



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL NIVEL DE QUÍMICA VERDE QUE POSEEN PROCESOS CLÁSICOS DE LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FABIAN NELSON NEIRA VIDAL

PROFESOR GUÍA:

GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

FERNANDO VALENZUELA LOZANO

PATRICIO DIP SEGOVIA

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas.
POR: Fabian Nelson Neira Vidal.
FECHA: 8 de diciembre del 2021.
PROFESOR GUÍA: Gonzalo Montes Atenas.

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL NIVEL DE QUÍMICA VERDE QUE POSEEN PROCESOS CLÁSICOS DE LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE

El objetivo de este reporte es determinar el rendimiento químico verde de procesos productivos de cobre catódico, en particular de las rutas convencionales de tratamiento de sulfuros y óxidos de cobre, realizando un *benchmarking* de los principales parámetros involucrados en cada proceso.

Para llevar a cabo la evaluación se emplea una metodología de análisis de ciclo de vida (LCA) donde se miden impactos ambientales en la producción de cobre mediante el *software* DOZN 2.0 principalmente junto con indicadores adicionales. El alcance considerado va desde las etapas posteriores a la extracción del mineral hasta la obtención del cátodo de cobre, se emplea el supuesto base de una tonelada de cobre fino en el producto. El inventario requerido se obtiene mediante un *benchmarking* de los principales parámetros necesarios para realizar el balance de masa por operación unitaria que permite obtener los materiales de entrada y salida empleados.

El *benchmarking* realizado se compone de 54 operaciones a través de los 5 procesos considerados en el procesamiento de sulfuros y 4 procesos en el procesamiento de óxidos, además de aportes de datos más actualizados provenientes de reportes. La ruta pirometalúrgica tiene un mejor rendimiento químico verde dado por un puntaje global de 4.3, menor al valor obtenido para la ruta alternativa que es de 32.5. Las operaciones de flotación y electro refinación son las que más influyen en la evaluación del procesamiento de sulfuros, abarcando el 54.8 y 38.7[%] del puntaje global, respectivamente. En la ruta hidrometalúrgica las operaciones que mayor impacto tienen en la evaluación son la electro obtención y la lixiviación, con una contribución de 47.9 y 42[%], respectivamente. Para los indicadores adicionales empleados se obtiene que el consumo de agua es mayor en la ruta pirometalúrgica con 70.6[m³] de agua comparado con 35.1[m³] requeridos en la ruta alternativa para producir una tonelada de cobre. El consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero son mayores también en el procesamiento de sulfuros con valores de 24.9[GJ/t Cu] comparado con 14.7[GJ/t Cu] para el consumo energético unitario y de 2.29[t CO₂eq] comparado con 1,57[t CO₂eq] para el potencial de calentamiento global.

La ruta pirometalúrgica presenta un mejor rendimiento químico verde basado en el *software* DOZN 2.0 pero presenta mayores consumos de agua, energía y emisiones de GEI. La ruta hidrometalúrgica presenta un mayor potencial de mejora del nivel de química verde en comparación a la ruta alternativa basado en el análisis de variación de los parámetros considerados.

Dedicatoria

Dedicado a Flavia Vidal Araya y Nelson Neira Sepúlveda, mis padres, que, con su apoyo incondicional guiaron mi camino y permitieron que este proceso fuera posible. Dedicado también, a mis hermanas y a mi hermano, que siempre estuvieron conmigo demostrándome su cariño en todo momento. Finalmente, dedicado a Teresa Sepúlveda, mi Laly, esto va con mucho amor para ti abuelita.

Agradecimientos

A MilliporeSigma, por la creación del *software* DOZN 2.0, una herramienta de gran utilidad para evaluar el nivel de química verde de productos, además de tener libre acceso para su uso, de forma que toda la comunidad científica puede explorar las aplicaciones del *software*.

A Pankaj Sharma, especialista en química verde perteneciente al grupo Merck, por su asistencia en el uso del *software* y disponibilidad para responder dudas a pesar de la diferencia horaria con India.

Al profesor Gonzalo Montes, por su consejo y sabiduría. Gracias por su amable disponibilidad para la organización de reuniones, por el apoyo y confianza en mis ideas, así como también la visión de futuro e innovación entregada.

A mis padres, por el amor que siempre me han dado, han sido el pilar de mi vida en todo momento. Gracias por confiar en mí y por ser esa voz incansable de aliento que me empujó a seguir siempre, valoro inmensamente todas sus enseñanzas.

A mi hermano y a mis hermanas, por apoyarme en mi etapa académica y por su encomiable amor, son grandes modelos a seguir para mí. Me alegra tener plena conciencia de lo unidos que somos.

A la “nación pupiana”, mundo de felicidad creado al comienzo de este viaje, que fue testigo de días de productividad en la base de la nación, siendo un gran apoyo en este proceso y con cuya integrante espero emprender muchos viajes más.

A mis amigos del colegio, por tantas agradables tertulias llevadas a cabo en tantos años de amistad.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos generales	2
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Alcances.....	3
1.4. Estructura del trabajo.....	3
2. Revisión Crítica de la Literatura	5
2.1. Sostenibilidad y desarrollo sustentable.....	5
2.2. Química Verde.....	6
2.2.1. Uso de Recursos.....	9
2.2.2. Eficiencia Energética	13
2.2.3. Riesgos humanos y ambientales.....	14
2.3. Otros indicadores de sostenibilidad en la industria minera.....	16
2.4. Operaciones unitarias en rutas de procesamiento del cobre.....	18
2.4.1. Ruta Pirometalúrgica	19
2.4.2. Ruta Hidrometalúrgica	23
2.5. Construcción de <i>benchmarking</i>	26
3. Metodología.....	28
3.1. Cálculos de <i>benchmarking</i>	28
3.2. Análisis de inventario	29
3.2.1. <i>Benchmarking</i> y balances de masa sulfuros.....	30
3.2.2. <i>Benchmarking</i> y balances de masa óxidos.....	33
3.3. Evaluación DOZN	35
4. Resultados.....	39
4.1. <i>Benchmarking</i> y balances de masa.....	39
4.1.1. <i>Benchmarking</i>	39
4.1.2. Balances de masa	53
4.2. Evaluación Química Verde.....	55

4.2.1.	Evaluación por ruta de procesamiento.....	55
4.2.2.	Evaluación por operación unitaria.....	58
4.3.	Indicadores de consumo de agua, energía y GEI.....	65
4.3.1.	Consumo de agua.....	65
4.3.2.	Consumo de energía.....	66
4.3.3.	Emisión de GEI.....	67
4.4.	Efecto de parámetros operacionales en DOZN.....	68
4.4.1.	Variaciones en ruta hidrometalúrgica.....	68
4.4.2.	Variaciones en ruta pirometalúrgica.....	72
4.5.	Evaluación de Química Verde en ruta alternativa.....	74
4.6.	Integración de operaciones unitarias.....	76
5.	Conclusiones.....	79
6.	Recomendaciones.....	80
7.	Glosario.....	81
8.	Bibliografía.....	82
9.	Anexos.....	85
9.1.	Anexo 1.....	85
9.2.	Anexo 2.....	85

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Participación de procesos pirometalúrgicos (cátodos ER, blíster, ánodos y RAF) e hidrometalúrgicos (cátodos EW) en la producción de cátodos de cobre (Modificado a partir de base de datos Cochilco, 2018).</i>	1
<i>Figura 2. Diagrama de Venn de métricas de sostenibilidad (Sheldon, 2018).</i>	5
<i>Figura 3. Distribución de indicadores de sostenibilidad ambiental en las categorías de sostenibilidad ambiental medidas (Fuentes et al., 2021).</i>	17
<i>Figura 4. Rutas de procesamiento convencionales para la obtención de cobre catódico a partir de minerales sulfurados (a) y oxidados (b) de cobre (Schlesinger et al., 2011).</i>	18
<i>Figura 5. Tendencia en la ley de cobre de mina presentado por la firma Brook Hunt (Gonzales et al., 2019).</i>	19
<i>Figura 6. Producción total anual de cobre por tecnología primaria de fusión (Watt y Kapusta, 2019).</i>	21
<i>Figura 7. Producción total anual de cobre por tecnología de conversión (Watt y Kapusta, 2019).</i>	22
<i>Figura 8. Relación entre ley de cobre y tamaño de partícula del mineral para diferentes métodos de lixiviación (Schlesinger et al., 2011).</i>	23
<i>Figura 9. Diagrama de flujo simplificado para el proceso hidrometalúrgico (Sole, 2008).</i>	24
<i>Figura 10. Datos requeridos y resultados entregados por DOZN 2.0.</i>	36
<i>Figura 11. Puntaje DOZN global y por categorías para cada ruta de procesamiento.</i>	55
<i>Figura 12. Puntaje DOZN para principios 1, 2, 3, 7 y 12, para cada ruta de procesamiento.</i>	56
<i>Figura 13. Puntaje DOZN para principios 4, 5, 10 y 11, para cada ruta de procesamiento.</i>	57
<i>Figura 14. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento (Flotación: 54.8[%]; Fusión: 2.6[%]; Conversión: 2.8[%]; Refino: 1.1[%]; ER: 38.7[%]; Aglo: 0.1[%]; LIX: 42[%]; SX: 10[%]; EW: 47.9[%]).</i>	58
<i>Figura 15. Distribución de puntaje DOZN por categorías según operaciones unitarias en ruta pirometalúrgica.</i>	59
<i>Figura 16. Puntaje DOZN para los principios 1, 2, 3, 7 y 12 evaluados para cada operación unitaria en la ruta pirometalúrgica.</i>	60
<i>Figura 17. Puntaje DOZN para los principios 4, 10 y 11 evaluados para cada operación unitaria en la ruta pirometalúrgica.</i>	61
<i>Figura 18. Distribución de puntaje DOZN por categorías según operaciones unitarias en ruta hidrometalúrgica.</i>	62
<i>Figura 19. Puntaje DOZN para los principios 1, 2, 3, 7 y 12 evaluados para cada operación unitaria en la ruta hidrometalúrgica.</i>	63

<i>Figura 20. Puntaje DOZN para los principios 4, 5, 10 y 11 evaluados para cada operación unitaria en la ruta hidrometalúrgica.</i>	64
<i>Figura 21. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de lixiviación.</i>	68
<i>Figura 22. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de SX.</i>	70
<i>Figura 23. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de EW.</i>	71
<i>Figura 24. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta pirometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de flotación.</i>	72
<i>Figura 25. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta pirometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de ER.</i>	73
<i>Figura 26. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en la ruta de procesamiento alternativa (Flotación: 75.8[%]; Lix. Presurizada: 23.2[%]; Cementación: 1[%]).</i>	76
<i>Figura 27. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento con tiempo ajustado para ER y EW (Flotación: 68.2[%]; Fusión: 3.2[%]; Conversión: 3.6[%]; Refino: 1.4[%]; ER: 23.6[%]; Aglo: 0.2[%]; LIX: 56.6[%]; SX: 13.4[%]; EW: 29.7[%]).</i>	77
<i>Figura 28. Distribución de puntaje en la categoría de eficiencia energética según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento con tiempo ajustado para ER y EW (Flotación: 0[%]; Fusión: 40.2[%]; Conversión: 51.3[%]; Refino: 5.1[%]; ER: 3.4[%]; Aglo: 0[%]; LIX: 0[%]; SX: 43.5[%]; EW: 56.5[%]).</i>	78
<i>Figura 29. Producción mundial vs Chile, Total Mina=Concentrado+cátodo EW, Fundición=blíster y ánodos, Refinado=cátodos ER y cátodos EW (Modificado a partir de base de datos Cochilco, 2018).</i>	85

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Categorías y principios de la química verde.</i>	9
<i>Tabla 2. Indicadores ambientales (Azapagic, 2004).</i>	16
<i>Tabla 3. Indicadores de sostenibilidad ambiental recopilados de artículos seleccionados (Fuentes et al., 2021).</i>	17
<i>Tabla 4. Reactivos usados en la flotación de minerales sulfurados de cobre (Woodcock, J. T. et al., 2007).</i>	20
<i>Tabla 5. Datos que componen el benchmarking en cada operación de la ruta pirometalúrgica.</i>	30
<i>Tabla 6. Datos que componen el benchmarking en cada operación de la ruta hidrometalúrgica.</i>	34
<i>Tabla 7. Datos de flotación industrial provenientes de 6 concentradoras (Schlesinger M. et al., 2011).</i>	40
<i>Tabla 8. Detalles de producción de 6 Hornos de Fusión Flash Outotec (Schlesinger et al., 2011).</i>	41
<i>Tabla 9. Detalles de producción de 6 operaciones empleando convertidores P-S (Schlesinger et al., 2011).</i>	42
<i>Tabla 10. Detalles de producción de 2 Hornos rotatorios de ánodos (Schlesinger et al., 2011).</i>	43
<i>Tabla 11. Datos operacionales de refinerías de cobre en el mundo (Moats et al., 2007).</i>	44
<i>Tabla 12. Datos operacionales de lixiviación de cobre (Washnock et al., 2016).</i>	46
<i>Tabla 13. Datos de plantas industriales de SX de cobre (Schlesinger et al., 2011).</i>	48
<i>Tabla 14. Datos operacionales de plantas de EW de cobre (Robinson et al., 2007).</i>	50
<i>Tabla 15. Valores promedio y rangos considerados en parámetros de ruta pirometalúrgica.</i>	51
<i>Tabla 16. Valores promedio y rangos considerados en parámetros de ruta hidrometalúrgica.</i>	52
<i>Tabla 17. Resultado del balance de masa en la ruta pirometalúrgica.</i>	53
<i>Tabla 18. Resultado del balance de masa en la ruta hidrometalúrgica.</i>	54
<i>Tabla 19. Consumo de agua en las rutas de procesamiento evaluadas.</i>	65
<i>Tabla 20. Consumo de energía por tonelada de cobre en las rutas de procesamiento evaluadas.</i>	66
<i>Tabla 21. Emisión de GEI en las rutas de procesamiento evaluadas.</i>	67
<i>Tabla 22. Datos operacionales de lixiviación presurizada de cobre (Schlesinger M. et al., 2011).</i>	74
<i>Tabla 23. Datos operacionales de cementación de cobre (Fredes, 2015).</i>	75
<i>Tabla 24. Criterios de decisión sobre toxicidad acuática para determinar factor B.</i>	81
<i>Tabla 25. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta hidrometalúrgica.</i>	86
<i>Tabla 26. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta pirometalúrgica.</i>	86
<i>Tabla 27. Puntajes DOZN obtenidos en ER y EW al ajustar el tiempo de producción.</i>	87
<i>Tabla 28. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta alternativa.</i>	88

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuación 1. Evaluador Principio 1.....</i>	<i>10</i>
<i>Ecuación 2. Evaluador Principio 2.....</i>	<i>10</i>
<i>Ecuación 3. Evaluador Principio 7.....</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 4. Evaluador Principio 8.....</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 5. Evaluador Principio 9.....</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 6. Evaluador Principio 11.....</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 7. Evaluador Principio 6.....</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 8. Evaluador Principio 3.....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 9. Evaluador Principio 4.....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 10. Evaluador Principio 5.....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 11. Evaluador Principio 10.....</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 12. Evaluador Principio 12.....</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 13. Razón másica de oxígeno por tonelada de concentrado.....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 14. Razón de lixiviación.....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 15. Masa de mineral empleada en ruta pirometalúrgica.....</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación 16. Masa de concentrado empleada en ruta pirometalúrgica.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 17. Tiempo requerido en ER para producir una tonelada de cobre.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 18. Tasa de extracción de cobre en SX.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 19. Flujo de electrolito en SX.....</i>	<i>35</i>

1. Introducción

El sistema de procesamiento de minerales empleado para la obtención de cobre metálico depende principalmente del tipo de mineral procesado, optando preferentemente por un proceso hidrometalúrgico en el caso de minerales oxidados de cobre (malaquita, azurita, atacamita, etc) y un proceso pirometalúrgico para minerales sulfurados de cobre (calcopirita, bornita, calcosina, etc). En relación con la producción de este metal en el mundo, Chile tiene una amplia participación, llegando a un 28% aproximadamente en el año 2018 incluyendo concentrado de cobre y cátodos proveniente de electro obtención (Figura 29). En la producción de cobre refinado (cátodos SX-EW, cátodos ER y RAF), Chile alcanza un 10% de participación con 2.46 [Mt], mientras que para el cobre proveniente de fundición (blíster y ánodos) alcanza un 7% correspondientes a 1.25 [Mt], considerando el mismo año.

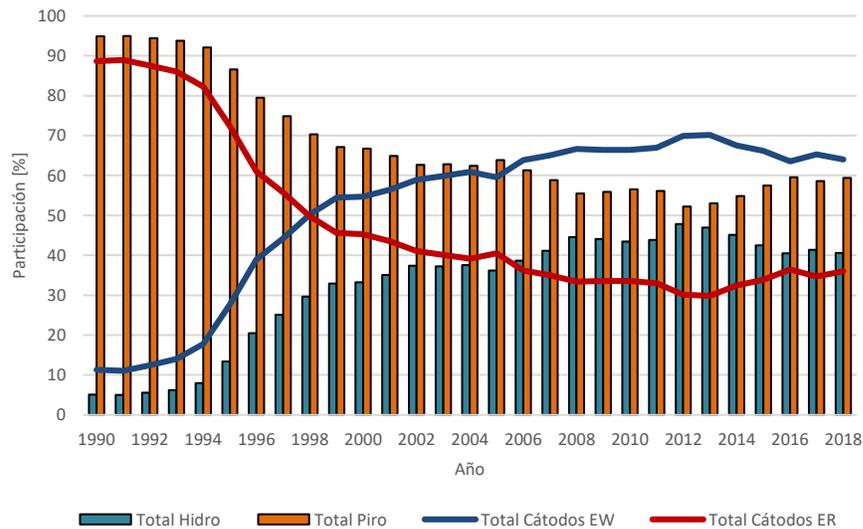


Figura 1. Participación de procesos pirometalúrgicos (cátodos ER, blíster, ánodos y RAF) e hidrometalúrgicos (cátodos EW) en la producción de cátodos de cobre (Modificado a partir de base de datos Cochilco, 2018).

Dentro de la producción de cátodos en Chile, la fabricación de cátodos EW ha incrementado en el tiempo, sobrepasando en las últimas dos décadas la de cátodos ER (64% y 36% respectivamente en el 2018) como se observa en la Figura 1, no obstante, si se consideran otros productos comercializables provenientes de la fundición como el blíster, ánodos y cobre RAF, la participación de la pirometalurgia supera a la otra alternativa (59.4[%] y 40.6[%] respectivamente en el 2018). De esta forma se identifican dos rutas de procesamiento predominantes y con amplia trayectoria.

En los últimos años la industria minera ha experimentado un constante desarrollo en el ámbito de sostenibilidad, enfocando esfuerzos en crear operaciones que causen un menor impacto en el ambiente y sean más seguras para los operadores. Esto ha llevado al desarrollo de numerosos indicadores cuyo propósito es cuantificar el impacto que genera la actividad minera en las 3 dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, social y económica. Sin embargo, junto con lo anterior se genera la problemática de establecer indicadores que permitan comparar el rendimiento entre rutas de procesamiento distintas ya que generalmente los indicadores desarrollados tienen una aplicación restringida a la empresa en la cual fueron creados. Azapagic (2004) plantea un marco de trabajo para el desarrollo de indicadores de sostenibilidad para la industria minera, se aplican indicadores ambientales como la cantidad de desechos totales extraídos expresado en [t/año] y el porcentaje de energía renovable empleada en relación con el consumo total de energía.

No obstante, se requieren estrategias que permitan monitorear un proceso para la mejora continua en su rendimiento en sostenibilidad e incluso permitan la comparación de este rendimiento en distintos procesos que producen un mismo material, de manera que sea posible evaluar proyectos previos a ejecutarse. En este contexto se plantea la resolución de esta problemática bajo la utilización de un *software* que permite evaluar cuantitativamente el rendimiento químico verde de un proceso determinado, corresponde a DOZN 2.0. Este *software*, desarrollado por MilliporeSigma, aplica los 12 principios de la Química Verde (Anastas y Warner, 1998) empleando algoritmos que entregan al usuario un valor para cada principio y un valor resumen del proceso evaluado a partir de información de fácil acceso, asociada principalmente a los insumos empleados y características del proceso, basándose en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA). En este trabajo se utiliza el *software* mencionado para evaluar el rendimiento químico verde de procesos que permiten obtener cobre catódico (y otros subproductos).

1.1. Objetivos generales

Determinar el rendimiento químico verde de procesos productivos de cobre catódico y productos comercializables, particularmente las rutas convencionales de tratamiento de sulfuros y óxidos de cobre, basado en *benchmarking* y considerando variantes específicas de cada operación unitaria.

1.2. Objetivos específicos

1. Definir el caso base de las principales rutas de procesamiento de minerales para la obtención de cobre catódico y productos comercializables incorporando especificidades e insumos que requieren a través de un *benchmarking* basado en la literatura disponible.
2. Analizar variantes en las operaciones unitarias del caso base para cada ruta de procesamiento y el cambio en los insumos utilizados.
3. Evaluar el rendimiento químico verde de las rutas identificadas utilizando *software* DOZN 2.0.
4. Diseñar y analizar estrategias simplificadas que aumenten el rendimiento químico verde de cada ruta productiva definida.

