionizante.

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oxidación fotoquímica. ▪ Potencial de eutrofización.
	<p>Analizar la necesidad de enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos.</p>	<p>Enfoques en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia de combustible y manejo. ▪ Mejoras en el rendimiento de fabricación. ▪ Extensión del tiempo de vida. ▪ Reutilización y refabricación. ▪ Reciclaje.

3.3. Escenario de estudio

En el gráfico 1 se observa un marcado aumento del número de publicaciones sobre hipótesis a largo plazo para los metales principales, especialmente en los últimos cinco años. El mayor número de publicaciones se dedicó al acero, seguido del cobre, el aluminio, el zinc, el níquel y el plomo. De los 70 estudios seleccionados, el 73% examinó escenarios futuros a nivel mundial; el 27% restante se centró en los niveles nacional y regional, incluidos China (19%) y los Estados Unidos. EE. UU. (3%). Los plazos varían de 2030 a 2400, el 51% de los estudios seleccionados proporcionan análisis hasta 2050 y el 24% hasta 2100.

Figura N° 1. Número de publicaciones sobre las perspectivas a largo plazo de la principal demanda y oferta de metales y las implicaciones ambientales asociadas.



3.4. Participantes

Los artículos generales sobre el análisis de escenarios a largo plazo para la demanda y el suministro de metales principales y los impactos ambientales asociados se recopilaron utilizando dos bases de datos: *Web of Science* y *Scopus*. En primer lugar, utilizando la palabra clave "metal", "materiales", "minerales", "necesidades", "suministro", "medio ambiente", "análisis del flujo de materiales", "escenarios", "presencia dinámica", "a largo plazo" y "perspectivas", se recuperan artículos publicados entre 1995 y mayo de 2020. Estas palabras clave se eligen subjetivamente para buscar artículos que correspondan al alcance de este estudio.

En el informe también se describe en qué medida los distintos artículos abarcan los efectos ambientales relacionados con la producción de metales y las estrategias que contribuyen a la sostenibilidad de los principales ciclos de los metales. El marco detallado se describe a continuación.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La extracción y el procesamiento de los principales metales están sobrecargando los sistemas terrestres críticos, como los procesos climáticos y los ecosistemas (Watari, Nansai y Nakajima 2020). Al considerar la demanda sostenible, la oferta y las estrategias para los metales, es importante examinar cómo una visión a largo plazo de los metales básicos afectará al medio ambiente mundial.

Por consiguiente, se examinó en qué medida cada estudio de metales abarca cada tipo de impacto ambiental. Hemos identificado varios tipos de indicadores para la evaluación del impacto ambiental, como los indicadores de estrés (por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero) y los indicadores de estado (p.ej. las concentraciones de dióxido de carbono). Además, la mayoría de las evaluaciones del ciclo de vida emplean diferentes

métodos de representación, como puntos medios y puntos finales, según el grado de integración de los indicadores de presión (Guinee 2003).

En este caso, la línea de base utilizada en cada estudio debe utilizarse para refinar la información contenida en los estudios, ya que estos indicadores son difíciles de sistematizar en un solo sistema. Dado que el propósito de este estudio es examinar la cobertura de los impactos ambientales relacionados con la oferta y la demanda futuras de metales, solo se consideran en los estudios existentes aquellos estudios que analicen desarrollos futuros.