1.3. Alcances

El estudio del rendimiento químico verde mediante el *software* se aplica sólo a la metalurgia extractiva del cobre y no se incluyen estudios de procesos productivos de otros materiales. Particularmente las rutas convencionales para sulfuros y óxidos de cobre son abordadas en cada una de sus operaciones unitarias con el propósito de presentar las características del proceso e insumos requeridos que son relevantes para la aplicación del evaluador. Las variaciones en estas operaciones unitarias se asocian principalmente a cambios en la tecnología empleada o a la existencia de distintas materias primas capaces de cumplir la misma función, no se analizan variantes que difieren de las prácticas comunes en la industria. Finalmente, las estrategias simplificadas se diseñan considerando el *benchmarking* y análisis de sensibilidad del rendimiento químico verde ante variaciones en los insumos aplicados a través del proceso para de esta forma establecer qué ruta de procesamiento presenta un rendimiento químico verde superior.

1.4. Estructura del trabajo

Este reporte abarca 4 secciones principales a través de las cuales se entrega un marco general de trabajo, la metodología empleada, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo. Inicialmente, en el capítulo 2, se realiza una revisión crítica de la literatura disponible donde se proporcionan las nociones principales de química verde, su relación con la sostenibilidad y los 12 principios de la química verde, que son el eje central de este estudio.

Se presentan indicadores de sostenibilidad aplicados a la industria minera de los cuales algunos son empleados en conjunto con la evaluación del *software* DOZN 2.0. Además, se incluye un resumen de las operaciones unitarias clásicas que están incluidas en las rutas de procesamiento analizadas. El capítulo 3 corresponde a la metodología de este trabajo, la cual consiste en la aplicación del método de evaluación del ciclo de vida de productos mediante el *software* mencionado y obteniendo el inventario de datos a partir de *benchmarking* proporcionado por distintos reportes de operaciones mineras. Se incluyen los supuestos empleados en los cálculos y el detalle de estos para obtener la masa de los materiales involucrados en cada operación. El capítulo 4 corresponde a los resultados de este reporte, inicialmente se entregan los datos de operaciones empleados junto con el balance de masa por operación unitaria. Luego se presenta la evaluación del rendimiento químico verde comparando las rutas de procesamiento pirometalúrgica e hidrometalurgia según el puntaje global del *software*, por categorías y por cada principio de la química verde. Además, se entrega el análisis acorde a la influencia de cada operación unitaria en la evaluación de la química verde y los principales parámetros operacionales que influyen en la evaluación de cada ruta de procesamiento. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este reporte, enfatizando en los aspectos principales de la evaluación y los factores involucrados.

2. Revisión Crítica de la Literatura

Con el fin de estandarizar y plantear un marco de trabajo para el análisis del rendimiento químico verde de las dos rutas de procesamiento que permiten obtener cobre catódico, se requiere establecer las operaciones unitarias consideradas en cada una y los flujos másicos de productos e insumos que caracterizan a cada proceso, además de presentar las tecnologías comúnmente utilizadas ya que definen en muchos casos los materiales a emplear y los productos generados. También es necesario comprender el concepto de Química Verde y su relación con la sostenibilidad a través de sus 12 principios asociados, detallando las formas de cálculo que emplea el *software* DOZN en la evaluación de cada uno de estos principios y como se comparan estas fórmulas con otras presentes en la literatura empleadas para evaluar la química verde.

2.1. Sostenibilidad y desarrollo sustentable

Los inicios del desarrollo sustentable remontan alrededor de 1970 con la publicación del Club de Roma (Lenoir et al., 2020) según algunos autores y alrededor de 1980 como resultado de la preocupación mundial asociada a los impactos ambientales y en la salud por parte de la producción, distribución, uso y descarga de sustancias químicas en cantidades crecientes (Horvát, 2018) según otros expertos. En 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU define el concepto de desarrollo sustentable como “el que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades”.

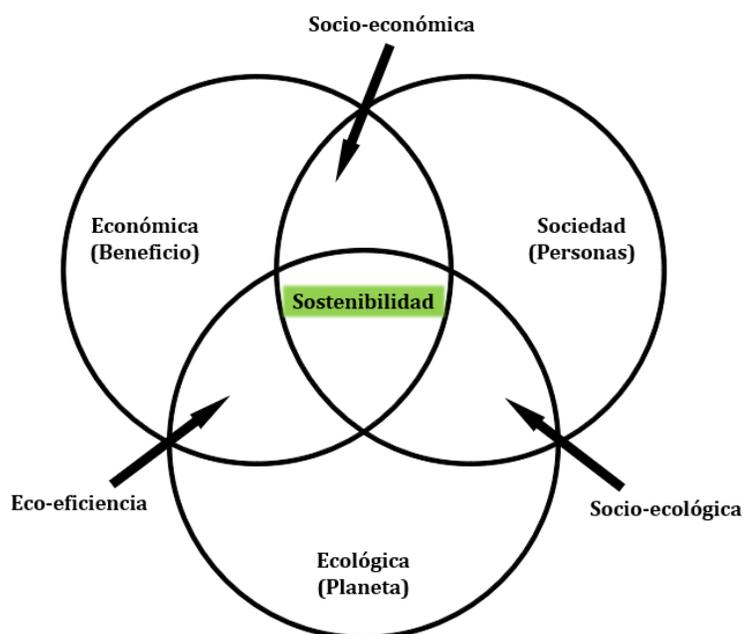


Figura 2. Diagrama de Venn de métricas de sostenibilidad (Sheldon, 2018).

La definición anterior no entrega suficiente información de como la química puede hacerse sustentable, es este aspecto la química verde provee una solución. La química verde y sustentable ha contribuido en cambiar actitudes y comportamientos en la fabricación y producción de productos químicos (Poliakoff et al., 2018). Para que el desarrollo sea verdaderamente sustentable se deben considerar 3 áreas interrelacionadas: el medio ambiente, la economía y la sociedad, como se muestra en la Figura 2. La correcta aplicación de la química verde provee muchos beneficios en varios aspectos de la sostenibilidad, pero se debe considerar que está enfocada al área ambiental. La aceptación global del término sostenibilidad produjo el desarrollo de otras áreas como la química verde (Płotka-Wasyłka et al, 2021).

2.2. Química Verde

El rol de la química es esencial para asegurar que la siguiente generación de productos químicos y energía sea más sustentable que la actual. Uno de los conceptos más atractivos en química para la sostenibilidad es la química verde. El rápido desarrollo de la química verde en el tiempo se debe al reconocimiento de que productos químicos y procesos más respetuosos con el medio ambiente serán rentables a largo plazo (Horvát y Anastas, 2007).

Algunos autores separan el concepto de química verde de química sustentable. Horvát (2018) señala que debido a que algunas partes de la química verde podrían no ser sustentables en absoluto, una definición de química sustentable debería proponerse y aplicarse para la evaluación de químicos, reacciones o procesos. Señala que en general, la química sustentable debería emplear recursos, incluyendo energía, a una tasa a la que puedan ser reemplazados naturalmente, y la generación de desechos no puede ser más rápida que la tasa de remediación de estos. No obstante, la minería extrae recursos que precisamente no son renovables, por lo tanto, la definición anterior no sería posible de aplicar en este caso. Por otra parte, Lenoir et al. (2020) señala que la química verde está estrechamente relacionada con la química sustentable y que recientemente los dos términos incluso se usan indistintamente. Independiente de lo anterior, existe consenso en que la química verde contribuye al desarrollo sustentable.

El concepto de química verde se relaciona con el enfoque en la síntesis, el procesamiento y el uso de productos químicos que reduce los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente. Este enfoque incluye nuevos métodos de síntesis y procesos, con beneficios para la industria y el medio ambiente como parte del impacto positivo de la química verde. (Anastas y Williamson, 1996). El rendimiento químico verde aplicado a las rutas de procesamiento consideradas difieren entonces inevitablemente dado que las operaciones unitarias e insumos empleados son distintos para cada una. Anastas y Warner definen en 1998 un marco de trabajo para la química verde que considera 12 principios bajo los cuales se rige. Estos principios tienen su enfoque en el uso eficiente de los recursos, así como también en la generación y utilización de productos químicos menos dañinos para los seres humanos y el medio ambiente. Los 12 principios de la química verde se definen a continuación:

1. Prevención de desechos: es preferible evitar la producción de un residuo que reciclarlo, tratarlo o disponer de él una vez que se haya formado.
2. Economía atómica: los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera que se incorporen al máximo los reactivos en el producto final, minimizando la formación de subproductos, lo que favorece también al principio 1.
3. Procesos de síntesis menos peligrosos: siempre que sea posible, los métodos de síntesis deberán diseñarse para utilizar y generar sustancias que tengan poca o ninguna toxicidad, tanto para el hombre como para el medio ambiente.
4. Diseño de productos químicos más seguros: los productos químicos deberán ser diseñados de manera que mantengan la eficacia a la vez que reduzcan su toxicidad.
5. Solventes y auxiliares más seguros: se evitará, en lo posible, el uso de sustancias que no sean imprescindibles (solventes, reactivos para llevar a cabo separaciones, etc.) y en el caso de que se utilicen, que sean lo más inocuos posible.
6. Diseño para la eficiencia energética: los requerimientos energéticos serán catalogados por su impacto medioambiental y económico, reduciéndose todo lo posible.
7. Uso de materia prima renovable: las materias primas han de ser preferiblemente renovables en vez de agotables, siempre que sean técnica y económicamente viables.
8. Reducir derivados: se evitará en lo posible la formación de derivados (grupos de bloqueo, de protección/desprotección, modificación temporal de procesos físicos/químicos).
9. Catálisis: se emplearán catalizadores (lo más selectivos), reutilizables en lo posible, en lugar de reactivos estequiométricos.
10. Diseño para la degradación enfocado en criterios de peligro ambiental: los productos químicos se diseñarán de tal manera que al finalizar su función no persistan en el medio ambiente, sino que se transformen en productos de degradación inocuos.

11. Análisis en tiempo real para la prevención de contaminación: las metodologías analíticas serán desarrolladas para permitir el monitoreo y control en tiempo real de los procesos, previo a la formación de productos secundarios.
12. Química intrínsecamente segura para la prevención de accidentes: se elegirán las sustancias empleadas en los procesos químicos de forma que se minimice el riesgo de accidentes químicos, incluidas las emanaciones, explosiones e incendios.

Los principios de la química verde son ampliamente usados en la gestión industrial, políticas gubernamentales, practicas educacionales y desarrollo tecnológico alrededor del mundo (Płotka-Wasyłka et al, 2021). Estos principios están bien definidos, pero son cualitativos, necesitan medidas y métricas cuantitativas (Lenoir et al., 2020).

Como solución se plantea una métrica de química verde, es decir, una forma de dimensionar cada uno de los 12 principios, que es flexible y considera prácticas industriales generalmente aceptadas. Esta métrica es la empleada en el *software* DOZN 2.0, desarrollado por MilliporeSigma.

1. Permitir la comparación directa entre productos químicos alternativos considerados para una misma aplicación y la comparación directa entre procesos alternativos considerados para fabricar el mismo producto.
2. Permitir una comparación transparente entre los 12 principios de la química verde y para cada una de las 3 categorías principales de administración definidas: eficiencia de recursos, peligro para la salud humana y el medio ambiente, y uso de energía.
3. Entregar flexibilidad suficiente para la aplicación del método a una diversa cartera de productos.
4. Ser de bajo costo de implementación utilizando datos fácilmente disponibles.
5. Estar basado en prácticas industriales generalmente aceptadas, cuando estén disponibles.
6. Ser en metodología y resultados, fácil de explicar a los clientes

Los principios están agrupados en las 3 categorías antes mencionadas, el uso de recursos incluye los principios 1, 2, 7, 8, 9, 10 y 11, la eficiencia energética incluye el principio 6, mientras que los riesgos humanos y ambientales incluyen los principios 3, 4, 5, 10 y 12. La distribución anterior se detalla en la Tabla 1 (Kreuder et al., 2017).

Tabla 1. Categorías y principios de la química verde.

Mejorar uso de recursos	Mayor eficiencia energética	Reducción de peligros humanos y ambientales
Principio 1: Prevención de desechos	Principio 6: Diseño para la eficiencia energética	Principio 3: Procesos de síntesis menos peligrosos
Principio 2: Economía atómica		Principio 4: Diseño de productos químicos más seguros
Principio 7: Uso de materia prima renovable		Principio 5: Disolventes y auxiliares más seguros
Principio 8: Reducir derivados		Principio 10: Diseño para la degradación enfocado en criterios de peligro ambiental
Principio 9: Catálisis		Principio 12: Química inherentemente más segura para la prevención de accidentes
Principio 11: Análisis en tiempo real para la prevención de contaminación		

Para cada principio se asigna un evaluador según la métrica definida para la química verde (P). A continuación, se describe la forma de dimensionar los 12 principios según el *software* junto con establecer su aplicación a las rutas de procesamiento antes descritas considerando las condiciones de cada operación unitaria en particular (presión, temperatura, flujos de entrada y salida, características del proceso, etc).

2.2.1. Uso de Recursos

Esta categoría incluye los principios avocados a la eficiencia de recursos y reducción de desechos, estos principios abordan el uso de recursos de distintas formas. Mientras las métricas del principio 1 y 2 entregan una aproximación general a la eficiencia de recursos considerando la relación entre los materiales de entrada y el producto generado, el principio 7 aborda este aspecto en la medida que se utilicen materiales renovables como insumos. Las métricas asociadas a los principios 8, 9 y 11 se aproximan a la eficiencia de recursos en el proceso de fabricación a través de la reducción de desechos de derivatización, incremento del uso de catalizadores y el uso de un control más cuidadoso, respectivamente (Kreuder et al., 2017).

Principio 1: Prevención de desechos

La Ecuación 1 empleada para el cálculo de este principio corresponde a una de las métricas de química verde más antiguas junto con la economía atómica, el factor E (*environmental factor*), definido por la razón másica entre los desechos y el producto deseado (Sheldon, 2018). La diferencia yace en la inclusión del factor asociado a la gravedad de los residuos.

Ecuación 1. Evaluador Principio 1.

$$P1 = \frac{\sum_i^n (\text{masa de desecho [kg]} * \text{gravedad de los residuos})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Para la ecuación anterior, la gravedad de los residuos corresponde a un factor que va de 1 (sin gravedad, se recircula dentro del proceso) hasta 15 (material que debe ser incinerado al descartarse) según el sistema de disposición que requiere el residuo generado, se aplica para todos los flujos que se consideren desecho, es decir, se descarten completamente de la cadena productiva.

Principio 2: Economía atómica

La métrica definida para este principio, al igual que el anterior, al uso eficiente de recursos, la diferencia recae en que en este caso el enfoque se encuentra en el uso eficiente de los materiales de entrada en vez de la generación de desechos. La métrica de economía atómica mencionada anteriormente corresponde a un valor teórico que utiliza cantidades estequiométricas exactas en los materiales de entrada y el producto, ignorando sustancias como solventes y auxiliares. La métrica definida por la Ecuación 2 se asemeja a la intensidad de masa del proceso (PMI), otra métrica de la química verde basada en la masa de materiales que corresponde a la razón másica entre los materiales empleados en el proceso y el producto generado (Sheldon, 2018). La ventaja sobre la métrica anterior es que el cálculo de este principio considera los reactantes y auxiliares recuperados.

Ecuación 2. Evaluador Principio 2.

$$P2 = \frac{R [kg] + A [kg] - RR [kg] - RA [kg]}{\text{masa de producto [kg]} + \text{masa de coproductos [kg]}}$$

En la Ecuación 2 R y A corresponden a los reactivos y auxiliares aplicados respectivamente al proceso evaluado, los auxiliares corresponden generalmente a disolventes o reguladores de pH que no toman parte en la reacción que ocurre. RR y RA corresponden a la porción de reactivos y auxiliares que se recirculan en el sistema.

Principio 7: Uso de materia prima renovable

Ecuación 3. Evaluador Principio 7.

$$P7 = \frac{\sum_i^n (\text{masa de materia prima [kg]} * \% \text{ no renovable})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Se aplica para todos los insumos agregados al sistema acorde a si son reincorporados de alguna forma al medio ambiente o no. Para el caso de la industria minera del cobre, marcada por el uso de recursos no renovables, este indicador resulta ser similar al anterior, incluso igual en su valor para los procesos que no incluyan materiales recirculados ni coproductos.

Principio 8: Reducir derivados

Ecuación 4. Evaluador Principio 8.

$$P8 = \frac{\sum_i^n \text{masa de residuos derivados [kg]}}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Los materiales de desecho no se consideran residuos derivados ya que los últimos no corresponden a material de descarte sino a división de flujos que son tratados mediante procesos diferentes, pero continúan en la cadena de valor. La mayoría de las operaciones unitarias en el procesamiento de sulfuros y óxidos de cobre van en la dirección de síntesis del producto deseado (cobre catódico).

Principio 9: Catálisis

Ecuación 5. Evaluador Principio 9.

$$P9 = \frac{1}{1 + N^\circ \text{ de pasos catalíticos}}$$

Según las reacciones identificadas en el proceso, se detalla el número de pasos que se aplica con un catalizador asociado, entendiendo que esto mejora la eficiencia de los procesos y promueve un menor tiempo de reacción. Entendiendo que un catalizador no se consume en la reacción y no se encuentra en razones estequiométricas, es complejo aplicar este principio al caso de estudio debido a la falta de catalizadores empleados.

Principio 11: Análisis en tiempo real para la prevención de contaminación

Este principio incorpora la química analítica, como análisis en proceso, para detectar desviaciones de las condiciones de operación, reconociendo que mientras antes sean corregidas estas desviaciones, menos probable es que un proceso genere desechos adicionales o cause peligros adicionales. La métrica empleada en este principio está enfocada al monitoreo de la temperatura de proceso o pH.

Ecuación 6. Evaluador Principio 11.

$$P11 = \frac{N^{\circ} \text{ de pasos sin control}}{(N^{\circ} \text{ de pasos con control} * \text{Rigor}) + N^{\circ} \text{ de pasos sin control}}$$

El rigor está asociado al tipo de control que se aplica, específicamente si este es digital o analógico, entendiendo que un control digital es más eficiente al momento de detectar posibles focos de contaminación para lograr un control más rápido, dado lo anterior el valor otorgado al Rigor es de 5 en caso de que el control sea digital y toma un valor de 1 al ser analógico (Kreuder et al., 2017). Cabe destacar que este principio se anula en procesos que impliquen sólo un paso y este se encuentre bajo algún método de control ya sea digital o análogo.

En la literatura se encuentran varios problemas en el uso de métricas de eficiencia de recursos donde se llega a conclusiones erróneas o limitaciones en relación con el nivel de química verde de procesos, Andraos (2016) señala 4 problemas al respecto:

- i. La determinación del nivel de química verde de un plan de síntesis es un análisis comparativo, no absoluto. Por lo tanto, la evaluación se basa en comparar varias métricas para un conjunto de planes que permiten generar el mismo producto. La optimización real se logra cuando se emplean distintas métricas de forma estructurada, el objetivo es tener un plan de síntesis que posea todos los valores deseados para las métricas consideradas en la medida de lo posible. La dispersión de buenos resultados entre distintas rutas de proceso indica una mala estructuración de las métricas.

- ii. Las afirmaciones de eficiencia o rendimiento químico verde realizadas sobre la base de uno o dos criterios como el recuento de operaciones o uno de los 12 principios de la química verde no constituirían afirmaciones genuinas acerca del nivel de química verde.
- iii. Afirmar que toda una ruta productiva presenta un atractivo rendimiento químico verde sobre la base de una reacción en ese plan que presenta una química noble mientras se ignoran el resto de los pasos del plan, tampoco es una afirmación genuina acerca del nivel de química verde.
- iv. Reconocer que incluso si el plan de síntesis con el mejor rendimiento químico verde se logra con la tecnología actual, siempre existen nuevas oportunidades para realizar mejoras adicionales a medida que se descubran nuevas transformaciones químicas. Por lo tanto, la optimización nunca está realmente completa y esto brinda ilimitadas oportunidades.

2.2.2. Eficiencia Energética

En la producción de productos químicos básicos, el consumo de energía juega un rol muy importante en la comparación, por ejemplo, de rutas basadas en el uso de biomasa con rutas basadas en el uso de hidrocarburos. Al igual que en las métricas de uso eficiente de recursos, las métricas de eficiencia energética pueden estar basadas en la materia prima consumida en el proceso o en el desecho generado (Sheldon, 2018).

Principio 6: Diseño para la eficiencia energética

Ecuación 7. Evaluador Principio 6.

$$P_6 = \frac{\sum_i^n \{(SF_T + SF_p) * tiempo [h] * masa de materias primas [kg]\}}{masa de producto [kg]}$$

donde, SF_T y SF_p corresponden a los factores de seguridad para la temperatura y presión respectivamente, estos factores aumentan a medida que las condiciones de presión y temperatura se alejan de las condiciones normales correspondientes a 1[atm] y 25[°C]. Estos factores poseen un valor nulo en el caso de que la reacción se lleve a cabo en condiciones normales y tienen un valor máximo de 5. Se emplea el tiempo en que la materia prima considerada pasa por dichas condiciones especificadas.