3.6. Procedimientos

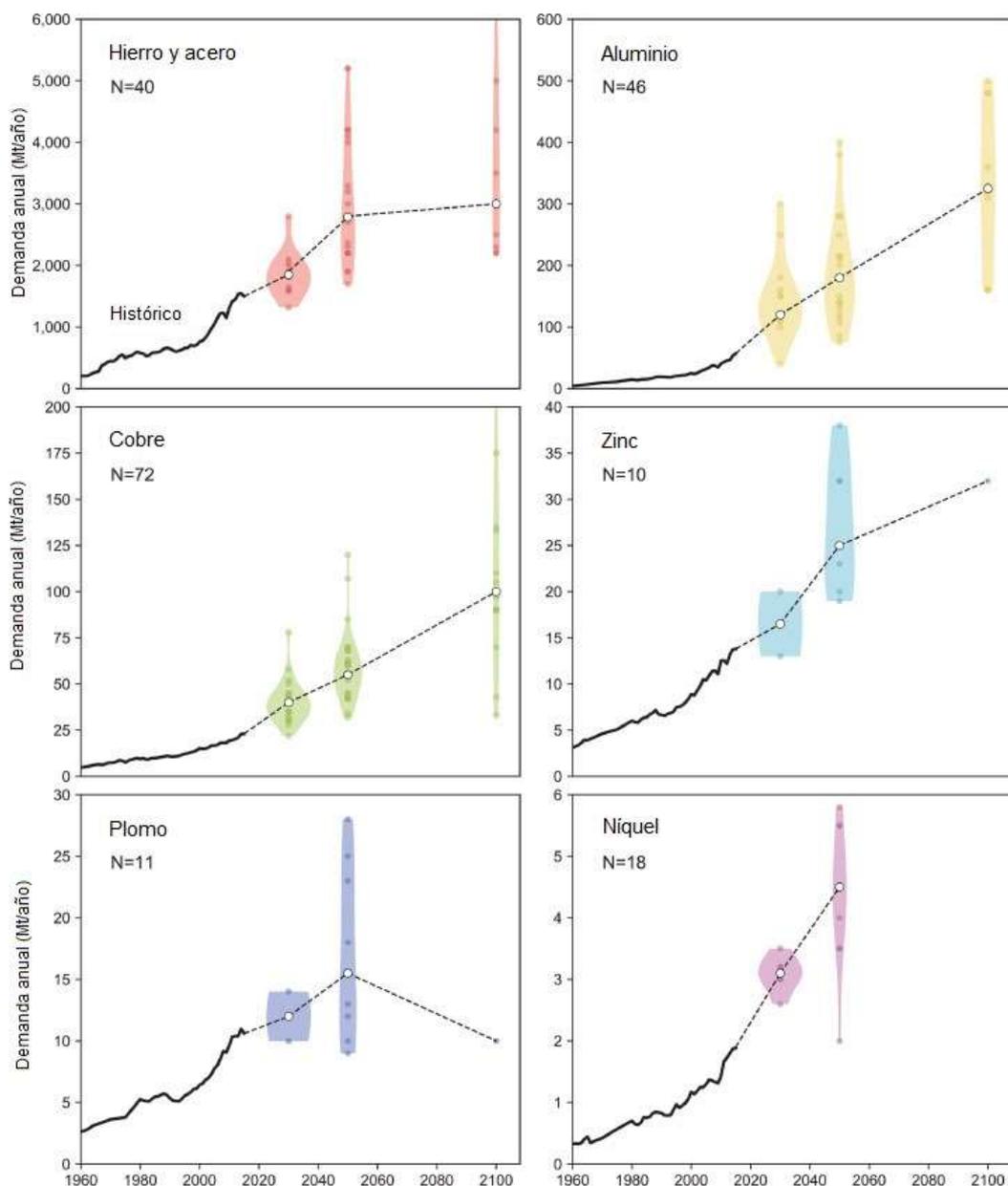
Los artículos recuperados se examinaron utilizando los siguientes criterios: (1) el estudio proporciona un análisis del estado futuro (después de 2025), no solo las tendencias históricas, (2) el estudio cubre un sector integral que impulsa los flujos y existencias de metales futuros en lugar de productos limitados específicos, (3) el estudio es un artículo de revista revisado por pares escrito en inglés.

Se obtuvieron 197 datos de estos estudios, que indican la mayor demanda mundial futura de metales en 2030, 2050 y 2100 (figura 2). La principal conclusión a este respecto es que la demanda de todos los metales comunes, excepto el plomo, puede aumentar en el siglo XXI. Según los datos medios, el aluminio (215%), el cobre (140%), el níquel (140%), el hierro (86%), el zinc (81%) y el plomo (46%) tuvieron las tasas de crecimiento más altas en 2050 en comparación con 2010.

También puede confirmarse que se espera que la demanda de todos los metales comunes, excepto el plomo, siga creciendo a finales de siglo, con las tasas de crecimiento más altas de aluminio (470%), cobre (330%), zinc (130%) y hierro (100%). En este caso, la demanda de níquel en 2100 no puede deducirse de los estudios existentes.

Estos resultados implican que es probable que la demanda de los principales metales aumente entre 2 y 6 veces durante el siglo XXI, según el tipo de metal. Además, los resultados a largo plazo para estos metales no están claros dados los limitados datos para 2100, especialmente para el zinc, el plomo y el níquel.

Figura Nº 2. Resumen de las perspectivas de demanda de los principales metales hasta 2030, 2050 y 2100 a escala mundial. N indica el número de puntos de datos; se incluye un total de 197 puntos de datos. Los círculos abiertos representan la mediana de los datos.



3.7. Rigor científico

Las estrategias para promover ciclos de metales sostenibles están ganando interés rápidamente, al igual que terminologías como la eficiencia de los materiales, la economía circular y las 3R. Todos estos enfoques tienen matices ligeramente diferentes, pero sus principios fundamentales tienen una gran superposición (Oberle et al. 2020). Por lo tanto, se establecieron las siguientes estrategias transversales que abarcan todo el ciclo de vida con base en la literatura (Oberle et al. 2020), y exploramos hasta qué punto cada uno de estos estaba cubierto en los estudios existentes:

- Fase de diseño del producto: Aligeramiento y sustitución
- Fase de fabricación: mejoras en el rendimiento de fabricación
- Fase de uso: uso más intensivo y prolongación de la vida útil
- Fase de fin de vida: reutilización, refabricación y reciclaje.