2.2.3. Riesgos humanos y ambientales

Para los principios 3, 4 y 5 se aplica el mismo criterio basado en el SGA para distintas clasificaciones de peligros para la salud humana. Se determinan los puntos finales (factor E) de toxicidad aguda y crónica para la salud humana para cada materia prima considerada en cada proceso, el mayor factor E corresponde al factor H aplicado en cada métrica de estos principios.

El principio 10 emplea el criterio de peligro ambiental del SGA para la degradación y bioacumulación (factor B). Finalmente, el principio 12 de esta categoría se basa en los puntos finales para peligros físicos (factor Z) del SGA, incluyendo explosividad, inflamabilidad, capacidad oxidante, reactividad y corrosividad. De igual forma que los principios 3-5, se obtiene un factor P que corresponde al mayor factor Z considerando todas las materias primas (Kreuder et al., 2017).

Principio 3: Procesos de síntesis menos peligrosos

Ecuación 8. Evaluador Principio 3.

$$P3 = \frac{\sum_i^n (H * \text{masa de materia prima [kg]})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Principio 4: Diseño de productos químicos más seguros

Ecuación 9. Evaluador Principio 4.

$$P4 = \frac{\sum_i^n (H * \text{masa de producto [kg]})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Principio 5: Disolventes y auxiliares más seguros

Ecuación 10. Evaluador Principio 5.

$$P5 = \frac{\sum_i^n (H * \text{masa de solvente [kg]})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Cabe destacar que en este principio no se considera el agua como solvente ya que solo se incluyen solventes orgánicos.

Principio 10: Diseño para la degradación enfocado en criterios de peligro ambiental.

Ecuación 11. Evaluador Principio 10.

$$P10 = \frac{B(\text{producto de mayor puntuación}) * \text{masa del producto de mayor puntuación [kg]}}{\text{masa de producto [kg]}}$$

La métrica de este principio emplea información derivada del SGA acerca de la biodegradación, toxicidad aguda y crónica para el agua, logaritmo del coeficiente de reparto octanol-agua (K_{ow}) y factor de bioconcentración. El factor B corresponde a la gravedad del impacto del producto principal o de degradación para el medio ambiente, este se determina siguiendo los criterios presentes en la Tabla 17.

Principio 12: Química inherentemente más segura para la prevención de accidentes.

Ecuación 12. Evaluador Principio 12.

$$P12 = \frac{\sum_i^n (P * \text{masa de materia prima [kg]})}{\text{masa de producto [kg]}}$$

Hay dos tareas principales en la implementación de cualquier evaluación de métricas basadas en seguridad e impacto ambiental, la selección de parámetros y la búsqueda de fuentes confiables de datos para estos parámetros. La selección de métricas para estos impactos se ha guiado mayoritariamente por las declaraciones generales contenidas en los 12 principios de la química verde, el etiquetado del Sistema de Información de Materiales Peligrosos en el Lugar de Trabajo (WHMSI) y la información contenida en las Hojas de Datos de Seguridad del Material (MSDS o SDS), el sistema de etiquetado 704 de la Asociación Nacional de Protección contra incendios (NFPA) y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NOISH). Las métricas generalmente empleadas en los análisis descritos anteriormente son:

- LD50 (oral)
- LC50 (inhalación)
- Límite de exposición ocupacional (OEL)
- Coeficientes de reparto octanol-agua.
- Potencial de calentamiento global (QWP)
- Potencial de acidez (pK_a)

- Límite inferior de explosión (LEL)
- Punto de inflamación (FP)
- Características de criterio como inflamabilidad, corrosividad, explosividad y potencial oxidante.

La información de toxicidad se puede obtener de manera confiable de la base de datos en línea del Registro de Efectos Tóxicos de Sustancias Químicas (RTECS) y, en menor medida, en las hojas de seguridad encontradas en Sigma-Aldrich y Science Lab (Andraos, 2016).

2.3. Otros indicadores de sostenibilidad en la industria minera

Además del indicador proporcionado por el *software* DOZN, en la literatura existe una gran variedad de indicadores, Azapagic (2004) plantea un marco de trabajo para indicadores de desarrollo sustentable enfocado en la industria de minerales metálicos, de construcción e industriales. Este marco de trabajo presenta indicadores cuantitativos para las 3 dimensiones de la sostenibilidad (Figura 2). La Tabla 2 muestra algunos de los indicadores que miden la sostenibilidad ambiental, el tipo de información que estos indicadores proveen y la unidad en que se expresan.

Tabla 2. Indicadores ambientales (Azapagic, 2004).

Indicador	Información que provee	Unidades
Desechos totales extraídos	La cantidad de desechos que se requiere mover para obtener productos minerales	t/a
Desglose por tipo y cantidad total de productos químicos utilizados	Tipos y cantidades de cada producto químico usado para la producción de productos minerales	t/a
Agua total utilizada	Cantidad de recursos hídricos utilizados para la producción de recursos minerales	m ³ /a
Desglose por tipo de la cantidad de energía secundaria utilizada y exportada	Cantidad de energía secundaria (electricidad y calor) usado para las actividades minerales y la cantidad exportada, si aplica	MJ/a
Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), desglose por sustancia	Emisión de GEI, permite el cálculo de la contribución al calentamiento global	t/a

Estos indicadores junto con los incluidos en el marco de trabajo señalado siguen las directrices de informes de sostenibilidad publicado por la Iniciativa de Reporte Global (GRI) con el propósito de favorecer el uso de indicadores comunes en la industria (Azapagic, 2004).

Fuentes et al. (2021) lleva a cabo una clasificación de 129 indicadores que miden la sostenibilidad ambiental de la minería y procesamiento del cobre. La clasificación se realiza en 4 dimensiones: categorías de sostenibilidad ambiental, metodología o técnica utilizada para calcular el indicador, escala temporal y espacial empleada y tipo de fuentes de datos para cuantificar el indicador. La Figura 3 presenta la distribución de estos indicadores entre las categorías consideradas.

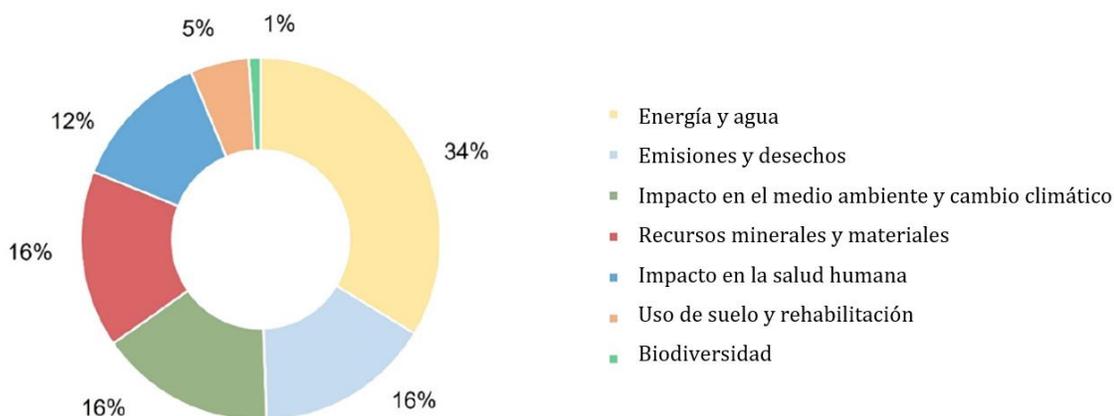


Figura 3. Distribución de indicadores de sostenibilidad ambiental en las categorías de sostenibilidad ambiental medidas (Fuentes et al., 2021).

Las metodologías más empleadas son el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) seguido de marcos de trabajo como el enfoque de ecoeficiencia y el marco de trabajo para informes de sostenibilidad perteneciente al GRI, como se menciona anteriormente. El presente corresponde a la escala de tiempo más empleada en estos indicadores, la escala espacial más frecuente se asociada al uso de datos globales promedio. En las escalas temporal y espacial mencionadas, las fuentes de datos más utilizadas son conjuntos de datos comerciales o de acceso abierto y datos publicados en artículos científicos (Fuentes et al., 2021). Algunos de los indicadores que forman parte del estudio mencionado se muestran en la Tabla 3, también se menciona la fuente en la que se aplica dicho indicador, todos son aplicados en la industria del cobre.

Tabla 3. Indicadores de sostenibilidad ambiental recopilados de artículos seleccionados (Fuentes et al., 2021).

Indicador	Unidades	Fuente
Potencial de calentamiento global (GWP)	Kg CO_2 eq	Abadías et al., 2019
Huella de carbono	CO_2 eq/kg Cu	Nilsson et al., 2017
Huella de consumo de agua	m^3/t Cu	Lagos et al., 2018
Consumo de energía eléctrica	J/t Cu	
Consumo de energía de combustible	J/t Cu	
Intensidad de energía	J/t Cu	Northey et al., 2013

2.4. Operaciones unitarias en rutas de procesamiento del cobre

El procesamiento de minerales sulfurados y oxidados de cobre se lleva a cabo mediante dos rutas convencionales, una pirometalúrgica y otra hidrometalúrgica respectivamente como se observa en la Figura 4, que incluye las principales operaciones posteriores a las etapas de conminución del mineral.

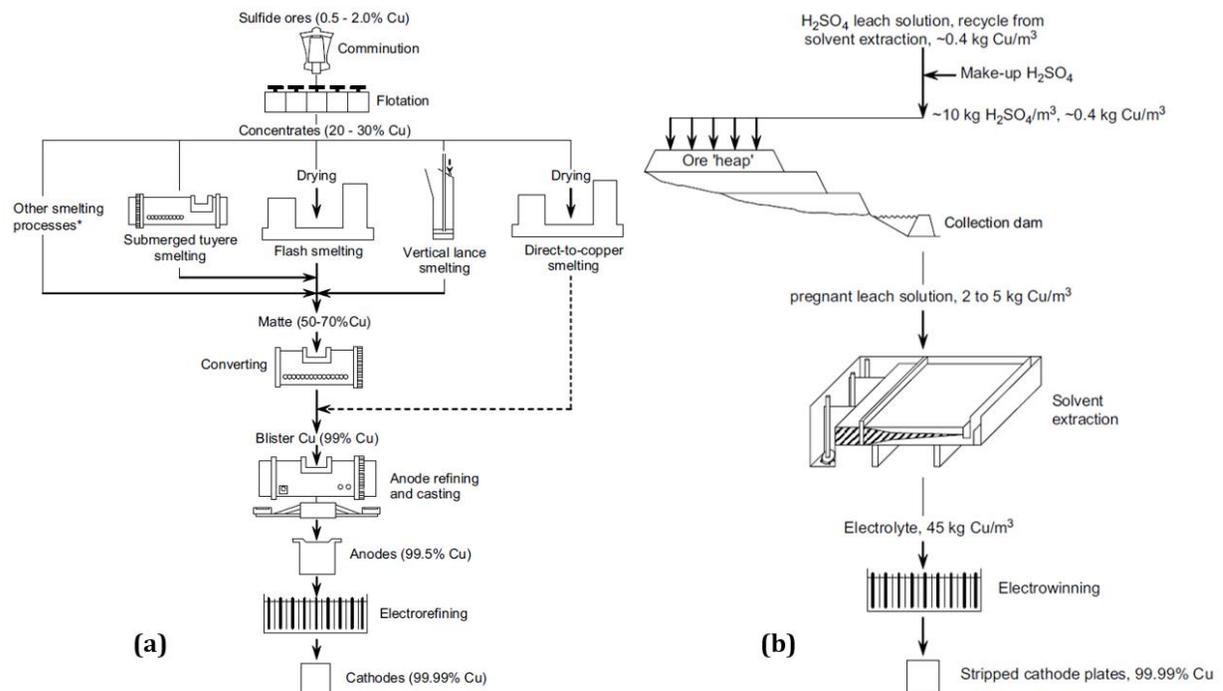


Figura 4. Rutas de procesamiento convencionales para la obtención de cobre catódico a partir de minerales sulfurados (a) y oxidados (b) de cobre (Schlesinger et al., 2011).

El esquema de procesamiento de minerales sulfurados de cobre incluye las operaciones unitarias de flotación, fusión, conversión, refinado a fuego y electro refinación para la obtención de cátodos de cobre de un 99.99[%] de pureza. Los minerales oxidados son procesados a través de las operaciones de aglomeración, lixiviación, extracción por solvente y electro obtención para generar cátodos de igual pureza. Con el objetivo de proporcionar un marco general bajo el cual operan los distintos procesos que componen las rutas hidrometalúrgica y pirometalúrgica, en esta sección se entregan las características principales de las operaciones unitarias involucradas. Además, se mencionan las tecnologías generalmente empleadas en cada operación junto con algunas prácticas comunes en la industria.

2.4.1. Ruta Pirometalúrgica

Luego de pasar por reducción de tamaño, (chancado y molienda) el mineral sulfurado de cobre es concentrado mediante el proceso de flotación. El concentrado generado es tratado a alta temperatura en la fundición, (fusión, conversión y refinado a fuego) generando ánodos de cobre que son disueltos electroquímicamente en la última etapa de electro refinación para producir el cátodo de cobre final.

La ley de cobre ha estado bajando desde hace varios años como muestra la Figura 5, partiendo desde 1.6[%] en el año 1990 hasta valores alrededor de 0.8[%] en la actualidad. Esta tendencia a provocado que el cobre en el concentrado descienda de 27[%] en 2004 hasta 23.5[%] en 2018 en base al concentrado alimentado a las fundidoras.

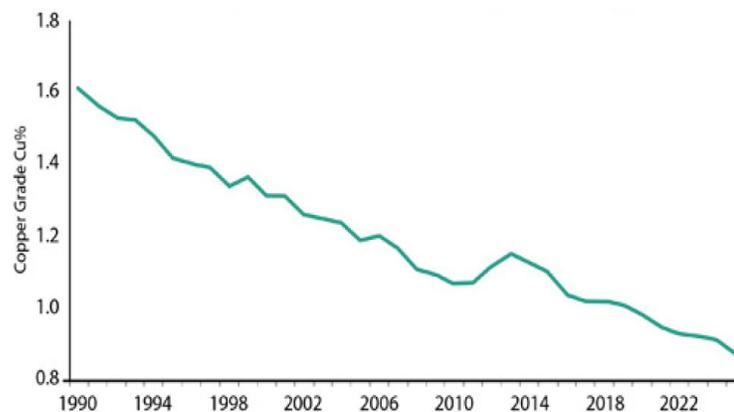


Figura 5. Tendencia en la ley de cobre de mina presentado por la firma Brook Hunt (Gonzales et al., 2019).

La disminución en cobre es reemplazada con el incremento de hierro y sílice en el concentrado, para el año 2018 la tendencia de cobre, hierro, azufre, sílice y arsénico en el concentrado es de 23.5[%], 26.3[%], 29.2[%], 9[%] y 0.24[%] respectivamente (Gonzales et al., 2019).

Flotación

En esta etapa se obtiene el concentrado de cobre de ley cercana al 30[%] (Schlesinger et al., 2011), a partir de una pulpa mineral que contiene aproximadamente un 30[%] de sólidos, dejando relave como desecho. Para otorgar hidrofobicidad al mineral y proporcionar las condiciones necesarias del proceso (características de la espuma, control de pH, etc) se emplean reactivos colectores, espumantes y modificadores. En la flotación de sulfuros de cobre existe una tendencia tanto según investigaciones como en prácticas industriales al uso de colectores solubles en agua como xantatos y ditiofosfatos a valores de pH levemente elevado (Klimpel, 2000).

Dos espumantes comúnmente empleados en la flotación selectiva de minerales, conformados principalmente por calcopirita y pirita, son el metil isobutil carbinol (MIBC) y éter poliglicólico (Dowfroth 250), la selectividad del proceso varía con la mezcla de ambos (Hosten y Tezcan, 1990). Para mantener el pH alrededor de un valor de 10, se emplea cal. La Tabla 4 muestra los principales reactivos empleados en la flotación de minerales sulfurados de cobre, especificando su dosificación correspondiente por tonelada de mineral procesado y función que desempeña.

Tabla 4. Reactivos usados en la flotación de minerales sulfurados de cobre (Woodcock, J. T. et al., 2007).

Tipo de reactivo	Nombre reactivo	Tasa de adición típica [g/t]	Función del reactivo
Colector	Xantato	5-350	Proveer un nivel apropiado de colector para el mineral requerido
	Ditiofosfato	10-250	
	Tiocarbamato	10-15	
	Formiato xantógeno	2-25	
Espumante	Alcoholes sintéticos (ej: metil isobutil carbinol o MIBC)	25-50	Proveer un tipo de espuma apropiada (ej: húmeda o seca, con o sin polvo recuperado)
	Poliglicoles	5-100	
	Éteres de poliglicol	5-25	
	Aceite de pino	15-100	
Modificador de pH	Cal viva o apagada	200-2400	Provee un elevado pH (>11) para la depresión de sulfuros de hierro
	Carbonato de sodio	500-2500	Provee niveles de pH entre 8 y 9
	Ácido sulfúrico	250-2500	Proveer soluciones ácidas (pH<6)

Fusión

En esta operación ocurren las primeras transformaciones químicas en el material, la estructura mineral del concentrado se rompe por efecto de la oxidación de los sulfuros a alta temperatura. Se genera una mata de cobre de ley variable entre 45 y 75[%] de cobre (56-94[%] Cu_2S equivalente), correspondiente a una fase fundida enriquecida en sulfuros compuesta principalmente por calcosina (Cu_2S) y sulfuro de hierro (FeS), y otra fase líquida inmiscible compuesta por óxidos (principalmente de hierro) y sílice, llamada escoria. El propósito es la remoción parcial de hierro necesaria para una efectiva producción de cobre final, la operación ocurre a una temperatura aproximada de 1250[°C] (Schlesinger M. et al., 2011).

Se requiere combustible a partir de hidrocarburos para asegurar la temperatura de la mata y escoria, algunos hornos de fusión operan de forma autógena debido a las reacciones exotérmicas que ocurren (Caffery et al., 2000). La oxidación de sulfuros genera dióxido de azufre, que es captado para la posterior producción de ácido sulfúrico.

En los últimos años, comparando una encuesta realizada en el 2019 con una previa encuesta realizada en el 2003, ha aumentado la proporción de la producción generada por tecnologías de fusión en baño, que consisten en la alimentación de concentrado en el reactor, donde se sumerge y reacciona en un baño turbulento de mata. Dentro de estas tecnologías están el proceso de fusión continua desarrollado por Mitsubishi, Reactor Noranda (NR) y Convertidor Teniente (CT), el proceso Suikoushan u horno de fusión por soplado inferior (SKS-BBS), horno con lanza de soplado superior Isasmelt y Ausmelt (TSL), y horno Vanyukov.

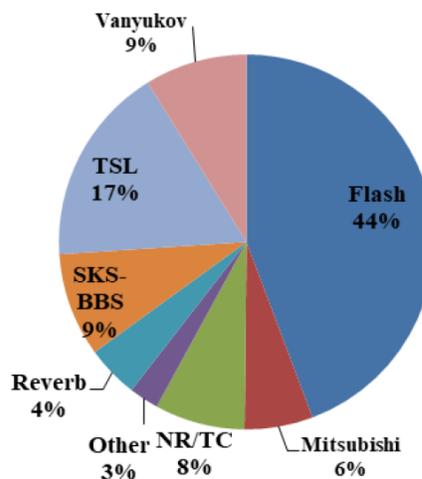


Figura 6. Producción total anual de cobre por tecnología primaria de fusión (Watt y Kapusta, 2019).

Al analizar las tecnologías de fusión de cobre en función de la producción anual, la tecnología dominante continúa siendo la de fusión Flash Outotec como se muestra en la Figura 6 (Watt y Kapusta, 2019). El cambio desde la combustión con aire precalentado para el quemador de concentrado a más del 60[%] de enriquecimiento de oxígeno y tamaños de horno más grandes han sido los cambios clave que permitieron que la capacidad de fusión en hornos Flash Outotec aumentara a través de los años (Gonzales, 2019).

Conversión

Los convertidores procesan la mata de cobre obtenida desde fusión mediante el soplado de aire, que puede estar enriquecido en oxígeno, por tuberías sumergidas para oxidar el sulfuro de hierro y llevar el sulfuro de cobre a cobre metálico. Se emplea sílice como fundente, los gases de proceso con alto contenido de dióxido de azufre son evacuados para fusionarse con otras corrientes gaseosas y se emplean para la obtención de ácido sulfúrico.

El equipo más común es el convertidor Pierce-Smith (P-S), su uso generalizado en muchos países demuestra su excelente desempeño en la industria mundial del cobre (Moskalyk y Alfantazi, 2003). Los convertidores P-S son responsables de la gran mayoría de la producción total de cobre en el mundo con un 76[%] como se muestra en la Figura 7 (Watt y Kapusta, 2019).