3.8. Método de análisis de información

Aquí se presentan casos en los que dos de estas estrategias se superponen, como la sustitución del acero ordinario por acero de alta resistencia, lo que conduce a un peso ligero. En este caso, se evalúan ambas estrategias. Se precisa tener en cuenta que solo consideramos estas opciones como estrategias cuando se manejaron explícitamente como medidas en el modelo, no como elementos involucrados en ningún análisis de sensibilidad.

Para explorar más a fondo la causa raíz de las demandas estimadas muy diferentes, se examinó el impacto de los diferentes supuestos en la demanda estimada. En el caso del cobre, según el análisis de regresión de Schipper et al. la demanda máxima se estima en unas 120 toneladas en 2050 (2018), utilizando el modelo de saturación de Murayoshi y Matsuno (2018), el mínimo se estima en unas 32 toneladas.

3.9. Aspectos éticos

Para los artículos seleccionados, se recopiló información básica, incluidos los metales objetivo, los límites geográficos y la escala temporal. Los métodos de modelización utilizados en cada estudio también se organizaron sobre la base del artículo anterior sobre la revisión de los métodos utilizados en el análisis de flujos dinámicos de materiales (Müller et al. 2014). Al mismo tiempo, se compiló un conjunto de datos que contiene datos de oferta y demanda global pronosticados recopilados de varios artículos relevantes para proporcionar una imagen completa de cómo los científicos esperan que la demanda y la oferta de metales cambien a largo plazo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Posibles restricciones de suministro debido a la disponibilidad física

Los futuros suministros de metal pueden limitarse a factores materiales, económicos, sociales o ambientales (Lèbre et al. 2019). En 27 de los 70 estudios (39%), este problema se resolvió abordando directamente la oferta física. Además, de 27 estudios, el 63% evaluó la oferta física únicamente comparando la demanda proyectada con las reservas (minerales actualmente explotados económicamente) o los recursos (todos los minerales de la Tierra, sean o no utilizables).

El 37% restante de estos 27 estudios proyectó la capacidad de producción anual utilizando el modelo de curva de Hubbert (Calvo, Valero y Valero 2017), modelos de programación y modelos de programación lineal para explorar si la capacidad de producción podría expandirse de acuerdo con el aumento de la demanda (consulte la Tabla 3 para ver la correspondencia entre los estudios existentes y cada modelo).

Tabla Nº 3. Enfoques de modelado implementados en los artículos revisados para estimar la futura capacidad de suministro de metales importantes

Enfoque de modelado	Referencias
Modelo de curva de Hubbert	(Calvo et al., 2017; Sverdrup et al., 2017; Valero et al., 2018)
Modelo de programación	(Mohr et al., 2018; Northey et al., 2014)
Modelo de dinámica de sistemas	(Sverdrup et al., 2017; Vuuren et al., 1999)
Modelo de programación lineal	(Tokimatsu et al., 2017)
Modelo depredador-presa	(Ali et al., 2017)

El resumen de los resultados existentes reveló que la mayoría de los principales suministros de metales podrían verse limitados por la

disponibilidad física. Es decir, muchos estudios se ocupan del agotamiento de los minerales naturales. Los años de agotamiento (es decir, el año en que la producción primaria acumulada excede las reservas) estimados en los estudios existentes fueron alrededor de 2042–45 para el hierro, 2030–38 para el cobre, 2025 para el zinc, 2020–25 para el plomo y 2030–40 para el níquel (Watari et al. 2018).

No hay estudios que sugieran el agotamiento de la bauxita hasta al menos la mitad del siglo XXI. Además, utilizando datos mineros detallados y a escala global, varios estudios mostraron que la producción primaria a partir de minerales naturales podría alcanzar su punto máximo durante el siglo XXI. Específicamente, los años pico estimados (es decir, años en los que la producción primaria alcanza su punto máximo) son alrededor de 2041–91 para el hierro, 2084–2130 para el aluminio, 2030–72 para el cobre, 2025–61 para el zinc, 2018–2128 para el plomo y 2030– 33 para níquel (Valero et al. 2018). Los rangos de los valores estimados dependen principalmente de los supuestos de recursos finalmente recuperables.

En este contexto, una nueva fuente potencial para complementar la disponibilidad física del mineral natural es la producción secundaria a partir del reciclaje. Sin embargo, Elshkaki et al. (2018) informaron que el suministro de materiales atribuidos al reciclaje probablemente será una fracción de lo que se requiere para satisfacer la demanda, incluso a mediados de este siglo, debido a las pérdidas por disipación, la vida útil prolongada de los productos y el aumento de la demanda.

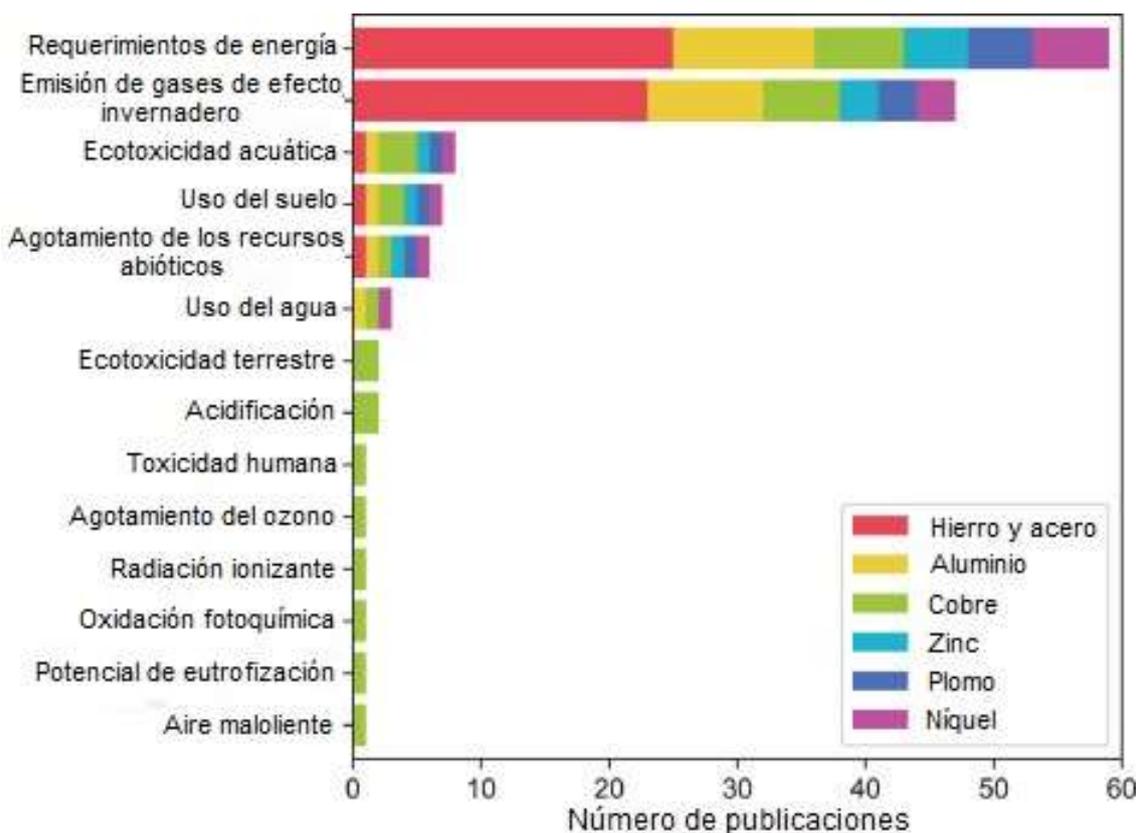
Además, Schipper et al. (2018) informaron que, incluso en una situación ideal en la que se alcanzan tasas de reciclaje de hasta el 90 %, la demanda proyectada aún podría resultar en el agotamiento de los recursos de cobre actualmente identificados antes de finales del siglo XXI. Estas perspectivas, junto con nuestros hallazgos, sugieren que las demandas cada vez mayores identificadas anteriormente pueden no ser satisfechas por la disponibilidad

física de recursos o la tasa a la que se puede expandir la capacidad de producción en el siglo XXI.

4.2. Vínculos limitados entre la perspectiva del uso de metales y los límites planetarios

La Figura N° 3 muestra el número de veces que cada tipo de implicación ambiental asociada con la producción de metales ha sido examinada en estudios existentes. La mayor preocupación radica claramente en las áreas de los requisitos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De los 70 estudios, 31 (44 %) y 29 (41 %) consideraron explícitamente los requisitos energéticos y los GEI en sus escenarios, lo que sugiere una fuerte preocupación por los impactos del cambio climático inducidos por la producción de los principales metales.

Figura N° 3. Número de publicaciones que cubren cada implicación ambiental asociada con la extracción y el procesamiento de metales.



Un examen más detenido de los 29 estudios sobre emisiones de GEI reveló que el 45 % no tenía restricciones de emisión específicas, mientras que el 55 % restante estableció restricciones en línea con los objetivos climáticos de 1,5 a 2 °C. En este caso, la mayoría de los estudios se centraron en el papel de las soluciones del lado de la oferta, principalmente tecnologías de producción innovadoras como la captura y almacenamiento de carbono y la producción basada en hidrógeno (Morfeldt, Nijs y Silveira 2015).