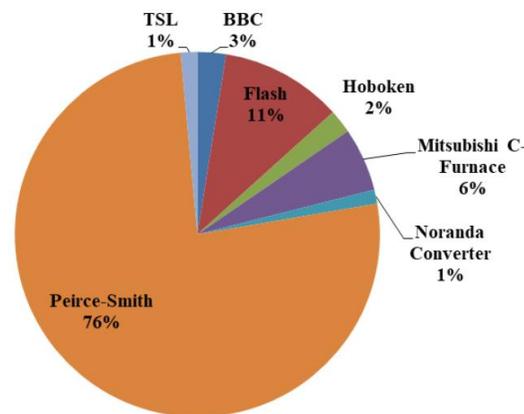


Figura 7. Producción total anual de cobre por tecnología de conversión (Watt y Kapusta, 2019).

Refino a fuego

Muchos productores de cobre emplean hornos de reverbero u hornos rotatorios para el procesamiento de cobre blíster para producir cobre de calidad apta para el moldeo de ánodos. Estos hornos funden los ánodos gastados de la nave de electro refinación (*scrap*) como carga adicional al cobre blíster que puede ser recibido como lingotes fríos o metal fundido desde la fundidora. Este proceso consiste en dos etapas, primero la oxidación mediante la inyección de aire para reducir los niveles de azufre y otras impurezas. Se puede formar una escoria que contiene formas de óxido de cobre y también otras impurezas oxidadas. La desoxidación es la segunda etapa, requiere reductores como por ejemplo el propano, que sean inyectados en el cobre fundido. Otros han utilizado gas natural y aire a través de tuberías para producir una gran proporción de reductores como el monóxido de carbono e hidrógeno (Moskalyk y Alfantazi, 2003).

Electro refinación

En este proceso ocurre una disolución electroquímica de cobre desde el ánodo obtenido en la etapa anterior en un medio acuoso dado por un electrolito que contiene sulfato de cobre y ácido sulfúrico, luego el cobre disuelto es depositado en el cátodo, obteniendo la pureza requerida. Además, se producen barras anódicas como subproducto de alto contenido en metales preciosos. Corresponde a la etapa final de la ruta de procesamiento pirometalúrgica donde se obtiene el cátodo de cobre de alta pureza.

2.4.2. Ruta Hidrometalúrgica

Esta ruta de procesamiento consiste en la disolución del mineral mediante ácido sulfúrico, lo que genera una solución conocida como *pregnant leach solution* (PLS), que contiene el cobre disuelto como ion cúprico. Esta solución pasa a una etapa de purificación (SX), donde se aumenta la concentración de cobre en la solución, para finalmente recuperar el cobre contenido en la etapa de electro obtención (EW). El método de lixiviación a emplear depende de la mineralogía en la que se encuentra el cobre, su ley y el tamaño de partícula (Schlesinger et al., 2011) como se muestra en la Figura 8.

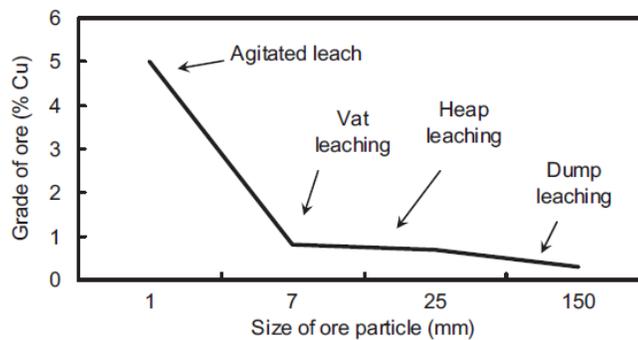


Figura 8. Relación entre ley de cobre y tamaño de partícula del mineral para diferentes métodos de lixiviación (Schlesinger et al., 2011).

El ácido empleado es recirculado a través de las distintas etapas desde las soluciones disminuidas en su concentración de cobre que se obtienen junto con las soluciones concentradas (Figura 9).

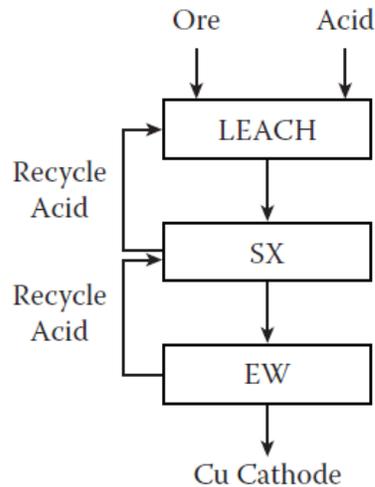


Figura 9. Diagrama de flujo simplificado para el proceso hidrometalúrgico (Sole, 2008).

El método más simple de lixiviación consiste en la ubicación de mineral proveniente de la mina o *Run of Mine* (ROM) en grandes vertederos que pueden llegar a 200[m] de alto, utilizando refinado acidificado como lixivante. La recuperación de cobre puede variar de 30 a 75[%] (Schlesinger et al., 2011).

Aglomeración y Lixiviación

Comúnmente, la aglomeración del mineral se considera un método de tratamiento previo a la formación de las pilas y es ampliamente utilizado para promover la lixiviación en pilas (Velarde, 2005 y Wang et al., 2020). Es típicamente aplicado en tambores aglomeradores con bajas adiciones de ácido sulfúrico (15-25[kg]) por tonelada de mineral y entre 60 y 100[kg] de agua (Dhawan et al., 2012). Adicionalmente, se suele aplicar una etapa de curado ácido previamente a la lixiviación empleando ácido concentrado, la aglomeración permite juntar las partículas finas en partículas más grandes para aumentar la permeabilidad de la pila, mientras que el curado ácido inhibe la disolución de algunos silicatos y acelera la extracción de cobre (Lu et al., 2016).

La lixiviación en pilas es el método más empleado para la obtención de cobre mediante procesos hidrometalúrgicos. El mineral es generalmente aglomerado y luego transportado para formar pilas de aproximadamente 7[m], con una superficie de 0.01 a 1[km²]. Para el manejo de la concentración de cobre en el PLS se emplea en ocasiones la recirculación de PLS o soluciones intermedias (ILS) (Schlesinger et al., 2011).

Extracción por solvente

La purificación del PLS se lleva a cabo a través de la extracción por solvente (SX). Una tendencia común en el diseño de una planta de tratamiento de soluciones de lixiviación es un circuito simple de dos extracciones y un barrido (*stripping*), también conocido como circuito en serie (2E+1S). Existen otros tipos de circuitos como en paralelo o una combinación de ambos circuitos mencionados (Nisbett et al., 2009). Para la extracción del cobre se emplea una fase orgánica conformada por un extractante y un diluyente. Los extractantes específicos utilizados para extraer el cobre desde soluciones ácidas sulfatadas son conocidos como hidroxioximas, sus estructuras básicas están compuestas generalmente por aldioximas, cetoximas o una mezcla de ambas. La viscosidad de la mayoría de los extractantes es muy alta, por lo que son disueltos en diluyentes que comúnmente provienen de subproductos de la industria del petróleo (Sole, 2008). Una regla utilizada en la industria es que por cada extracción de cobre de 1[g/L] requerida, la concentración de extractante requerida sería de aproximadamente 4[%] en volumen. Por lo tanto, para un PLS de 4[g/L] de cobre se requiere una concentración de extractante del 16[%] (Schlesinger et al., 2011).

Electro obtención

El electrolito enriquecido en cobre proveniente de SX pasa a celdas donde mediante la aplicación de corriente se electro deposita el cobre contenido en la solución en el cátodo. Los cátodos usualmente son placas de acero inoxidable, mientras que los ánodos están compuestos por una aleación de plomo (Schlesinger et al., 2011). Se ha demostrado que el cobalto en el electrolito o recubriendo la superficie del ánodo beneficia el proceso mediante la reducción en la tasa de corrosión de los ánodos, baja de sobrepotenciales para la evolución de oxígeno y reducción de la contaminación de plomo en los cátodos de cobre (Nikoloski y Nicol, 2008).

También se emplean otros agentes que promueven una deposición de cobre más homogénea sobre los cátodos y minimizan el atrapamiento físico del electrolito y sus impurezas. Actualmente se utiliza goma guar, polisacáridos y poliacrilamidas generalmente, porque son compatibles con la sensibilidad del orgánico empleado en SX. Otro agente es el ion cloruro, que actúa como refinador de grano, promueve la deposición de granos finos de baja impureza en el cátodo. (Sole et al., 2018).

2.5. Construcción de *benchmarking*

En el intento por diferentes autores, de evaluar el nivel de sostenibilidad de los procesos involucrados en el procesamiento y metalurgia extractiva del cobre, una práctica común es realizar una recopilación de datos que sean útiles para el cálculo de los indicadores cuantitativos que se desea utilizar para la evaluación, es decir, un *benchmarking* de los principales parámetros usados en cada operación en la industria. Estos parámetros involucran los materiales empleados, condiciones de operación, desechos y emisiones generadas, entre otros.

Como se menciona anteriormente, el método LCA es el más empleado en la evaluación de impactos ambientales, este método consta de 4 fases principales explicadas en la Norma ISO 14040 correspondiente al año 2006:

- i. Definición de objetivo y alcance: el alcance de un LCA, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto para el estudio. La profundidad y amplitud de un LCA varían considerablemente dependiendo del objetivo.
- ii. Análisis de inventario (LCI): es un inventario de datos de entrada y salida con relación al sistema en estudio. Incluye la recopilación de los datos necesarios para cumplir el objetivo definidos para el estudio.
- iii. Evaluación del impacto ambiental: el objetivo de esta etapa es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del LCI de un sistema para comprender mejor su impacto ambiental.
- iv. Interpretación de resultados: se resumen y discuten los resultados del LCI y de la etapa de evaluación de impacto ambiental como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones acorde con el objetivo y alcance definidos (ISO, 2006).

Acorde al estudio realizado por Fuentes et al. (2021), de los 129 indicadores estudiados se observa que la mayoría de ellos que emplea conjuntos de datos, es decir, datos obtenidos desde recopilaciones de datos de acceso comercial o libre, están mayoritariamente asociados a la aplicación de un método LCA en la evaluación. Esto se debe a que este método requiere de una gran cantidad de datos para generar el inventario de entrada. En el estudio de indicadores mencionado, se mencionan otras fuentes de datos empleadas como los reportes de compañías u organizaciones, datos publicados en artículos científicos y resultados de simulaciones, algunos indicadores emplean más de una fuente de datos. Los datos recopilados de estas fuentes conforman el *benchmarking* de datos aplicados en el LCI.

Existen diferentes tipos de LCA, estos varían según el alcance empleado considerando en algunos casos el uso del producto final y posterior reutilización o incluyendo los impactos de la disposición de desechos en suelos. Andraos (2018), además de proporcionar una variedad de parámetros útiles para una gran variedad de materiales, entrega un diccionario de 260 términos generalmente utilizados en la literatura de química verde. Entre ellos se detalla el tipo de LCA llamado *gate-to-gate*, que corresponde a una evaluación que se guía a partir de un conjunto de materiales aplicados en una etapa avanzada de la cadena de valor del producto hasta el producto final deseado. Este tipo es el mínimo LCA que examina un proceso desde la etapa A a la etapa B, siendo este rango un subconjunto de una cadena de producción mayor.

Todo lo anterior implica que es de gran relevancia la definición del objetivo y alcance del estudio, el *benchmarking* de los datos empleados para la obtención del inventario y una evaluación que se mantenga constantemente dentro del rango de estudio considerado.

3. Metodología

Se emplea una metodología basada en el método LCA para evaluar aspectos e impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de la producción de cobre, particularmente el tipo de LCA *gate-to-gate* ya que es más flexible y permite definir las operaciones de inicio y fin de cada ruta de procesamiento. El objetivo es la producción de una tonelada de cobre fino a través de las rutas pirometalúrgica e hidrometalúrgica del cobre con las operaciones unitarias detalladas en la Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente, las operaciones consideradas abarcan el proceso productivo del cobre en las etapas posteriores a la extracción del mineral desde el yacimiento hasta la producción del cátodo de cobre. Los impactos ambientales de los desechos generados son considerados con relación a la masa de desecho en particular y no considera potenciales efectos adicionales que su disposición pueda generar. El inventario de materiales de entrada y salida en cada operación se obtiene realizando un *benchmarking* de los conjuntos de datos operacionales (de libre acceso) relevantes de cada operación junto con valores obtenidos de la literatura. Se emplean balances de masa para establecer la masa de los materiales de entrada y salida. Para evaluar los impactos ambientales y obtener un indicador cuantitativo del nivel de sostenibilidad, se emplea el *software* DOZN 2.0, lo que permite obtener, además del puntaje global, los puntajes por categorías y por cada principio de la química verde (excluyendo los principios 8 y 9). Para complementar la información de estos índices, se calcula el QWP, la huella de consumo de agua y la intensidad de energía (IE) (Tabla 3). Cabe destacar que en los balances de masa solo se consideran materiales sólidos en el producto y en los desechos, de manera que el agua solo se considera en el ingreso de materia prima.

3.1. Cálculos de *benchmarking*

En los procesos incluidos en el tratamiento de sulfuros de cobre, algunos de los materiales requeridos como el oxígeno y otras recirculaciones se obtienen mediante razones másicas calculadas desde el *benchmarking*. El requerimiento de oxígeno en fusión por tonelada de concentrado procesado se obtiene mediante la Ecuación 13.

Ecuación 13. Razón másica de oxígeno por tonelada de concentrado.

$$\text{Razón } O_2 \left[\frac{kg}{t \text{ conc}} \right] = \frac{\text{Flujo Blast} [Nkm^3/h] * 1000 * 24 * (\text{Volumen } O_2 [\%] / 100) * \rho_{O_2} [kg/m^3]}{\text{Flujo concentrado} [t/d]}$$

Donde la densidad empleada para el oxígeno (ρ_{O_2}) corresponde a 1.354[kg/m³]. Los polvos recirculados de fusión y conversión se obtienen mediante el cociente entre sus valores respectivos y el flujo de concentrado procesado. La razón de carbón fino ingresado por tonelada de concentrado se obtiene de igual forma considerando las operaciones que lo emplean en el *benchmarking*. Para la etapa de conversión primero se calcula el flujo de mata en cada operación mediante la división entre el flujo de mata por ciclo y la duración del ciclo correspondiente. El requerimiento de oxígeno en esta etapa se obtiene de manera análoga a la etapa de fusión, pero empleando el flujo de mata calculado junto con el flujo de gas y porcentaje de oxígeno asociado al soplado de escoria, los flujos y porcentajes asociados al soplado a cobre son similares por lo tanto el resultado se aplica para toda la etapa de conversión. Las razones de *scrap* ingresado en conversión y refino a fuego son obtenidas dividiendo el *scrap* agregado por ciclo en el flujo de mata y cobre anódico respectivamente.

Por otra parte, el procesamiento de óxidos de cobre, la etapa de lixiviación incluye el uso de la razón de lixiviación (RL) y *makeup* de agua. El primer parámetro se obtiene de la Ecuación 14.

Ecuación 14. Razón de lixiviación.

$$RL[m^3/t Mx] = \frac{TR[L/hm^2] * t[d] * 24}{\rho_{ap}[t/m^3] * h[m] * 1000}$$

Donde la densidad aparente considerada para el mineral (ρ_{ap}) es de 1.7[t/m³]. La tasa de riego (TR), tiempo de lixiviación (t) y altura de pila (h) corresponden al valor de cada operación. La razón de *makeup* de agua se obtiene del cociente entre el *makeup* de agua y el flujo de mineral destinado a lixiviación para cada operación. Finalmente, en la etapa de SX se calcula la razón entre el orgánico y el acuoso empleado en cada operación correspondiente.

3.2. Análisis de inventario

Los datos empleados para calcular los materiales de entrada y salida en cada operación unitaria juntos con los métodos de cálculo de algunos flujos considerados se presentan en esta sección para cada ruta de procesamiento.

3.2.1. Benchmarking y balances de masa sulfuros

Para realizar los balances de masa correspondientes al tratamiento de sulfuros de cobre se emplean los datos mencionados en la Tabla 5. El *benchmarking* de estos datos se realiza considerando tecnologías de horno Flash Outokumpu en fusión, convertidor Pierce Smith en conversión y horno rotatorio para el refinado a fuego. Se asume una composición para el concentrado generado en flotación de un 80[%] de calcopirita, 15[%] de pirita y 5[%] de sílice. De esta forma se simplifica el cálculo de la masa de concentrado y permite calcular las composiciones de la mata y escoria en fusión. La Tabla 5 presenta los parámetros operacionales a considerar en el *benchmarking* de esta ruta de procesamiento.

Tabla 5. Datos que componen el benchmarking en cada operación de la ruta pirometalúrgica.

Operación unitaria	Parámetros
Flotación	Recuperación [%]; C_p pulpa [%]; Ley Mx [%]; Colector [g/t Mx]; Espumante [g/t Mx]; Cal [g/t Mx]
Fusión	Concentrado [t/d]; Ley de mata [%]; Razón SiO ₂ /Fe en la escoria [-]; Enriquecimiento de O ₂ en aire [%];
Conversión	Razón SiO ₂ /Fe en la escoria [-]; Enriquecimiento de O ₂ en aire [%]
Refino a fuego	Cu en ánodo [%]
ER	Eficiencia de corriente [%]; Número de cátodos [-]; Área catódica [m ²]; Densidad de corriente [A/m ²]; [Cu ²⁺] en electrolito [g/L]; Flujo electrolito [m ³ /h]; Temperatura del electrolito [°C]; Producción barras anódicas [kg/t ánodo]; Cola [g/t Cu]; Thiourea [g/t Cu]; Avitone [g/t Cu]; NaCl o HCl [g/t Cu]

Flotación

En cada operación unitaria se considera la producción de una tonelada de cobre fino, con este antecedente y los valores de recuperación en flotación y la ley del mineral, se calcula la masa de mineral procesado según la Ecuación 15.

Ecuación 15. Masa de mineral empleada en ruta pirometalúrgica.

$$Mineral[t] = \frac{Finos\ Cu[t]}{Recuperación[\%] * Ley\ Mx[\%]}$$

Con la masa de mineral, considerando el porcentaje de sólidos en la pulpa mineral que ingresa y la dosificación de reactivos obtenida en el *benchmarking*, se calcula el agua contenida en la pulpa y la masa de reactivos empleados. La masa de concentrado se obtiene empleando la composición de calcopirita (Cpy) en el concentrado y la ley de cobre que tiene este mineral según la Ecuación 16.

Ecuación 16. Masa de concentrado empleada en ruta pirometalúrgica.

$$\text{Concentrado}[t] = \frac{\text{Finos Cu}[t]}{\text{Cpy en conc}[\%] * \text{Cu en Cpy}[\%]}$$

El relave generado (seco) se obtiene de la diferencia entre el mineral ingresado y el concentrado producido. El tiempo de reacción se aproxima mediante la razón entre la masa de mineral procesado calculada y el flujo de mineral procesado promedio que se obtiene del *benchmarking*.

Fusión

En la etapa de fusión y las siguientes que ocurren a alta temperatura (conversión y refinado a fuego) se toma como supuesto que todo el cobre contenido en la alimentación pasa al producto, es decir, no hay pérdidas de cobre en la escoria, que es del tipo fayalítica formada solo por óxido de hierro y sílice ($FeO * SiO_2$), que ingresa como fundente. Para la oxidación de los sulfuros se ingresa aire enriquecido en oxígeno (compuesto solo por O_2 y N_2). Estos supuestos se toman con el propósito de facilitar el balance de masa por elementos. Además, se considera la recirculación de polvos de fusión y conversión junto con el ingreso de carbón fino.

En fusión se asume que la mata generada está compuesta solo por Cu_2S y FeS con una ley de cobre definida. Con estos supuestos, la masa de mata producida se obtiene de la división entre 1 tonelada de cobre fino y la ley de la mata. Como todo el contenido de cobre se encuentra en Cu_2S , se calcula la composición de la mata para Cu_2S y FeS . Considerando la composición y masa del concentrado calculada anteriormente, se realiza el balance de masa para el hierro, obteniendo la masa de su óxido respectivo en la escoria, luego empleando la razón entre sílice y hierro se obtiene la masa de sílice en la escoria (obteniendo la masa total de escoria).

Bajo el supuesto de que la sílice ingresada no reacciona en el proceso, se determina que la masa de sílice calculada en la escoria es igual a la suma de la que ingresa como fundente y la sílice contenida en el concentrado. Se emplea la razón de oxígeno por tonelada de concentrado obtenida del *benchmarking* para calcular la cantidad de oxígeno requerida y mediante el enriquecimiento de oxígeno en el aire se determina la masa de nitrógeno que ingresa.

La masa de polvos metalúrgicos recirculados (provenientes de fusión y conversión) se obtiene de la multiplicación entre la razón másica respectiva y la masa de concentrado calculada, de igual forma se obtiene la masa de carbón fino. El tiempo de reacción se obtiene del cociente entre la masa de concentrado calculada y el flujo de concentrado promedio obtenido del *benchmarking*. La reacción se produce a una temperatura de 1250[°C] como se señala en la literatura (Schlesinger et al., 2011).