Mientras tanto, Liu et al. (2013) y Milford et al. (2013) destacaron la importancia de las soluciones del lado de la demanda, incluidas las estrategias de eficiencia material, dada la gran incertidumbre asociada con la innovación tecnológica y las barreras sociales (Von Stechow et al. 2016). Más específicamente, Liu et al. (2013) y Milford et al. (2013) proponen que el stock global per cápita de aluminio y acero debe estabilizarse a un nivel muy por debajo del de las naciones ricas actuales a través de medidas como un diseño liviano y un uso más intensivo.

Esto significa que evitar los impactos catastróficos del cambio climático requerirá que las naciones permanezcan dentro de un espacio operativo seguro para el uso global de metales. Sin embargo, dicha información no se ha presentado en ninguno de los estudios revisados, lo que indica que este es un campo muy inmaduro.

Otro hallazgo importante aquí es la existencia de un vínculo limitado entre el escenario principal de metales y la extensión total de los límites planetarios (Jaramillo y Destouni 2015). La Figura 3 muestra claramente que los impactos ambientales de la producción de metales a largo plazo, además del cambio climático, son poco conocidos. Más importante aún, ningún escenario a largo plazo del uso de metales ha considerado las limitaciones ambientales de la extracción de metales dentro del contexto de la capacidad de carga de la Tierra, aunque la pérdida de biodiversidad, la contaminación química y el uso del agua han sido ampliamente reconocidos (Jaramillo y Destouni 2015). Tales descuidos probablemente aumentarán el riesgo de

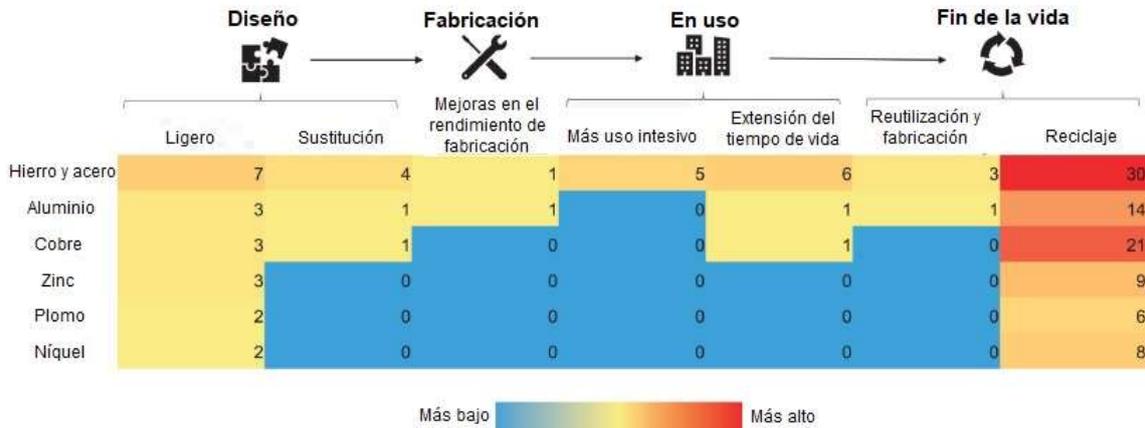
sobrepasar los límites planetarios críticos debido a aumentos descuidados en la actividad de producción. No hay razón para creer que no enfrentaremos restricciones ambientales hasta que hayamos agotado todas las reservas y recursos de metales extraíbles.

En consecuencia, examinar cómo promover un uso más juicioso de los principales metales dentro de los límites impuestos por la capacidad de carga de la Tierra es una tarea importante. Algunos avances clave en esta dirección se han hecho en algunos estudios. Por ejemplo, Van der Voet et al. (2019) y Kuipers et al. (2018) presentó un nuevo marco analítico para evaluar los impactos ambientales integrales asociados con los escenarios de oferta y demanda de metales al vincular la evaluación del ciclo de vida (LCA) con el análisis de flujo de materiales (MFA). Si bien ninguno de estos estudios de caso examina restricciones ambientales específicas, brindan un importante trampolín hacia un marco para estimar la cantidad de flujos y existencias de metales que se pueden extraer de manera sostenible de la Tierra.

4.3. Falta de enfoque en estrategias transversales a lo largo de ciclos de vida completos

Superar las limitaciones físicas, sociales y ambientales requiere una combinación de políticas y estrategias bien coordinadas. Sin embargo, figura 4 ilustra el fuerte sesgo que existe en la atención que se presta a la fase de fin de vida útil en las estrategias de eficiencia de los materiales. De las diversas estrategias que abarcan el ciclo de vida del metal, el reciclaje es la estrategia examinada con más frecuencia para todos los metales, con 52 de los 70 estudios (74 %) modelando su efecto. Por otro lado, pocos estudios han examinado otras estrategias; por ejemplo, solo el 13 % investigó la reducción de peso y el 10 % exploró la extensión de la vida útil. Es importante señalar que en los análisis de zinc, plomo y níquel nunca se han considerado cinco estrategias distintas del reciclaje y la reducción de peso.

Figura N° 4. Número de publicaciones que cubren cada estrategia de eficiencia de materiales en diferentes fases del ciclo de vida. Aquí se consideran siete estrategias, que incluyen reducción de peso, sustitución, mejoras en el rendimiento de fabricación, uso más intensivo, extensión de la vida útil, reutilización, refabricación y reciclaje.



Estas tendencias sugieren una falta de perspectivas de ciclo de vida en las consideraciones estratégicas. Es decir, la mayoría de los estudios existentes restringen las posibles estrategias al reciclaje únicamente en la etapa de diseño del análisis, y se presta poca atención a la evaluación de la gama completa de oportunidades que abarcan todo el ciclo de vida. Este descuido debilita sustancialmente las implicaciones políticas potenciales del análisis.

Dado que algunos estudios han demostrado que el potencial del reciclaje para satisfacer el aumento de la demanda y reducir el impacto ambiental es limitado (Ciacci et al. 2020), un análisis exhaustivo y se necesita una evaluación comparativa de una variedad de estrategias potenciales para apoyar verdaderamente el diseño de políticas ambientales.

Varios estudios de casos ya han demostrado la importancia de la perspectiva del ciclo de vida. Por ejemplo, Carruth et al. (2011) demostraron que el diseño ligero puede reducir la demanda de acero y aluminio hasta en un 25-30 % sin comprometer la funcionalidad. Chen et al. (2014) demostraron que la vida útil de los productos puede extenderse al fabricarlos y usarlos de

manera más eficiente, y que tales avances podrían reducir la demanda de acero de China en alrededor de un 20 % en 2050.

Además, Akashi et al. (2014) demostraron que la combinación de sustitución con acero de alta resistencia y un uso más intensivo de stock de acero podría reducir potencialmente la demanda mundial de acero en un 40 % en 2050. Además, Milford et al. (2013) demostraron que una gama completa de estrategias de eficiencia de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida podría reducir la demanda mundial de acero en aproximadamente un 50 % en 2050 en comparación con el caso de no tomar medidas.

Todos estos estudios de casos demuestran claramente la importancia de las perspectivas del ciclo de vida en el desarrollo de la estrategia. Dado que el desarrollo de escenarios futuros que carezcan de estas perspectivas podría eventualmente llevar a gobiernos y empresas a pasar por alto importantes ventanas de oportunidad, la modificación de los escenarios actuales es crucial.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la investigación fueron las siguientes:

1. El suministro estable y sostenible de los principales metales es esencial para garantizar una alta calidad de vida para la población mundial en expansión. Alcanzar este objetivo requerirá una estrategia bien coordinada y paquetes de políticas basados en perspectivas a largo plazo para la demanda, la oferta y las implicaciones ambientales asociadas.
2. La revisión crítica reveló un rápido aumento en la publicación de artículos científicos en este dominio. Sin embargo, se encontró que los estudios existentes tienen los siguientes desafíos importantes, aunque aparentemente no bien abordados: (I) hay muy poco conocimiento científico sobre los niveles de uso de metales que consideran la capacidad de carga de la Tierra, y (II) la perspectiva del ciclo de vida en el diseño de la estrategia falta en gran medida.
3. Se requiere un esquema de investigación alternativo que sea transformador y proporcione un camino hacia un ciclo del metal sostenible, no solo una comprensión de las situaciones históricas y actuales. Proponemos que dicho enfoque conste de los siguientes pasos: 1) analizar el estado histórico y actual, 2) desarrollar objetivos basados en la ciencia, 3) identificar posibles estrategias y 4) evaluar la implementación de políticas.
4. Un primer paso se refiere al estado histórico y actual de los ciclos de metales antropogénicos, los riesgos ambientales, las estructuras disipativas y los patrones de evolución de las existencias es relativamente bien entendido. Sin embargo, los próximos pasos constituyen una parte importante que falta en los enfoques anteriores; específicamente, se deben hacer intentos para establecer objetivos basados en la ciencia para el flujo de metales, el stock, la eficiencia y la circularidad.

VI. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para futuras investigaciones son las siguientes:

1. Estudios previos no han podido examinar las combinaciones de estrategias apropiadas teniendo en cuenta los límites del entorno. En consecuencia, no se recomienda utilizar los resultados de estos estudios para apoyar directamente la toma de decisiones por parte de gobiernos y empresas.
2. Dado que los objetivos juegan un papel fundamental en la dirección de las transiciones hacia un futuro deseable al proporcionar una dirección específica a varias partes interesadas, se requiere con urgencia establecer un marco analítico que considere objetivos basados en la ciencia para el uso de materiales. La base para tal enfoque podría obtenerse de estudios previos, como aquellos relacionados con la integración de MFA y LCA, y aquellos que incorporan rutinas de optimización en MFA.
3. Al identificar posibles estrategias después de este paso, es fundamental examinar la gama completa de oportunidades que existen a lo largo de todo el ciclo de vida, junto con factores como el costo, la utilidad y la aceptación social.
4. En última instancia, se establecerá una serie de estudios de diseño de políticas mediante la verificación estadística de los efectos de las políticas implementadas. Estos pasos eventualmente permitirán que los estudios prospectivos de MFA brinden un apoyo verdaderamente integral para el diseño de políticas ambientales y la innovación empresarial.