Conversión

Para conversión la masa de cobre blíster generada se determina considerando un contenido de cobre en el blíster de 98.5[%] (Schlesinger et al., 2011) y una tonelada de cobre fino a producir. Se mantiene la composición y masa de la mata calculada anteriormente y se considera que todo el hierro contenido pasa a la escoria. Entonces la masa y composición de la escoria se obtiene de forma análoga a la etapa de fusión, al igual que la masa de oxígeno y nitrógeno que ingresa en el gas de reacción. En esta etapa ingresa *scrap* como material recirculado, se obtiene de la multiplicación entra la razón másica correspondiente y la masa de mata a procesar. El tiempo de reacción también se determina de igual forma que en fusión, aplicando la razón entre la masa de mata y el flujo de mata promedio obtenido del *benchmarking*. Se considera una temperatura de 1200[°C] (Schlesinger et al., 2011).

Refino a fuego

La masa de cobre *blíster* es la misma que la calculada en la etapa anterior y la masa de cobre anódico producida se obtiene empleando la ley de cobre en el ánodo y considerando una tonelada de cobre fino. Se emplea aire para oxidar el azufre, por lo que el porcentaje de oxígeno corresponde al que generalmente tiene el aire en condiciones normales, es decir, un 20.9[%]. El tiempo de reacción se obtiene aplicando una proporcionalidad directa con datos proporcionados de la literatura, Schlesinger et al. (2011) plantea que para refinar 250 toneladas de cobre *blíster* se requiere de aproximadamente una hora de inyección de aire y dos horas de inyección de hidrocarburos, considerando la masa de cobre blíster calculada y la referencia anterior, se calcula el tiempo de oxidación y reducción. Con el flujo de aire de 60[Nm³/min] (Schlesinger et al., 2011), tiempo de oxidación y el volumen de oxígeno en el aire, es posible calcular la masa de oxígeno que ingresa.

La masa de hidrocarburo (metano) se calcula considerando que la remoción de oxígeno típicamente requiere 5[kg] de hidrocarburo gaseoso o líquido por tonelada de cobre (Schlesinger et al., 2011).

Al igual que en la etapa de conversión, se considera la recirculación de *scrap* obtenida de la multiplicación entre la razón másica respectiva y la masa de ánodo producida. La temperatura de reacción para este proceso es de 1200 [°C].

Electro refinación

En ER se aplica la ecuación de Faraday para calcular el tiempo requerido para depositar una tonelada de cobre, la masa de aditivos considerada se obtiene de forma directa para la misma tonelada. Los datos requeridos corresponden a valores empleados en esta ecuación. El tiempo calculado permite obtener el volumen de electrolito requerido al multiplicarlo por el flujo respectivo.

Ecuación 17. Tiempo requerido en ER para producir una tonelada de cobre.

$$t[d] = \frac{m[g] * n[mol \text{ de carga}] * F[C/mol \text{ de carga}]}{i[A/m^2] * A_c[m^2] * N * 2 * EC[\%] * PA[g/mol]} * \frac{1}{24 * 3600}$$

donde, el número de carga (n) corresponde a dos moles de carga, la constante de Faraday (F) es 96485[C/mol de carga] y el peso molecular (PA) es de 63.546[g/mol]. Se toma el supuesto base de una tonelada de masa de cátodo depositada (m) y se considera un área catódica (A_c) de 1[m²] (Schlesinger et al., 2011). Los valores para los parámetros de intensidad de corriente (i), número de cátodos (N) y eficiencia de corriente (EC) se obtienen del *benchmarking*. Además, se considera el cobre y ácido sulfúrico contenido en el electrolito, cuya masa se obtiene considerando un flujo de electrolito de 1.2[m³/h] (Schlesinger et al., 2011), el tiempo y la concentración de estos materiales en el electrolito. La masa restante del electrolito corresponde a agua.

3.2.2. *Benchmarking* y balances de masa óxidos

Para realizar los balances de masa correspondientes al tratamiento de óxidos de cobre se emplean los datos mencionados en la Tabla 6. El *benchmarking* de estos datos se realiza considerando una lixiviación en pilas (dinámicas o permanentes) de un mineral previamente aglomerado en tambores rotatorios. El proceso de purificación del PLS es de extracción por solvente (SX), el electrolito rico es tratado en celdas de electro obtención (EW). Se considera que la densidad de los flujos pasantes en cada etapa es semejante a la del agua (997[kg/m³]), esto es asociado a los flujos de PLS, refinado recirculado (RF), electrolito avanzado (EA), electrolito gastado (ES) y electrolito ingresado a EW. Se considera ácido sulfúrico (A) en las etapas de aglomeración y lixiviación.

Tabla 6. Datos que componen el benchmarking en cada operación de la ruta hidrometalúrgica.

Operación unitaria	Parámetros
Aglomeración	Consumo de ácido [kg/t Mx]; Humedad [%]
Lixiviación	Ley Mx [%]; Recuperación [%]; Consumo de ácido [kg/t Mx]; [Cu ²⁺] en PLS [g/L]; [Cu ²⁺] en RF [g/L]; [A] en RF [g/L]; Flujo Mx [t/h]
SX	Flujo PLS [m ³ /h]; Razón O/A [-]; [Cu ²⁺] en ES [g/L]; [Cu ²⁺] en EA [g/L]; Eficiencia extracción [%]
EW	Eficiencia de corriente [%]; Número de cátodos [-]; Área catódica [m ²]; Densidad de corriente [A/m ²]; Flujo electrolito [m ³ /h]; [Cu ²⁺] en electrolito [g/L]; Goma guar [g/t Cu]; Cobalto [g/t Cu];

Aglomeración y lixiviación

La masa de mineral a ser aglomerado se obtiene de forma análoga al mineral ingresado a flotación, considerando la recuperación y ley de mineral correspondientes. El ácido sulfúrico agregado se obtiene de la multiplicación entre el consumo definido y la masa de mineral calculado. Considerando la humedad de aglomeración se calcula el agua requerida.

En la etapa de lixiviación, el producto corresponde a una tonelada de cobre fino que está contenido en el PLS. La masa de refino recirculado se obtiene multiplicando la razón de lixiviación (Ecuación 13) con la masa de mineral a lixiviar, que corresponde a la masa calculada anteriormente. La masa de cobre y ácido en la solución de refino se obtiene empleando sus respectivas concentraciones. Se agrega ácido adicional por concepto de consumo, calculado de forma análoga a la etapa de aglomeración. Debido a que la proporción de masa que se disuelve en el PLS con relación a la masa de mineral inicial en la pila es muy baja, se considera que la masa de ripios generada como desecho es igual a la masa de mineral a lixiviar. El tiempo se aproxima desde la razón entre la masa de mineral calculada y el flujo de mineral a lixiviar obtenido del *benchmarking*.

Extracción por solvente

En esta operación se calcula inicialmente la tasa de extracción de cobre y flujo de electrolito en la etapa de *stripping*. Estos cálculos se realizan considerando que la tasa de extracción debe ser igual a la tasa de electrodeposición de cobre en EW (Schlesinger M. et al., 2011). Con los datos mencionados en la Tabla 6, se calcula la tasa de extracción de cobre según la Ecuación 18, empleando un flujo de PLS de 1000[m³/h] (Schlesinger M. et al., 2011), y el flujo de electrolito según la Ecuación 19.

Ecuación 18. Tasa de extracción de cobre en SX.

$$Tasa\ de\ extracción[kg/h] = Flujo\ PLS[m^3/h] * (Cu^{2+}\ en\ PLS[g/L] - Cu^{2+}\ en\ RF[g/L])$$

Ecuación 19. Flujo de electrolito en SX.

$$Flujo\ Electrolito[m^3/h] = \frac{Tasa\ de\ electrodeposición[kg/h]}{(Cu^{2+}\ en\ EA[g/L] - Cu^{2+}\ en\ ES[g/L])}$$

El tiempo de extracción se calcula mediante el cociente entre el volumen de EA y el flujo de electrolito calculado mediante la Ecuación 19, el volumen de EA se calcula considerando el contenido de una tonelada de cobre fino a la concentración obtenida del *benchmarking*. El tiempo obtenido se emplea para el cálculo de la masa de PLS, EA y ES multiplicando los flujos respectivos por el tiempo. De igual forma, aplicando las concentraciones de cobre respectivas en cada flujo de esta etapa se obtiene la masa de cobre fino. La concentración de extractante en el orgánico es obtenida mediante la regla de asignar un 4[%] en volumen de extractante por cada 1[g/L] presente en el PLS (Schlesinger M. et al., 2011). Se calcula el volumen de orgánico necesario multiplicando el flujo de PLS por una razón O/A de 1 (Schlesinger M. et al., 2011) y el tiempo de extracción de una tonelada de cobre. Luego con el volumen de orgánico, las proporciones de extractante y diluyente establecidas, y densidades de 850 y 800[kg/m³], respectivamente, se obtiene la masa de extractante y diluyente requeridas.

Electro obtención

El tiempo necesario para producir una tonelada de cobre se obtiene de forma análoga al proceso de ER aplicando la ecuación de Faraday con los valores correspondientes al *benchmarking* de esta operación. Se consideran los mismos valores para el número de carga, constante de Faraday, peso molecular del cobre y área catódica. El volumen de electrolito requerido se calcula mediante el producto entre un flujo de 15[m³/h] (Schlesinger M. et al., 2011) y el tiempo calculado. Finalmente, el cobre contenido en el electrolito se obtiene aplicando la concentración de este metal en la solución, se considera un electrolito compuesto solo por cobre y agua.

3.3. Evaluación DOZN

Con el inventario de datos generado en la etapa anterior, se ingresan los resultados para la masa de producto, insumos empleados y desechos en cada operación unitaria en el *software* DOZN 2.0. Los valores por ingresar en el *software* junto con los resultados que entrega se encuentran divididos en diferentes secciones como muestra la Figura 10.

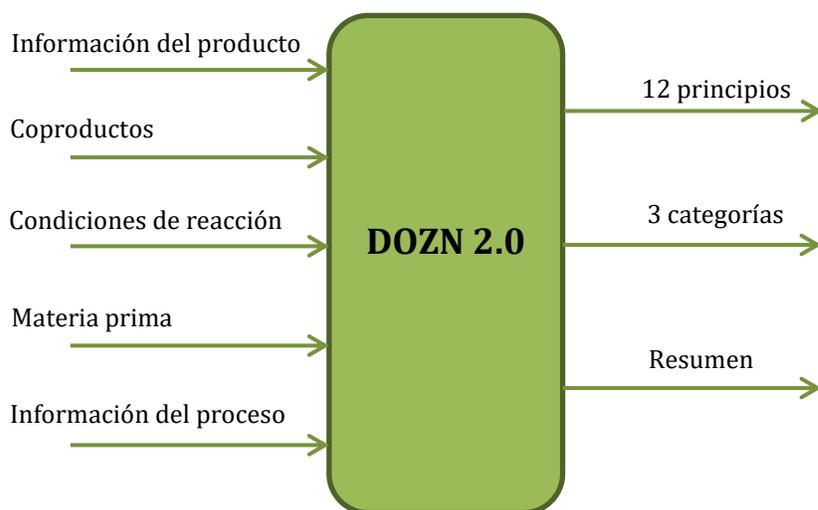


Figura 10. Datos requeridos y resultados entregados por DOZN 2.0.

Para el producto generado junto con cada materia prima empleada en su producción, se requiere ingresar el número de producto y marca respectiva. Esta información se obtiene de la hoja de seguridad del material si se encuentra disponible o buscando un material similar en la base de datos de Sigma Aldrich. Además, se debe ingresar el valor del factor B en cada material, este factor se correlaciona con la categoría de SGA asociada al material para toxicidad acuática aguda o crónica según la Tabla 22. La información requerida para localizar la categoría de SGA se obtiene de la sección 2.1 o 12 de la hoja de seguridad, se debe revisar la sección 10.6 previamente para identificar si existen productos de degradación peligrosos, en cuyo caso se debe obtener el factor B para cada producto de degradación, siendo el valor más alto el valor a ingresar en el *software* para el material.

La Figura 10 presenta los datos que se requiere ingresar al *software*, estos son:

- Información del producto: corresponde al material que se pretende generar en la reacción. En la aplicación a las rutas de procesamiento definidas los productos respectivos de cada operación unitaria no consideran un número de producto ni marca asociada ya que estos productos son de carácter específico en la industria y no se asocian a un material químico identificable en Sigma Aldrich, la única excepción es el cátodo de cobre, que se asocia a cobre metálico y por lo tanto posee un número de producto y marca.
- Coproductos: corresponden a productos secundarios en una reacción que son mantenidos para venta o producción posterior. En la evaluación sólo se consideran los barros anódicos, en la ruta pirometalúrgica, como coproducto del proceso ER.

- Condiciones de reacción: se considera una reacción como tal cuando las condiciones de presión y temperatura se desvían de las condiciones normales por una cierta cantidad de tiempo. Para sulfuros de cobre se considera que existe un cambio químico desde la fusión del concentrado, procesos previos corresponden a concentración mineral. En óxidos de cobre se consideran las reacciones en las operaciones de SX y EW, dado que la disolución de cobre en lixiviación no presenta desviaciones de temperatura. A pesar de lo anterior, se estiman tiempo para flotación y lixiviación, sin embargo, estos no influyen el valor del principio 6. En ninguna de las dos rutas de procesamiento se consideran desviaciones de presión.
- Materia prima: se ingresan por separado todos los insumos requeridos para el proceso detallando si es un reactivo o se considera un material auxiliar (soluciones de lavado, solventes no reactivos, etc), los reactivos se consideran como tal cuando participan directamente en la reacción que genera el producto de la etapa respectiva. Se ingresan características que permiten evaluar algunos principios de la química verde como señalar si corresponde a un desecho, si es un material renovable o si corresponde a un solvente (sólo se consideran solventes orgánicos en este apartado). Todos los desechos considerados se asignan con un factor de gravedad de 2, el único solvente aplicado es el keroseno en SX y ningún material ingresado es considerado como renovable. Cada material debe acompañarse del número de producto y marca respectiva, se excluyen materiales característicos de la industria del cobre (mineral, cobre en soluciones, etc).
- Información del proceso: se identifica el número etapas de síntesis en el proceso, el número de ellas que incluyen el uso de un catalizador y el número de etapas que son monitoreadas (para las que son controladas). Se requiere ingresar el tipo de control empleado (analógico o digital). En el uso del *software* se considera un catalizador cuando este acelera la tasa de la reacción, no se consume y generalmente no se encuentra en una relación estequiométrica, para los procesos evaluados no se considera el uso de catalizadores. Además, en la evaluación de las rutas de procesamiento se considera sólo una etapa por cada operación unitaria a excepción de SX, conversión y refinado a fuego, que tienen un valor de 2 (extracción y *stripping* en SX, soplado a escoria y metal en conversión, remoción de azufre y oxígeno en refinado a fuego). Sólo se considera control en los procesos de fusión y conversión para sus 2 etapas correspondientes.

Con la información proporcionada, DOZN 2.0 evalúa el rendimiento químico verde entregando una puntuación para cada uno de los 12 principios, para las 3 categorías que agrupan distintos principios y una puntuación global que resume el rendimiento del proceso evaluado. Las puntuaciones van de 0 a 100 siendo 0 el valor más deseable, es decir, el que presenta un mejor rendimiento químico verde, y 100 el valor que representa el proceso con menor rendimiento.

Las categorías corresponden a las mencionadas en la Tabla 1, con la diferencia que la categoría de uso de recursos solo abarca los principios 1, 2, 7 y 11 dado que los principios 8 y 9 son excluidos de la evaluación. Esto se debe al no uso de catalizadores ni derivatización en las operaciones unitarias abarcadas.

El valor de cada principio para cada ruta de procesamiento se obtiene de la suma de los principios respectivos en cada operación unitaria incluida. El valor de cada categoría se obtiene del promedio entre los principios que incluye y el puntaje global se calcula mediante el cociente entre la suma de las categorías y 50 (Kreuder et al., 2017).

4. Resultados

Inicialmente se entregan los resultados del *benchmarking* en cada ruta de procesamiento separados por operación unitaria. Posteriormente se presentan los valores por insumo, producto y desecho generado en cada proceso como resultado del balance de masa realizado para cada ruta de procesamiento considerada. Luego se presenta la evaluación del rendimiento químico verde respectivo, además de un análisis de influencia de las operaciones unitarias en el valor global obtenido en el *software*. Se presentan también, indicadores de sostenibilidad adicionales como el consumo de agua, consumo de energía y emisiones de GEI. Se observan los cambios en la evaluación del nivel de química verde aplicando variaciones a los principales parámetros considerados. En las etapas finales de esta sección se presentan los resultados de la evaluación de una ruta de procesamiento adicional en el *software* DOZN 2.0 y se analizan las variaciones del rendimiento químico verde de las rutas clásicas de procesamiento ante la estandarización de las tasas de producción obtenidas para cada operación unitaria en la evaluación inicial.

4.1. *Benchmarking* y balances de masa

4.1.1. *Benchmarking*

En esta sección se presenta el *benchmarking* realizado para los parámetros definidos en la Tabla 5 y la Tabla 6, además de algunos parámetros adicionales incluidos para mayor comprensión de cada operación unitaria.

Flotación

En esta operación se consideran datos de 6 plantas concentradoras de cobre localizadas en distintos países, la dosificación de reactivos detallada corresponde a la aplicada al circuito *rougher-scavenger* donde ingresa el sobre tamaño de los hidrociclones. Los datos corresponden al año 2010 excepto por Candelaria (2001).

El promedio de ley de cobre en el concentrado es de 27.8[%] en base a los datos que se presentan en la Tabla 7, este valor es igual al valor que se obtiene bajo el supuesto de una composición mineralógica definida en el concentrado, como se menciona en la metodología de este trabajo y recordando el supuesto del contenido de una tonelada de cobre fino en el concentrado. Por otro lado, la diferencia entre la masa de mineral procesado y la masa de concentrado producido al año da cuenta de un proceso que requiere de una gran cantidad de material cuyo producto es generalmente dos órdenes de magnitud menor en masa.

Tabla 7. Datos de flotación industrial provenientes de 6 concentradoras (Schlesinger M. et al., 2011).

Parámetro	Concentradoras					
	Candelaria, Chile	El Soldado, Chile	Los Bronces, Chile	Mantos Blancos Chile, rajo abierto	Cerro Verde, Perú	Ray, EE.UU
Mineral tratado [kt/año]	25000	7700	20500	4500	39000	10000
Concentrado [kt/año]	-	67	676	125	750	150
Ley de mineral [%]	0.9-1.0	0.63	1.10	1.13	0.62	0.45
Ley de concentrado [%]	29-30	22.5	28.4	35.2	25	28
Recuperación [%]	95	-	-	89	88	90
C_p pulpa [%]	-	38	30	42	30	35
Tipo de colector	SF 323	Ditiofosfato (K)	Ditiofosfato y polisulfato	Diisobutil ditiofosfato de sodio	Isopropil xantato de sodio, Tiocarbamato	Xantato
Dosificación colector [kg/t mineral]	-	0.19	0.035	0.042	0.01	0.015
Tipo de espumante	MIBC	Dowfroth 250:MIBC 1:5	Dowfroth 250:Nalfloat 1:5	MB78-MIBC	Molycop H75	Aceite de pino
Dosificación espumante [kg/t mineral]	-	0.033	0.022	0.02	0.02	0.015
Cal [kg/t mineral]	0.7	0.65	0.45	0.808	1.26	0.92

En la Tabla 7 se observa, además, que la masa de reactivos empleados es mucho menor en comparación al mineral procesado, la dosificación de cal es en general al menor un orden de magnitud mayor que el empleado para el colector y el espumante.

Fusión

Los datos recopilados corresponden a 5 Hornos de Fusión Flash Outokumpu cuyas fechas de inicio de operación están situadas entre los años 1971 y 1983. Cabe destacar que cada operación define sus propias recirculaciones dependiendo de la composición del concentrado a tratar, ley de mata requerida, entre otros factores; por lo tanto, existe variación en este aspecto.

En la Tabla 18 se observa que la temperatura de la mata, escoria y gases son similares entre si y cercanas a la temperatura de 1250[°C] tomada como supuesto en la evaluación del rendimiento químico verde de este proceso.

Tabla 8. Detalles de producción de 6 Hornos de Fusión Flash Outotec (Schlesinger et al., 2011).