REFERENCIAS

- AKASHI, O., HANAOKA, T., MASUI, T. y KAINUMA, M., 2014. Halving global GHG emissions by 2050 without depending on nuclear and CCS. *Climatic Change* [en línea], vol. 123, no. 3-4, pp. 611-622. ISSN 01650009. DOI 10.1007/s10584-013-0942-x. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0942-x>.
- CALVO, G., VALERO, Alicia y VALERO, Antonio, 2017. Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 125, no. March, pp. 208-217. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.06.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.009>.
- CARRUTH, M.A., ALLWOOD, J.M. y MOYNIHAN, M.C., 2011. The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 57, pp. 48-60. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.09.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.018>.
- CHEN, W. y GRAEDEL, T.E., 2012. Anthropogenic Cycles of the Elements: A Critical Review. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 46, no. 16, pp. 8574–8586. DOI 10.1021/es3010333. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es3010333>.
- CHEN, W., YIN, X. y MA, D., 2014. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO2 emissions. *Applied Energy* [en línea], vol. 136, no. 2014, pp. 1174-1183. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.002>.
- CIACCI, L., FISHMAN, T., ELSHKAKI, A., GRAEDEL, T.E., VASSURA, I. y PASSARINI, F., 2020. Exploring future copper demand, recycling and associated greenhouse gas emissions in the EU-28. *Global Environmental Change* [en línea], vol. 63, no. February, pp. 102093. ISSN 09593780. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2020.102093. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102093>.

- ELSHKAKI, A., GRAEDEL, T.E., CIACCI, L. y RECK, B.K., 2018. Resource Demand Scenarios for the Major Metals. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 52, no. 5, pp. 2491–2497. DOI 10.1021/acs.est.7b05154. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05154>.
- GERST, M.D. y GRAEDEL, T.E., 2008. In-use stocks of metals: Status and implications. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 42, no. 19, pp. 7038-7045. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es800420p. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es800420p>.
- GUINEE, J., 2003. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. *Environmental Impact Assessment Review* [en línea], vol. 23, no. 1, pp. 129-130. ISSN 01959255. DOI 10.1007/BF02978897. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF02978897>.
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C., 2018. *Metodología De La Investigación - La ruta cuantitativa, cualitativa y mixta* [en línea]. 1°. México D.F.: Mc Graw Hill Education. ISBN 9781456260965. Disponible en: <https://bit.ly/3fA7hEp>.
- HERTWICH, E., LIFSET, R., PAULIUK, S. y HEEREN, N., 2020. *Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future Summary for Policymakers* [en línea]. S.I.: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. ISBN 9789280737714. Disponible en: <https://www.unenvironment.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>.
- JARAMILLO, F. y DESTOUNI, G., 2015. Comente sobre “Límites planetarios: Guiando el desarrollo humano en un planeta cambiante”. *Science* [en línea], vol. 348, no. 6240, pp. 1217- d. ISSN 10959203. DOI 10.1126/science.aaa9629. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>.
- KUIPERS, K.J.J., VAN OERS, L.F.C.M., VERBOON, M. y VAN DER VOET, E., 2018. Assessing environmental implications associated with global copper demand and supply scenarios from 2010 to 2050. *Global Environmental Change* [en línea], vol. 49, no. May 2017, pp. 106-115. ISSN 09593780. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2018.02.008. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.02.008>.

- LÈBRE, É., OWEN, J.R., CORDER, G.D., KEMP, D., STRINGER, M. y VALENTA, R.K., 2019. Source Risks As Constraints to Future Metal Supply. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 53, no. 18, pp. 10571-10579. ISSN 15205851. DOI 10.1021/acs.est.9b02808. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02808>.
- LINARES-ESPINÓS, E., HERNÁNDEZ, V., DOMÍNGUEZ-ESCRIG, J.L., FERNÁNDEZ-PELLO, S., HEVIA, V., MAYOR, J., PADILLA-FERNÁNDEZ, B. y RIBAL, M.J., 2018. Methodology of a systematic review. *Actas Urológicas Españolas* [en línea], vol. 42, no. 8, pp. 499-506. ISSN 02104806. DOI 10.1016/j.acuro.2018.01.010. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.acuroe.2018.07.002>.
- LIU, G., BANGS, C.E. y MÜLLER, D.B., 2013. Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. *Nature Climate Change* [en línea], vol. 3, no. 4, pp. 338-342. ISSN 1758678X. DOI 10.1038/nclimate1698. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1698>.
- MILFORD, R.L., PAULIUK, S., ALLWOOD, J.M. y MÜLLER, D.B., 2013. The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO2 targets. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 47, no. 7, pp. 3455-3462. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es3031424. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es3031424>.
- MORFELDT, J., NIJS, W. y SILVEIRA, S., 2015. The impact of climate targets on future steel production - An analysis based on a global energy system model. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 103, pp. 469-482. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.04.045. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.045>.
- MÜLLER, E., LORENZ, H., WIDMER, R., SCHLUEP, M. y FAULSTICH, M., 2014. Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods. *Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 48, no. 4, pp. 2102–2113. DOI 10.1021/es403506a. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es403506a>.