Parámetro	Hornos de Fusión Flash					
	PASAR Leyte, Filipinas	Arubis Hamburg, Alemania	Pan Pacific Copper Saganoseki, Japón	Hibi Kyodo Smelting Co. Tamano, Japón	Sumitomo Toyo, Japón	Rio Tinto Kennecott Utah Copper Magna, UT, EE.UU
Alimentación						
Concentrado [t/d]	2000	3100	3581	2241	3830	4200
Ley de concentrado [%]	23-29	29	28.4	29.2	28.8	25
Fundente sílice [t/d]	100	350-450	543	220	564	528
Polvos de fusión flash reciclado [t/d]	95-120	230	215	178	262	307
Polvos de conversión reciclados [t/d]	20-30	15	40	20	36	75
Blast						
Volumen O_2 [%]	45-52	50-65	70-80	66-69	77	82-88
Flujo [kNm^3/h]	36	45	27-35	25-29	38	27-34
Producción						
Mata [t/d]	1080	1450	1632	1129	1895	1800
Ley de mata [%]	54-56	63	64.8	63.5	64	66.5-74.5
Escoria [t/d]	800-900	2000	2220	1326	2477	2100-3100
Cu en escoria [%]	0.5-0.75	1.5	-	0.74	1	0.5-4
Razón SiO_2/Fe en Escoria	0.87-1	0.82	0.93	0.85	1	0.64
Flujo gases [Nm^3/h]	36.6	50-68	40-45	27	57	43-60
Volumen SO_2 [%]	28-30	30-45	50-60	50	38	30-40
Polvos [t/d]	48-60	230	215	178	210	-
Temperatura Mata/Escoria/Gases [°C]	1220/1240/ 750	1220/1230/ 1350	1242/1245/ 1250	1222/1254/ 1230	1220/1250/ 1300	1260/1320/ 1370
Combustible HC [kg/h]	0-0.2 [m^3/h] bunker C	-	70 carbón fino	1200 carbón fino	404 petróleo, 147 carbón	-

La encuesta de fundición de cobre del 2019 considera 96 fundiciones de cobre en funcionamiento dentro de 29 países correspondiente al 92[%] y 94[%] de la producción primaria mundial total para el 2018 estimado por el Grupo Internacional de Estudio sobre el Cobre (ICSG) y Wood Mackenzie, respectivamente. En la Tabla 8, la ley de concentrado promedio es de 27.5[%], valor similar al mencionado en la etapa de flotación. El valor de polvos metalúrgicos recirculados es considerablemente menor al concentrado procesado.

Conversión

Se presentan los datos correspondientes a 6 convertidores Pierce-Smith que procesan mata de cobre que proviene generalmente de un Horno Flash Outokumpu (Outotec), en algunos casos también proviene de Hornos Eléctricos de Limpieza de Escorias (HELE), Horno Kaldo o Convertidor Teniente (CT); en este último se evita la etapa de soplado escoria dado que el producto de este equipo, denominado metal blanco, tiene menores contenidos de hierro en comparación a una mata común.

Tabla 9. Detalles de producción de 6 operaciones empleando convertidores P-S (Schlesinger et al., 2011).

Parámetro	Convertidores Peirce-Smith					
	Hibi Kyodo Smelting Co., Tamano, Japón	Sumitomo Toyo, Japón	Pan Pacific Copper Saganoseki, Japón	Aurubis Hamburg, Alemania	Boliden Rönnskär, Suecia	CODELCO Caletones, Chile
Alimentación						
Mata [t/ciclo]	220	227	-	300	350	200
Fuente	Horno Flash Outotec+HELE	Horno Flash Outotec	Horno Flash Outotec+HELE	Horno Flash Outotec+HELE	Flash+HELE+ Horno Kaldo	Teniente+ HELE
Ley de mata	64	64	68	63	55	74.3
Scrap [t/ciclo]	80	62	-	75	90-120	35
Flujo Blast						
Soplado scoria [Nm^3/min]	730	690	650	700	750	No
Soplado cobre [Nm^3/min]	750	690	650	700-800	850	600
Volumen O_2 en blast						
Soplado scoria [%]	27.5	25-26	22.3	23	24	No
Soplado cobre [%]	22.1	21	22.3	23	24	21
Producción						
Blíster [t/ciclo]	200	204	-	260-280	290-310	145
Escoria [t/ciclo]	50	54	-	70	150-160	30
Cu en scoria [%]	8.7	4.8	5.9	4	5	25
Razón SiO_2/Fe	0.47	0.42	0.47	0.55	0.6	-
SO_2 en gases [%]	7-10	10-15	7-10	8-14	5-12	15
Tiempo de ciclo [h]	4.7	12.8	4.83	9.5	8	7-7.5
Tiempo soplado escoria [h]	1.2	0.9	-	2	2	No
Tiempo soplado cobre [h]	3.5	3.4	-	5	4.5	5

En la Tabla 9 se observa que en la mayoría de las plantas incluidas la mata proviene de un Horno Flash, el contenido de oxígeno en el *blast* es considerablemente menor al empleado en la etapa de fusión y es similar para los dos subprocesos en conversión, el soplado a escoria y soplado a cobre. La masa de cobre *blíster* producida por ciclo es cercana a la masa de mata procesada dado el *scrap* (de alta ley) recirculado.

Refino a fuego

La Tabla 10 muestra algunos parámetros relevantes para la operación de 2 Hornos rotatorios que generan cobre anódico, se considera la adición de *scrap* como recirculación de material para recuperación de cobre.

Tabla 10. Detalles de producción de 2 Hornos rotatorios de ánodos (Schlesinger et al., 2011).

Parámetro	Horno rotatorio	
	Norddeutsche Affinerie, Hamburgo, Alemania	PT Smelting Co. Gresik, Indonesia
Producción de ánodo [t/ciclo]	270	400
Duración oxidación [h]	0.5	5
Flujo aire [Nm^3/min]	6-7	50 aire, 5 oxígeno
Adición <i>scrap</i> [t/ciclo]	0-10	0-30
Reductor	Gas natural	Diesel
Duración reducción [h]	3	2
Flujo reductor [Nm^3/min]	20	30 [L/min]

La producción de cobre anódico por ciclo es similar en comparación a la masa de cobre *blíster* obtenida por ciclo, si bien es posible generar escorias en la etapa de refino a fuego, sus dimensiones en masa son despreciables comparado a la masa de *blíster* que ingresa y cobre anódico producido.

Electro refinación

En esta sección se muestran datos de 6 refinерías, los datos corresponden a una encuesta de un total de 56 operaciones de las cuales 35 fueron encuestadas en el año 2006 y 21 en el 2003. Se aprecian diferencias en los sistemas de operación, las refinерías de cobre continúan moviéndose hacia sistemas permanentes de manejo de cátodos, además de emplear el sistema de hojas de inicio, ya sea de titanio, acero inoxidable o de cobre (Moats et al., 2007).

Tabla 11. Datos operacionales de refinerías de cobre en el mundo (Moats et al., 2007).

Parámetro	Refinería					
	CODELCO Salvador Potrerillos, Chile	Sumitomo Metal Mining Toyo, Japón	Kennecott Utah Copper Magna, UT, EE.UU	P.T. Smelting Co. Gresik, Java, Indonesia	Hibi Kyodo Smelting Tamano, Japón	CODELCO Chuquicamata, Chile
Producción cátodos [kt/año]	139	110	281	200	228	667
Consumo de energía [kWh/t cátodo]	223	-	340	321.3	377	288.5
Ánodos						
Masa [kg]	223	365	335	381	373	400-420
Cu [%]	99.5	99.3	99	98.8	99.46	99.57-99.76
Duración [d]	20	16	20	20	18	24
Scrap [%]	16.5	17.3	18	11.5-14.7	17.4	14.6
Barros anódicos [kg/t ánodo]	1.5	5	9.7	4.8	6	2
Cátodos						
Tiempo formación [d]	10	8	10	7-13	9	12
Masa [kg]	95	75	130	50-100	156.8	176
Área [m ²]	0.745	1.118	0.980	1	1.044	1.138
Celda						
Ánodo/cátodo por celda	31/30	56/55	47/46	59/58	47/46	50/49
Número de celdas	1295	300	1400	762	351	2670
Densidad de corriente [A/m ²]	234	276	285	312	317	242-252
Eficiencia de corriente [%]	97.9	95	94.7	98.7	92.3	-
Electrolito						
Cu [g/L]	44.9	49	45	49.6	51.2	40-44
H ₂ SO ₄ [g/L]	212.2	190	170	175.8	181	200
Temperatura entrada [°C]	60	62	65	62.5	65	60
Temperatura salida [°C]	-	63	62	63	67	52-63
Flujo por celda [m ³ /h]	0.96	1.50	1.20	2.10	1.98	0.84
Aditivos						
Cola [g/t cátodo]	45	110	73	57	83	35
Thiourea [g/t cátodo]	30	80	115	110	75	60
Avitone [g/t cátodo]	25	20	-	-	-	10
HCl, NaCl [g/t cátodo]	30 ppm HCl	-	73 NaCl	-	77	-

La encuesta mencionada anteriormente fue actualizada con datos de refinerías para los años 2015 y 2018, representando entre un 30 y 35[%] de la producción mundial de cobre mediante este proceso. Según los datos proporcionados, la composición promedio de los ánodos de cobre en el 2019 es de 99.2[%] junto con 20[ppm] y 1450[ppm] para el azufre y oxígeno respectivamente. La producción de barras anódicas promedio es de 5.5[kg] por tonelada de ánodo procesado con una frecuencia de remoción de 21.1 días. Actualmente la tecnología de cátodos permanentes es considerada el estándar industrial y ha permitido que las refinerías aumenten la densidad de corriente y eficiencia de corriente. En promedio, la aplicación de hojas iniciales de cobre se asocia a una densidad de corriente de 278[A/m²] y eficiencia de corriente de 95.3[%], por otro lado, emplear cátodos permanentes se asocia a valores de 319[A/m²] y 96.2[%]. La temperatura de entrada promedio obtenida para el electrolito fue de 65[°C] mientras que la de salida corresponde a 64[°C]. La composición promedio del electrolito para el cobre y ácido sulfúrico según los datos del 2019 es de 47[g/L] y 175[g/L] respectivamente. En relación con los aditivos, el promedio empleado de *glue*, tiourea, *avitone A* y ácido clorhídrico o sal es de 81, 83, 15 y 71[g] por tonelada de cátodo (Moats et al., 2019).

Aglomeración y lixiviación

La Tabla 12 muestra algunos datos operacionales de una encuesta realizada a 26 operaciones de lixiviación alrededor del mundo, abarcando una producción total anual de aproximadamente 2 millones de toneladas. El 56[%] de las operaciones emplean el chancado como preparación del mineral previo a lixiviar y el 44[%] opera con el mineral ROM (Washnock et al., 2016). El *benchmarking* de esta operación incluye 16 operaciones de las 26 ya que son las que emplean el método de lixiviación en pilas (permanentes o dinámicas).

Se ratifica la temperatura ambiente a la que opera normalmente este proceso al observar las temperaturas del PLS en cada planta presente en la Tabla 12. Valores como la tasa de riego y altura de pila no varían considerablemente entre las plantas consideradas. Cabe destacar que la ley del mineral y la recuperación son menores que las observadas en el procesamiento de sulfuros (Tabla 7), como es la tendencia general. El consumo de ácido en aglomeración tiende a ser en general levemente menor al consumo registrado en lixiviación.

Tabla 12. Datos operacionales de lixiviación de cobre (Washnock et al., 2016).

Parámetro	Operaciones de lixiviación					
	El Abra, Freeport McMoran Calama, Chile	Gabriela Mistral, CODELCO, Chile	Lady Annie, Mount Isa, Australia	Minera Spence, BHP Billiton Sulfide, Sierra Gorda, Chile	Safford, Freeport McMoran, EE.UU	Sociedad Minera Cerro Verde S.A., Freeport McMoran, Arequipa, Perú
Producción [t cátodo/año]	156670	133000	18000	200000	66300	60000
Ley de mineral [%]	0.36	0.45	-	1.08	0.24	0.33
Ácido en Aglomeración [kg/t mineral]	7	21-27	20	7-10	7-20	5
Humedad en Aglomeración [%]	-	-	-	9	-	6
Flujo mineral a lixiviación [t/h]	6700	7500	435	3500	2300-3200	-
Área bajo irrigación [m ²]	2931500	871000	2400 00	1400000	1405622	-
Tasa de riego [L/hm ²]	5-8	8	4-10	8	4.9	7.8
Tiempo de lixiviación [d]	300	45	240	450	120	110-200
Consumo de ácido [kg/t mineral]	19	30	18-20	-	35-47	5.5
Make-up de agua [m ³ /d]	9600	100-600	1200	15600	4000	4416
Altura de pila [m]	8	7.5	8	7.5	5.5	7
Tasa de lixiviación [t/d]	450-470	-	50	297	218	154-200
Recuperación [%]	53	78	79	70	76	77
Flujo PLS a SX [m ³ /h]	13600	3600	750	4000	5678-8176	4996
Lixivante						
H ₂ SO ₄ [g/L]	7	8.1-10.1	10	6-10	13.48	5.4
Cu [g/L]	0.05-0.07	0.1-0.3	0.4	0.54	0.23	0.42
PLS						
H ₂ SO ₄ [g/L]	0.8-1	2.5-5	2	3.0-3.5	1.36	4.85
Cu [g/L]	1.35-1.60	2.5-6	3	1-3	1.56	2.66
Temperatura [°C]	18-22	15-25	20	18-22	29	-

Dentro de la encuesta mencionada un 32[%] de las operaciones emplean la aglomeración y un 41[%] el curado ácido, dejando un 26[%] sin método de preparación del mineral. En relación con los tipos de pilas de lixiviación, un 73[%] emplean pilas permanentes y un 27[%] utilizan pilas dinámicas. La recuperación de cobre promedio mayoritaria en los sitios encuestados (33[%]) es entre 70 y 80[%]. La concentración de cobre en el PLS se sitúa entre 0.2 y 2.3 [g/L] y la del hierro entre 1 y 2 [g/L] (Washnock et al., 2016). Los valores presentados en la Tabla 16 para esta operación incluyen los valores de los parámetros respectivos para las 16 operaciones analizadas en esta operación.

Extracción por solventes

La Tabla 13 presenta algunos parámetros operacionales seleccionados de 6 operaciones (Schlesinger et al., 2011) provenientes de una encuesta realizada a plantas de SX. Una actualización de la encuesta antes mencionada se lleva a cabo en el 2018, abarcando alrededor del 43[%] de la producción mundial de cátodos de cobre mediante SX y EW. La concentración de cobre en el PLS varía considerablemente de 0.2 hasta aproximadamente 40 [g/L], al igual que varían otras impurezas presentes dependiendo principalmente de la ubicación geográfica de la planta, el valor promedio para el cobre en Sudamérica es de 2.7[g/L]. En Sudamérica se procesan generalmente depósitos minerales de óxidos de ley media y sulfuros secundarios. Las operaciones chilenas, principalmente empleando pilas o vertederos para lixiviación, tienen frecuentemente elevados valores de hierro en el PLS debido a la lixiviación de los sulfuros secundarios. El mineral predominante en esta región es la atacamita, lo que produce elevados niveles de cloruro en el PLS. Los circuitos son generalmente configurados como 2E+2S y 2E+1S. En relación con el electrolito, la concentración promedio en Sudamérica de ácido en el electrolito que proviene de EW según la encuesta es de 184[g/L], en el caso del cobre es de 37.8 [g/L]. En el mismo sector la concentración de cobre y hierro en el electrolito producido en SX es de 44.5[g/L] y 1.76[g/L] respectivamente. Más del 80[%] de la producción de cobre catódico mediante SX está dominada por dos principales proveedores de extractantes, BASF y Solvay, el primero proporciona la gama LIX de extractantes (cetoxima y mezclas de aldoxima y cetoxima) mientras que el segundo provee los extractantes ACORGA (aldoximas modificadas y mezclas de aldoxima y cetoxima modificadas). La concentración de extractante empleada está directamente relacionada con la concentración de cobre en el PLS y la eficiencia de extracción requerida, en la encuesta realizada la concentración de extractante varía de 2.5[%] en volumen para un PLS con 0.3[g/L] de cobre a 32[%] para el tratamiento de un PLS con 38[g/L] de cobre contenido.

Tabla 13. Datos de plantas industriales de SX de cobre (Schlesinger et al., 2011).

Parámetro	Operaciones SX					
	Escondida Oxide, Chile	El Abra, Calama, Chile	Lomas Bayas, Chile	Mantos Blancos, Chile	Bwana Mkubwa, Zambia	Sepon, Laos
Producción cátodos [t/año]	150000	225000	64300	60000	51000	60000
Flujos						
PLS [m^3/h]	1123	1300	1150	1140	700	600
Electrolito [m^3/h]	450	520	720	426	1250	570
Orgánico [m^3/h]	1250	1500	1100	1120	550	1050
PLS						
Cu [g/L]	7	2.5	4.1	5.2	8	14-17
Fe [g/L]	2.5	3.0	1.5	1.7	-	30-35
pH	1.6-1.8	2-2.1	2.1	1.5	2.0	1.8-2.5
Refino						
Cu [g/L]	0.5	0.18	0.65	0.64	0.6	0.6-1.5
H_2SO_4 [g/L]	12	7	6	11.7	11	30-35
Pérdida de orgánico [mg/L]	40	20	30	43	-	20-30
Eficiencia extracción [%]	93-96	93	85	90	-	93
Orgánico						
Extractante	Acorga M5640	LIX 84 IC+LIX 612 NLV	LIX 84 IC	Acorga M5640+LIX 8186	LIX 984NC	LIX 974N LVS
Diluyente	Shellsol 2046AR	Shellsol 2046AR	Shellsol 2046AR	Solbrax M	Shellsol 2325	Shellsol 2046TH
Concentración extractante [%]	17	16.2-16.6	21	15.8	25-28	26-32
Eficiencia <i>stripping</i> [%]	70	68-70	84	67	65	-
Electrolito avanzado						
Cu [g/L]	50	54	53	45	49	51
H_2SO_4 [g/L]	170	170	165	180	178	165
Electrolito gastado						
Cu [g/L]	38	41	43	34	38	35
H_2SO_4 [g/L]	180	187	182	198	187	185

La seguridad y huella de carbono son los principales aspectos considerados en la elección del diluyente, en los últimos años las operaciones en Chile y Estados Unidos han cambiado desde diluyentes parcialmente aromáticos a diluyentes que contienen menos del 0.5[%] de contenido aromático. Los consumos promedio de extractante y diluyente por tonelada de cobre en Sudamérica son de 3.2[kg] (con una concentración de 14[%] promedio de extractante) y 23[kg] respectivamente. A pesar del amplio rango de contenido de cobre en el PLS, la eficiencia de extracción promedio corresponde a 92.4[%] (Sole et al., 2018).

Electro obtención

La Tabla 14 presenta los parámetros operacionales de 6 plantas que operan con este proceso, la encuesta comprende un total de 57 operaciones cuyos datos están situados entre los años 2001 y 2006, principalmente en el último con 33 operaciones (Robinson et al., 2007). En el 2018 se lleva a cabo otra encuesta similar que comprende 29 plantas, abarcando el 38[%] de la producción mundial. Las concentraciones de especies en el electrolito varían según la ubicación de la planta, en el caso de Sudamérica se tiene un valor promedio de 40[g/L] de cobre y la temperatura promedio del electrolito es de 43[°C]. Dentro de los aditivos empleados se encuentra el cobalto, que es agregado como su sal de sulfato correspondiente ($CoSO_4$) para mantener la concentración de cobalto en el electrolito entre 80 y 250[mg/L]. La mayoría de las operaciones emplean una concentración de 20 a 30[mg/L] de cloruro en el electrolito. En relación con los parámetros eléctricos, los valores promedio obtenidos en las operaciones encuestadas para la densidad de corriente y eficiencia de corriente son de 292[A/m²] y 88[%] respectivamente. Las celdas tienen 62 cátodos en promedio dentro de las operaciones, mostrando un leve incremento a través de los años (Sole et al., 2018).

En la Tabla 14 se observa que la cantidad de celdas empleadas por operación es menor a la cantidad empleada en el proceso de ER, donde varias operaciones superan las mil celdas empleadas. Además, se observan aspectos técnicos presentes en la literatura como la menor eficiencia de corriente que se encuentra en EW en comparación a ER, el mayor flujo de electrolito en EW en comparación a ER y el mayor consumo de energía en EW dado por las considerables ineficiencias del proceso.

Tabla 14. Datos operacionales de plantas de EW de cobre (Robinson et al., 2007).

Parámetro	Operaciones EW					
	BHP Billiton Escondida Oxidos, Chile	El Abra, Calama, Chile	Gabriela Mistral, CODELCO, Chile	Compañía Minera Quebrada Blanca, Quebrada Blanca, Chile	Compañía Minera Zaldivar, Chile	BHP Copper, Pinto Valley, Arizona, EE.UU
Producción cátodos [t/año]	150000	225000	150000	82500	125000	9500
Cátodos						
Tiempo electrodeposición [d]	4-5	6	6.5	5	5	7
Masa [kg]	74	80	-	70	80	50
Área [m ²]	0.97	1.25	1.15	1	1.26	0.95
Celdas						
Ánodo/cátodo por celda	61/60	67/66	61/60	61/60	64	28/27
Número de celdas	480	680	504	264	368	60
Densidad de corriente [A/m ²]	290	280-303	276.5-333.3	275	340	140
Eficiencia de corriente [%]	92	89	90	92	90	84
Flujo electrolito [m ³ / min]	0.27	0.28	0.29	0.18	0.36	0.098
Consumo de energía [kWh/t cátodo]	1850	1860	-	2030	1840	-
Electrolito entrada						
Cu [g/L]	40-43	42	50	45	42-44	35
H ₂ SO ₄ [g/L]	180	185	157	182	160	160
Temperatura [°C]	50	49	44	45	50	41.1
Electrolito salida						
Cu [g/L]	40	40	35	41.7	40-42	32
H ₂ SO ₄ [g/L]	185	195	180	187	165	170
Temperatura [°C]	50	50	45	50	48	45.6
Electrolito, otros componentes y aditivos						
Fe ²⁺ [g/L]	0.2	0.4	-	0.3	0.17	0
Fe ³⁺ [g/L]	1.2	2.6	-	1.6	1.5	2.5
Goma guar [g/t cátodo]	200	350	250	300	250	250
Cobalto [g/t cátodo]	150ppm	520	365	550	800	100

Con el *benchmarking* realizado se toman los valores promedio más actualizados en cada parámetro requerido, estos valores son los empleados para el cálculo de los materiales de entrada y salida en el balance de masa de cada operación unitaria. Además, se seleccionan rangos que posteriormente son empleados en la Sección 4.4. para estudiar la influencia de estos parámetros en el rendimiento químico verde. La Tabla 15 muestra los promedios y rangos considerados para la ruta pirometalúrgica mientras que la Tabla 16 muestra los datos correspondientes al procesamiento de óxidos de cobre.

Tabla 15. Valores promedio y rangos considerados en parámetros de ruta pirometalúrgica.

Operación unitaria	Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo
Flotación	Recuperación [%]	90.5	88.0	95.0
	Ley [%]	0.81	0.45	1.13
	Xantato [g/t Mx]	58.4	10.0	190.0
	MIBC [g/t Mx]	22.0	15.0	33.0
	Cal [g/t Mx]	798.0	450.0	1260.0
Fusión	Ley mata [%]	63.5	55.0	70.5
	Razón escoria	0.86	0.64	1
	Oxígeno en <i>blast</i> [%]	68.4	48.5	85.0
	Flujo concentrado[t/d]	3159	2000	4200
	Razón oxígeno [kg/t conc]	246.5	200.6	283.7
	Razón polvos fusión [kg/t conc]	68.2	53.8	79.4
	Razón polvos conversión [kg/t conc]	10.8	4.8	17.9
	Razón carbón [kg/t conc]	4.7	0.5	12.9
Conversión	Razón escoria	0.50	0.42	0.60
	Oxígeno en <i>blast</i> [%]	24.46	22.3	27.5
	Flujo mata [t/d]	803.8	425.6	1123.4
	Razón oxígeno [kg/t mata]	475.7	334.2	806.0
	Razón <i>scrap</i> [kg/t mata]	272.4	175.0	363.6
Refino a fuego	Razón <i>scrap</i> [kg/t ánodo]	28.0	18.5	37.5
	Flujo de aire [Nm ³ /min]	60	20	100
ER	Eficiencia corriente [%]	96	92.3	98.7
	Intensidad corriente [A/m ²]	310	234	317
	Área cátodo [m ²]	1	0.75	1.14
	N° cátodos	47	30	58
	Flujo electrolito [m ³ /h]	1.2	0.8	2.1
	Razón ánodo [t/t Cu]	1.401	1.004	2.245

Tabla 16. Valores promedio y rangos considerados en parámetros de ruta hidrometalúrgica.

Operación unitaria	Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo
Aglomeración	Consumo A [kg/t Mx]	12.2	5.0	24.0
	Humedad [%]	7.5	6.0	9.0
Lixiviación	Recuperación [%]	74.2	62.5	90.0
	Ley [%]	0.52	0.16	1.1
	RL [m ³ /t Mx]	2.83	0.68	6.78
	Consumo A [kg/t Mx]	20.6	4.3	41.0
	[A] en RF [g/L]	10.3	5.0	18.0
	[Cu ²⁺] en RF [g/L]	0.37	0.06	1.00
	[Cu ²⁺] en PLS [g/L]	2.7	1.0	6.5
SX	[Cu ²⁺] en EA [g/L]	44.5	43	50.3
	[Cu ²⁺] en ES [g/L]	37.8	34	43
	Flujo PLS [m ³ /h]	1000	600	1300
	Eficiencia extracción [%]	92.4	85	94.5
	Razón O/A	1	0.79	1.75
	Eficiencia corriente [%]	88	84	92
EW	Intensidad corriente [A/m ²]	292	140	340
	Área cátodo [m ²]	1	0.95	1.26
	N° cátodos	62	40	80
	Flujo electrolito [m ³ /h]	15	5.9	21.6
	[Cu ²⁺] en electrolito [g/L]	40	35	50

El rango obtenido en cada parámetro es consistente con el promedio respectivo, es decir, mantienen órdenes de magnitud similares, esto da cuenta de prácticas operacionales semejantes en dichos parámetros. Se observa la diferencia de leyes y recuperaciones entre las dos rutas de procesamiento, además, el promedio del número de cátodos empleados en EW es mayor al asociado a ER.

La razón másica de oxígeno en conversión es mayor que la empleada en fusión, sin embargo, la masa de oxígeno total empleada es mayor en fusión dado el mayor tonelaje procesado en el concentrado a diferencia de la mata de cobre (Tabla 17).

En relación con la razón de lixiviación, dentro de los parámetros empleados en su cálculo es el tiempo de lixiviación el más influyente dado que es el parámetro que presenta mayor variación, la tasa de riego y altura de pila varían en menor medida entre las operaciones consideradas.

4.1.2. Balances de masa

El proceso más intensivo en el uso de recursos es la flotación para la ruta pirometalúrgica y lixiviación para la hidrometalúrgica, no obstante, en el procesamiento de óxidos destaca también el proceso de SX, quedando bajo la lixiviación en la suma de los insumos utilizados sólo debido a la gran cantidad de refino recirculado en el proceso.

Tabla 17. Resultado del balance de masa en la ruta pirometalúrgica.

Proceso	Producto		Insumos		Desecho		Reacciones	Tiempo [h]
	Nombre	Masa [t]	Nombre	Masa [t]	Nombre	Masa [t]		
Flotación	Concentrado	3.59	Mineral	135.9	Relave	132.3	-	0.07
			Agua	252.3				
			Xantato	0.008				
			MIBC	0.003				
			Cal	0.108				
Fusión	Mata	1.58	Concentrado	3.59	Escoria	1.97	Fundición del concentrado	0.03
			Oxígeno	0.89				
			Nitrógeno	0.36				
			Sílice	0.61				
			Polvos fusión	0.24				
			Polvos conversión	0.04				
Conversión	Blíster	1.02	Mata	1.58	Escoria	0.37	Soplado escoria	0.05
			Oxígeno	0.75				
			Nitrógeno	2.03				
			Sílice	0.10				
			Scrap	0.43				
Refino a fuego	Ánodo	1.01	Blíster	1.02	-	-	Remoción de azufre	0.03
			Oxígeno	0.004				
			Nitrógeno	0.015				
			Scrap	0.028				
			Metano	0.005				
ER	Cátodo	1	Ánodo	1.40	-	-	Disolución ánodo	30.15
			HCl o NaCl	7.1.E-05				
			Cola	8.10.E-05				
			Thiourea	8.30.E-05				
			Avitone	1.50.E-05				
			[Cu ²⁺] en electrolito	1.70				
			[A] en electrolito	6.33				
			Agua en electrolito	28.04				
						Electrodeposición de cobre		

La mayor cantidad de desechos se genera en lixiviación debido a los ripsos y luego en flotación debido al relave generado. La masa de ripsos resulta ser mayor que el relave al considerar valores de ley y recuperación menores en comparación a los empleados en el procesamiento de sulfuros.

Tabla 18. Resultado del balance de masa en la ruta hidrometalúrgica.

Proceso	Producto		Insumos		Desecho		Reacciones	Tiempo [h]
	Nombre	Masa [t]	Nombre	Masa [t]	Nombre	Masa [t]		
Aglomeración	Mineral aglomerado	258.4	Mineral	258.4				
			Agua	21.2				
			Ácido sulfúrico	3.2				
Lixiviación	PLS	1	Mineral	258.4	Ripsos	258.4	Disolución de óxidos de cobre	0.09
			Ácido sulfúrico	5.3				
			[Cu ²⁺] en RF	0.3				
			[A] en RF	7.5				
			Agua en RF	721.9				
			Makeup agua	14.8				
SX	EA	1	[Cu ²⁺] en PLS	0.2			Extracción	0.06
			Agua en PLS	60.0				
			Aldoxima (extractante)	5.5				
			Keroseno (diluyente)	43.1			Stripping	
			[Cu ²⁺] en ES	0.8				
			Agua en ES	21.6				
EW	Cátodo	1	[Cu ²⁺] en electrolito	15.9			Electrodeposición de cobre	26.47
			Agua en electrolito	380.0				
			Goma guar	3.0.E-04				
			Sulfato de cobalto heptahidratado	3.8.E-03				

En ambas rutas de procesamiento, la masa de aditivos considerados en las operaciones EW y ER son muy bajas en comparación al total de la operación. En relación con el tiempo considerado para las operaciones que incluyen reacciones, los procesos de alta temperatura requieren de poco tiempo para producir una tonelada de cobre fino, destacan los procesos electroquímicos en este caso siendo la etapa de ER la que lleva más tiempo dado que la cantidad de cátodos considerada por celda es menor a la correspondiente en EW y este factor influye en mayor medida en comparación a la eficiencia de corriente y densidad de corriente, que son mayores en el caso del proceso de ER.

4.2. Evaluación Química Verde

En esta sección se detallan los resultados asociados al *software* DOZN 2.0, para una mayor comprensión estos resultados se analizan en primera instancia según cada una de las dos rutas de procesamiento consideradas y luego en base a la influencia que cada operación unitaria tiene en la evaluación. El análisis se efectúa considerando el puntaje DOZN para cada principio de la química verde, para cada categoría y para el puntaje global. En el Anexo 2 se presentan los valores obtenidos para cada operación unitaria según la Tabla 25 y Tabla 26.

4.2.1. Evaluación por ruta de procesamiento

La ruta de procesamiento pirometalúrgica presenta un mejor rendimiento químico verde que la ruta hidrometalúrgica dado por un puntaje global DOZN en su evaluación de 4.3 en comparación a un valor de 32.5. De igual forma, en cada una de las 3 categorías evaluadas, el procesamiento de sulfuros presenta un mejor rendimiento. La mayor diferencia se presenta en la categoría de reducción de peligros humanos y ambientales (C3), como se puede observar en la Figura 11.



Figura 11. Puntaje DOZN global y por categorías para cada ruta de procesamiento.

Los principios que más influyen en la categoría de uso de recursos (C1) son los principios 1, 2 y 7 (Figura 11), ya que el orden de magnitud de sus valores es mayor al del principio 11, cuyo valor es menor en la ruta pirometalúrgica (Figura 13) dado que los procesos de fusión y conversión presentan un control de temperatura del proceso que permite una mayor capacidad de reacción ante eventuales cambios que pudiesen generar potenciales peligros, por el contrario, no se consideran mecanismos de control en el procesamiento de óxidos para esta evaluación. La consideración de un tipo de control le otorga valor nulo al principio 11 para las etapas de fusión y conversión, en los procesos restantes el valor de este principio es 1.

Dentro de los potenciales peligros mencionados se considera que un aumento de la temperatura de la mata en fusión, por ejemplo, podría generar un aumento en el requerimiento de energía, oxígeno o combustible, generando un mayor uso de materiales y aumentando la contaminación indirecta por gases de efecto invernadero dado el aumento en el consumo de energía. La contaminación debido a GEI se detalla más adelante en la Sección 4.3.3.

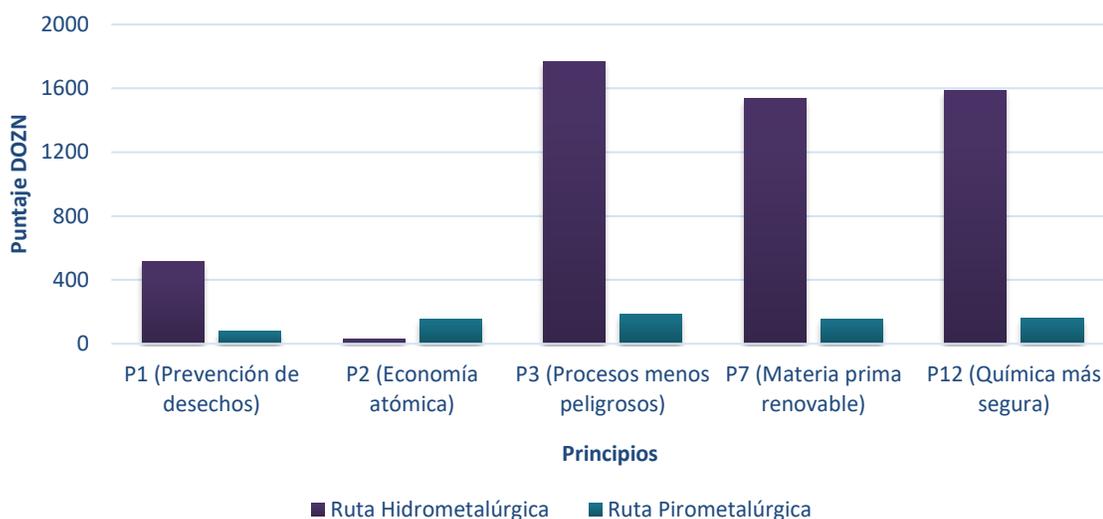


Figura 12. Puntaje DOZN para principios 1, 2, 3, 7 y 12, para cada ruta de procesamiento.

La ruta pirometalúrgica presenta un mejor rendimiento en relación con la prevención de desechos (P1), esto se debe a que se genera una menor cantidad de desechos para producir una tonelada de cobre fino en comparación con la ruta alternativa, donde la menor ley de cobre y recuperación generan un considerable aumento en la masa de mineral que se requiere para lograr la misma producción. Al analizar la diferencia en el principio 2 para cada ruta de procesamiento, se observa una amplia diferencia en favor de la ruta hidrometalúrgica como se observa en la Figura 12, esto da cuenta de un mayor grado de recirculación en esta ruta bajo los parámetros considerados. La diferencia se basa en la proporción másica de materiales recirculados en comparación a los materiales ingresados en cada ruta de procesamiento, lo cual genera un valor de 32.2 para el principio 2 a diferencia de la ruta pirometalúrgica que obtiene un valor de 153.5 para el mismo principio.

El procesamiento de sulfuros tiene un mejor rendimiento en la categoría de eficiencia energética (C2) dado principalmente por la mayor magnitud del valor asociado al proceso de EW en esta categoría (420.5) en comparación al resultado de la ruta pirometalúrgica en la misma categoría (43.4). Esta diferencia se debe a factores como el mayor flujo de electrolito empleado en EW a diferencia de ER y mayor tiempo requerido en EW para obtener una tonelada de cobre.

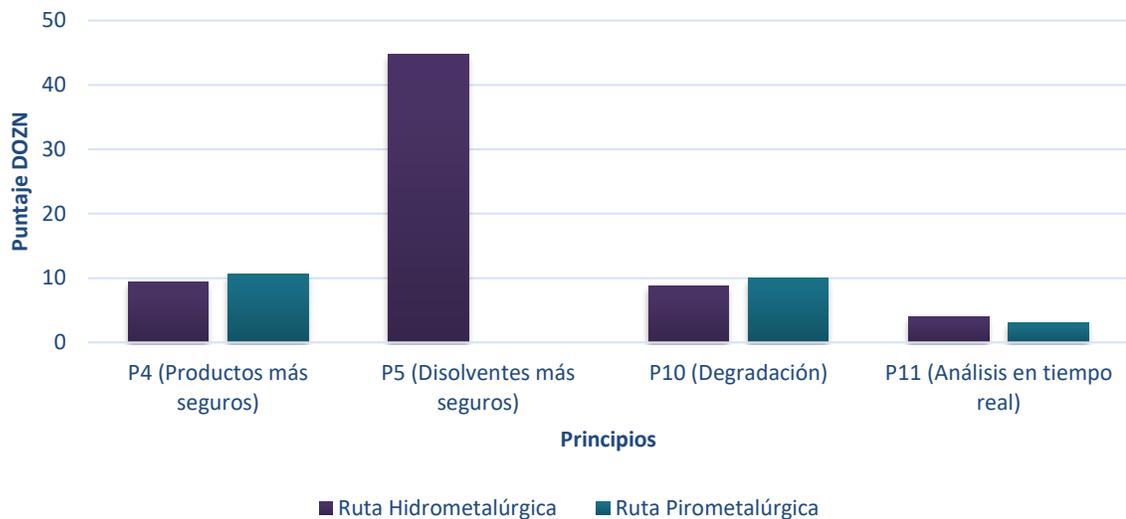


Figura 13. Puntaje DOZN para principios 4, 5, 10 y 11, para cada ruta de procesamiento.

La categoría de reducción de peligros humanos y ambientales es la de mayor magnitud en el procesamiento de óxidos, esto se debe a que los principios 3 y 12 son mayores que los demás principios pertenecientes a la categoría (principios 4, 5 y 10) dado que están basados en la masa de materia prima que ingresa en cada operación a diferencia de los otros principios que están basados en la masa de producto generado (principio 4) o solvente empleado en el caso del principio 5. Además, debido a lo anterior C3 es mayor en la ruta hidrometalúrgica, ya que la masa de mineral, agua y otros materiales considerados en esta ruta es muy grande en comparación con los materiales empleados en el procesamiento de sulfuros. El principio 5 tiene valor nulo en la ruta pirometalúrgica (Figura 13) dado que no se consideran solventes en ninguna de sus operaciones unitarias, por otra parte, el único solvente corresponde al keroseno aplicado para diluir el extractante en SX. El indicador de peligro ambiental (principio 10) es levemente menor en la ruta hidrometalúrgica (8.74) en comparación con la línea productiva alternativa (10.01), lo cual indica un mejor rendimiento de esta ruta en este aspecto. Esto se debe principalmente a que la ruta pirometalúrgica considera un total de 5 operaciones unitarias a diferencia de las 4 operaciones evaluadas en el procesamiento de óxidos, por lo tanto, la sumatoria de los valores del principio 10 de cada una resulta en un mayor valor final. No obstante, el factor B aplicado para este principio influye de mayor forma en el procesamiento de óxidos ya que en esta ruta se considera una mayor cantidad de materiales con factor B distinto de 1. El mejor rendimiento en el principio 4 para la ruta hidrometalúrgica se debe también a que se consideran menos operaciones unitarias en esta ruta, a pesar de que en esta ruta se encuentran materiales peligrosos como el keroseno y el ácido sulfúrico.

4.2.2. Evaluación por operación unitaria

La contribución de cada operación unitaria al puntaje global de DOZN en cada ruta de procesamiento se muestra en la Figura 14. Se observa que los procesos de flotación y ER son las operaciones que más impacto tienen en el rendimiento químico verde de la ruta pirometalúrgica, luego aparecen los procesos de fusión y conversión y finalmente el refinado a fuego que es la operación con mejor rendimiento químico verde (puntaje global DOZN de 0.05).

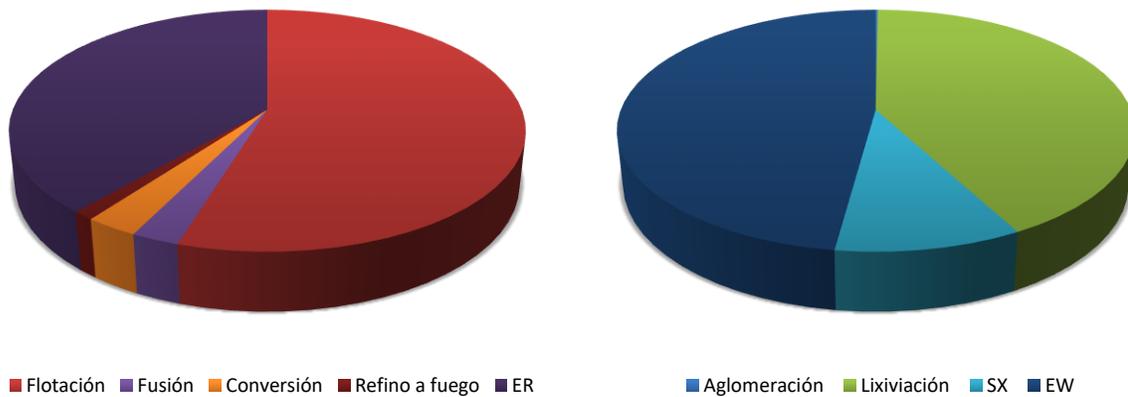


Figura 14. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento (Flotación: 54.8[%]; Fusión: 2.6[%]; Conversión: 2.8[%]; Refino: 1.1[%]; ER: 38.7[%]; Aglo: 0.1[%]; LIX: 42[%]; SX: 10[%]; EW: 47.9[%]).

En el procesamiento de óxidos, los procesos de EW y lixiviación son los que mayor impacto tienen en la ruta hidrometalúrgica, luego viene el proceso de SX y finalmente, con un impacto considerablemente menor, esta la etapa de aglomeración con un puntaje global de 0.05, siendo la que presenta el mejor nivel de química verde.