- OBERLE, B., TRAER A, S., HATFIELD-DODDS, S., HELLWEG, S., SCHANDL, H. y CLEMENTE, J., 2020. *Global Resources Outlook 2019* [en línea]. París: ORBi. ISBN 9789280737417. Disponible en: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/244276>.
- RIahi, K., VAN VUUREN, D.P., KRIEGLER, E., EDMONDS, J., O'NEILL, B.C., FUJIMORI, S., BAUER, N., CALVIN, K., DELLINK, R., FRICKO, O., LUTZ, W., POPP, A., CUARESMA, J.C., KC, S., LEIMBACH, M., JIANG, L., KRAM, T., RAO, S., EMMERLING, J., EBI, K., HASEGAWA, T., HAVLIK, P., HUMPENÖDER, F., DA SILVA, L.A., SMITH, S., STEHFEST, E., BOSETTI, V., EOM, J., GERNAAT, D., MASUI, T., ROGELJ, J., STREFLER, J., DROUET, L., KREY, V., LUDERER, G., HARMSSEN, M., TAKAHASHI, K., BAUMSTARK, L., DOELMAN, J.C., KAINUMA, M., KLIMONT, Z., MARANGONI, G., LOTZE-CAMPEN, H., OBERSTEINER, M., TABEAU, A. y TAVONI, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* [en línea], vol. 42, pp. 153-168. ISSN 09593780. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- SCHIPPER, B.W., LIN, H.C., MELONI, M.A., WANSLEEBEN, K., HEIJUNGS, R. y VAN DER VOET, E., 2018. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 132, no. January, pp. 28-36. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.01.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>.
- STAHEL, W.R., 2016. Circular economy - A new relationship with our goods and materials would save resources and energy and create local jobs. *Nature* [en línea], vol. 531, pp. 435-438. ISSN 00194565. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/531435a.pdf>.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020. *Commodity Statistics and Information* [en línea]. S.I.: Centro Nacional de Información de Minerales. ISBN 9781411343627. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.

- VALERO, Alicia, VALERO, Antonio, CALVO, G. y ORTEGO, A., 2018. Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 93, no. May, pp. 178-200. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2018.05.041. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>.
- VAN DER VOET, E., VAN OERS, L., VERBOON, M. y KUIPERS, K., 2019. Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals: Methodology and Application to the Case of Seven Major Metals. *Journal of Industrial Ecology* [en línea], vol. 23, no. 1, pp. 141-155. ISSN 15309290. DOI 10.1111/jiec.12722. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jiec.12722>.
- VON STECHOW, C., MINX, J.C., RIAHI, K., JEWELL, J., MCCOLLUM, D.L., CALLAGHAN, M.W., BERTRAM, C., LUDERER, G. y BAIOCCHI, G., 2016. 2°C and SDGs: United they stand, divided they fall? *Environmental Research Letters* [en línea], vol. 11, no. 3. ISSN 17489326. DOI 10.1088/1748-9326/11/3/034022. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/3/034022>.
- WATARI, T., MCLELLAN, B.C., OGATA, S. y TEZUKA, T., 2018. Analysis of potential for critical metal resource constraints in the international energy agency's long-term low-carbon energy scenarios. *Minerals* [en línea], vol. 8, no. 4. ISSN 2075163X. DOI 10.3390/min8040156. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min8040156>.
- WATARI, T., NANSAI, K. y NAKAJIMA, K., 2020. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 155, no. January, pp. 104669. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2019.104669. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>.
- XYLIA, M., SILVEIRA, S., DUERINCK, J. y MEINKE-HUBENY, F., 2018. Weighing regional scrap availability in global pathways for steel production processes. *Energy Efficiency* [en línea], vol. 11, no. 5, pp. 1135-1159. ISSN 15706478. DOI 10.1007/s12053-017-9583-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9583-7>.

YOSHIMURA, A. y MATSUNO, Y., 2018. Dynamic material flow analysis and forecast of copper in global-scale: Considering the difference of recovery potential between copper and copper alloy. *Materials Transactions* [en línea], vol. 59, no. 6, pp. 989-998. ISSN 13459678. DOI 10.2320/matertrans.M2017399. Disponible en: <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017399>.