El impacto de la flotación en el puntaje global DOZN del procesamiento de sulfuros se observa principalmente en las categorías de uso de recursos (75[%] en esta categoría) y reducción de peligros humanos y ambientales (61[%] en esta categoría), mientras que la etapa de ER tiene una mayor influencia en la categoría de eficiencia energética (97[%] en esta categoría), como se muestra en la Figura 15. Esto se debe a que la reacción considerada en ER se desvía de las condiciones normales de temperatura por un tiempo prolongado, mayor al empleado en los procesos de fusión, conversión o refinado a fuego. La flotación no tiene incidencia en la eficiencia energética dado que no considera reacciones que se desvíen de las condiciones normales de temperatura.

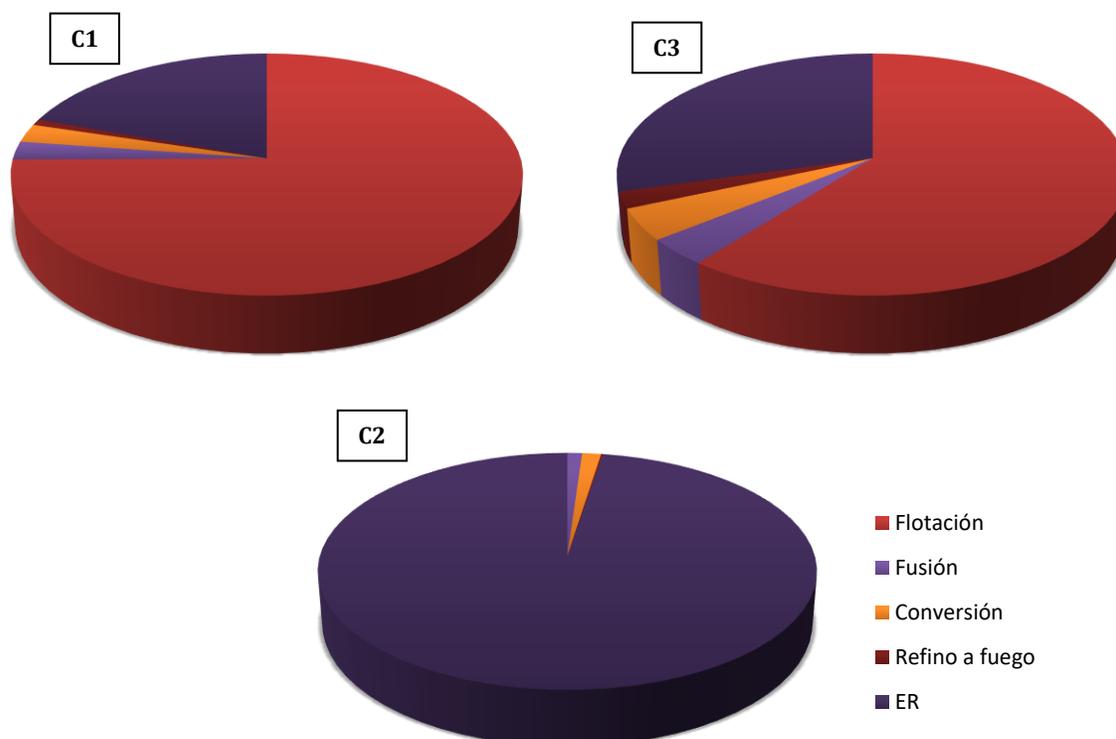


Figura 15. Distribución de puntaje DOZN por categorías según operaciones unitarias en ruta pirometalúrgica.

La influencia de las operaciones unitarias en las categorías 1 y 3 es similar dado que ambas categorías son afectadas por la masa de materiales que ingresan en cada operación y es en flotación donde se emplean más recursos debido a la masa de mineral de entrada y agua requerida, la siguiente operación más intensiva en el uso de recursos es la etapa de ER.

Lo anterior también se puede explicar según el análisis por principio presentado en la Figura 16. Al considerar la influencia de cada operación en los distintos principios de la química verde evaluados, se observa que los procesos de flotación y ER son los que más impacto tiene en aquellos principios que involucran la masa de materiales empleados en su cálculo (principios 1, 2, 3, 7 y 12). El principio 5 tiene valor nulo dado que ninguna operación de esta línea productiva incluye el uso de solventes orgánicos. Cabe destacar que la flotación es la operación que más impacta en la prevención de desechos debido a que la masa de relave generado es considerablemente mayor a las escorias generadas en fusión y conversión, esta es también la razón por la cual este proceso tiene una mayor influencia en la categoría 1 en comparación a la categoría 3 (Figura 15).

Existe una incidencia mayor de ER en C3 en comparación a C1 debido al ácido sulfúrico incluido que genera un mayor nivel de peligrosidad para este proceso, esto se observa en la Figura 16 para el principio 3, donde su valor para ER es mayor en comparación al obtenido en los demás principios para el mismo proceso. Esta diferencia se debe a un mayor factor H considerado.

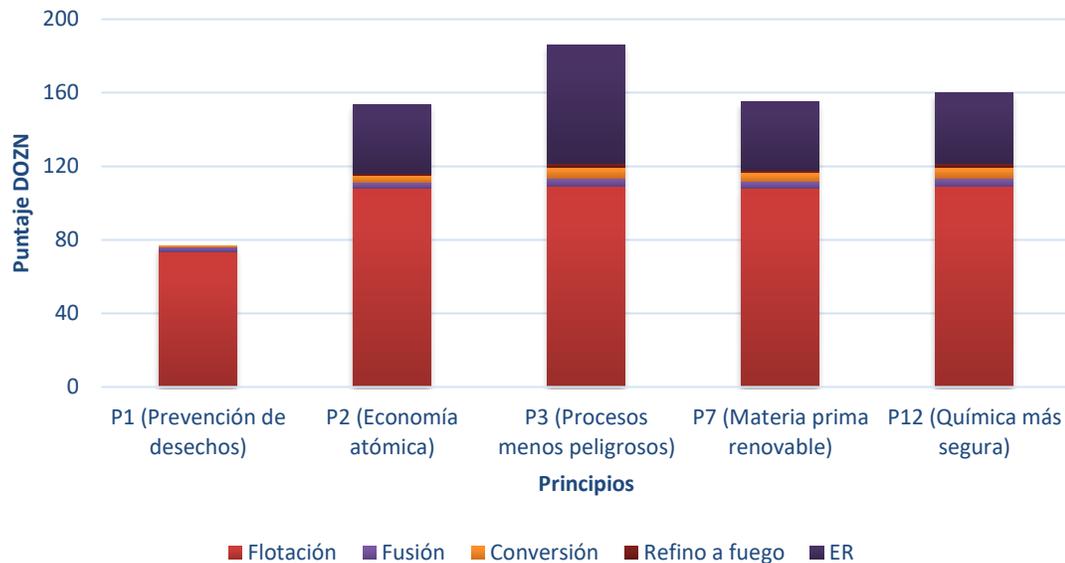


Figura 16. Puntaje DOZN para los principios 1, 2, 3, 7 y 12 evaluados para cada operación unitaria en la ruta pirometalúrgica.

El valor para el principio 10 se mantiene invariante en cada operación unitaria, con la excepción de la etapa de refino a fuego, cuyo valor es levemente mayor al resto de las operaciones debido a que se considera un factor B de 3 para el metano, no obstante, la incidencia de este factor es menor dado que la masa de metano ingresada es baja en comparación al total de materiales que ingresan, esto se observa en la Figura 17, donde no se aprecian variaciones en el valor del principio 10 para cada operación. El principio 4 es mayor en ER debido al ácido sulfúrico (mayor factor H) y no varía para el resto de las operaciones.

En la Figura 17 se observa lo mencionado anteriormente en relación con los principios 4 y 10, cuyos valores en la ruta pirometalúrgica superan el de la ruta hidrometalúrgica debido a la mayor cantidad de operaciones unitarias consideradas.

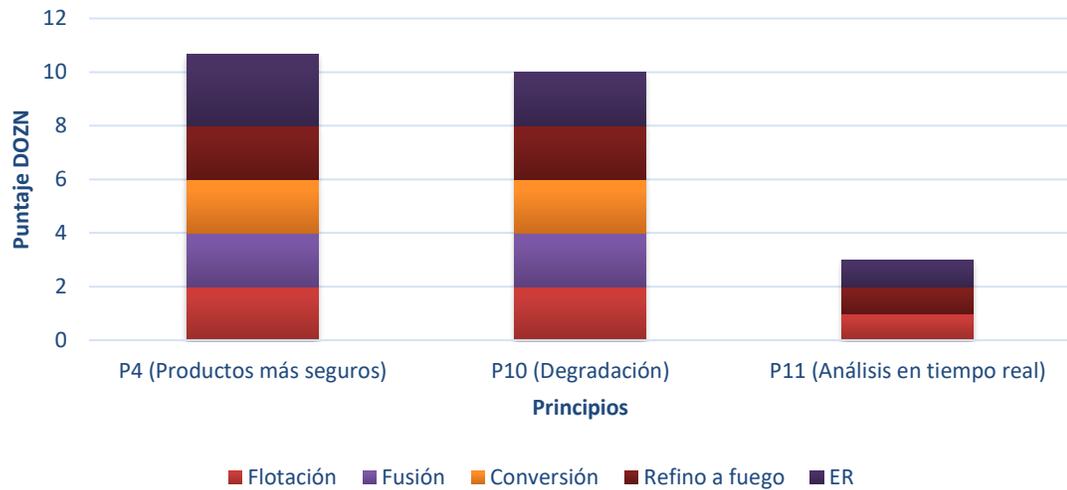


Figura 17. Puntaje DOZN para los principios 4, 10 y 11 evaluados para cada operación unitaria en la ruta pirometalúrgica.

El principio 11 tiene un valor de 1 para las operaciones de flotación, refino a fuego y ER dado que estas operaciones no incluyen un mecanismo de control que haya sido considerado en esta evaluación, por el contrario, las operaciones de fusión y conversión son las más eficientes en este ámbito al incluir el control de temperatura (valor nulo).

El proceso de EW influye en mayor medida en el puntaje global de la ruta correspondiente dado que abarca el 99.8[%] de la categoría de eficiencia energética (Figura 18), además representa el 38[%] y 23[%] en las categorías 1 y 3, respectivamente. En las categorías 1 y 3 se observa una tendencia similar a la que ocurre en la ruta pirometalúrgica, las operaciones más intensivas en el uso de materiales (Tabla 17), que en este caso son lixiviación, EW y SX, obtienen la mayor participación en el desempeño de la ruta hidrometalúrgica en las categorías de eficiencia de recursos y reducción de peligros humanos y ambientales, lo anterior se observa en la Figura 18. Cabe destacar que la influencia de la aglomeración en las categorías 1 y 3 es mínima dado que, a pesar de ser intensiva en el uso de materiales, se considera una mayor masa de producto en comparación a las demás operaciones, donde el producto es una tonelada de cobre fino.

La diferencia radica en que para la aglomeración la tonelada de cobre fino esta contenida en la masa de mineral a lixiviar en la siguiente etapa, debido a esto la masa de producto en esta operación es considerablemente mayor a la aplicada en las demás operaciones, permitiendo así no perder la perspectiva de que la aglomeración es un proceso donde se mezclan materiales, lo que desde el punto de vista de la química verde es favorable ya que todos los materiales empleados en la operación son incorporados en el producto generado, sin generar desechos ni operar en condiciones distintas a las normales de presión y temperatura, por ejemplo.

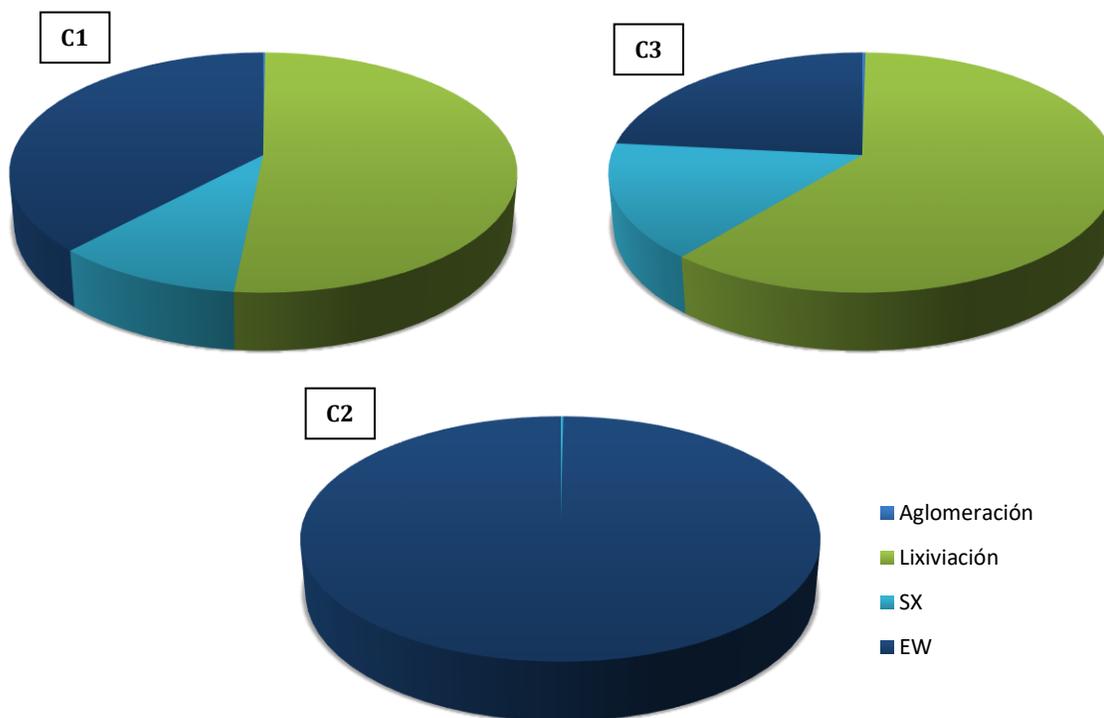


Figura 18. Distribución de puntaje DOZN por categorías según operaciones unitarias en ruta hidrometalúrgica.

La lixiviación es la operación que más contribuye a C3 con un 61[%] seguido de la etapa de EW con un 23[%] para dejar a SX con un 16[%]. El aporte de EW en esta categoría se debe principalmente a la masa de agua requerida, en cambio para SX influye además la peligrosidad de los materiales empleados como el extractante y diluyente, esto se observa en la Figura 19 y Figura 20, donde principios pertenecientes a C3 como el principio 3, 5 o 12 tienen mayor valor en SX en comparación al valor obtenido en principios de C1 como los principios 2 o 7. En definitiva, la etapa de SX es la que presenta el mejor rendimiento en C3 (valor de 106.4) luego de la aglomeración (1.7), que es la operación de mejor rendimiento en todas las categorías y globalmente en esta ruta de procesamiento.

El proceso de SX, además, presenta un rendimiento químico verde superior (puntaje C1 de 54.6) en comparación a la lixiviación (puntaje C1 de 268.7) y EW (puntaje C1 de 198.2) para la categoría de uso eficiente de recursos. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de desechos generados en lixiviación por causa de los ripios, a diferencia de SX o EW que no presentan desechos, lo anterior se muestra en la Figura 19 en el principio 1. Adicionalmente esta presente el factor ya mencionado de intensidad en el uso de materiales que genera la tendencia dada en C1.

La aglomeración y lixiviación son las operaciones más eficientes energéticamente dado que estas operaciones no presentan desviación de las condiciones normales de temperatura, a diferencia de SX y EW que emplean temperaturas levemente mayores en el electrolito para una mayor eficiencia en el proceso. Particularmente las temperaturas consideradas en SX y EW son de 40[°C] y 43[°C], respectivamente.

La lixiviación también influye mayoritariamente en los principios 3, 7 y 12 dado que es un proceso intensivo en el uso de materiales (Figura 19), en este caso el agua contenida en la solución lixivante y el mineral a disolver son los materiales de mayor magnitud másica.

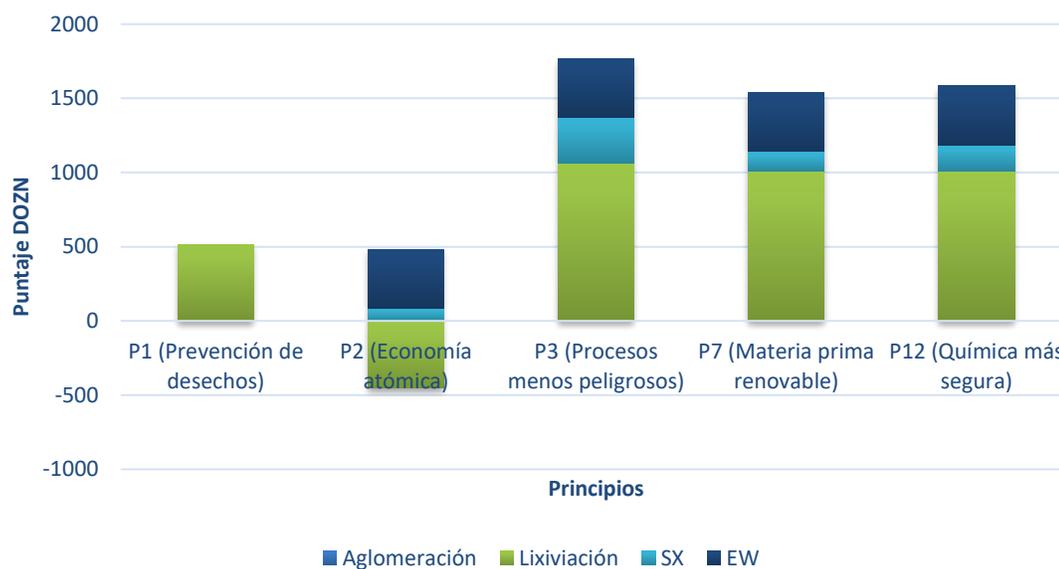


Figura 19. Puntaje DOZN para los principios 1, 2, 3, 7 y 12 evaluados para cada operación unitaria en la ruta hidrometalúrgica.

El principio 2 tiene un valor negativo para la lixiviación, esto se debe principalmente a que el refino de esta etapa es un material que recircula en la ruta de procesamiento, favoreciendo la economía atómica dada la gran cantidad de agua contenida en comparación a la masa de materiales empleados en el proceso. Debido a la misma razón SX tiene un valor bajo en este principio y EW presenta la mayor contribución al no considerar materiales recirculados.

En la Figura 19 se observa el impacto de la aplicación del diluyente y extractante en el principio 3 dado por un mayor índice de peligrosidad en el factor H, ya que la contribución de este proceso al principio 3 aumenta en comparación a la respectiva en el principio 7 que no considera el factor H. Estos materiales mencionados también consideran un mayor factor B (valor de 3), lo que provoca que este proceso sea al de peor rendimiento con relación al principio 10 (valor de 2.7). La operación de SX es la única que presenta un valor distinto de 0 para el principio 5 debido al keroseno empleado como solvente orgánico del extractante (Figura 20).

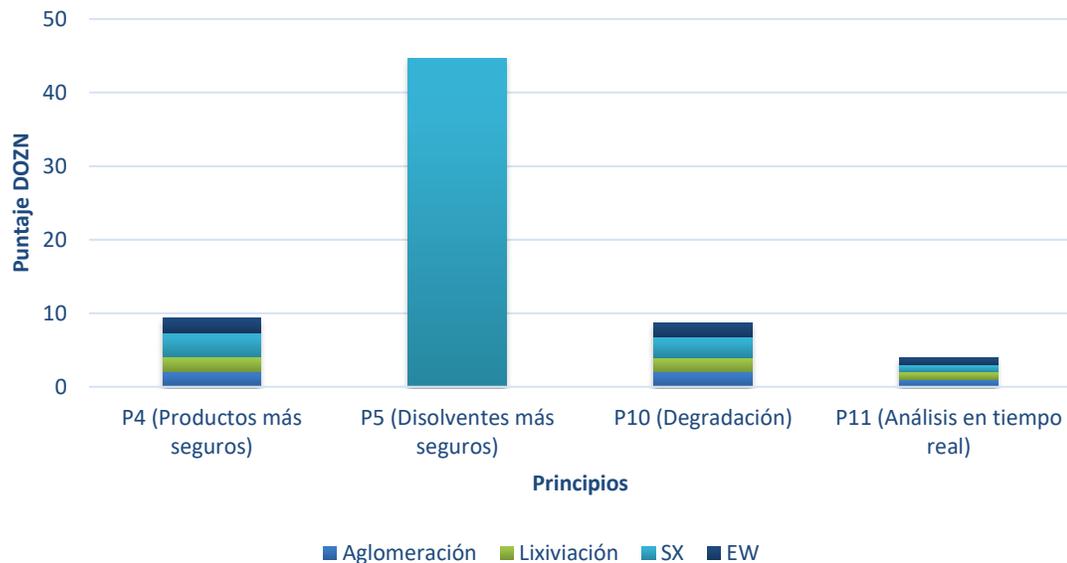


Figura 20. Puntaje DOZN para los principios 4, 5, 10 y 11 evaluados para cada operación unitaria en la ruta hidrometalúrgica.

El principio 11 se mantiene invariante para todas las operaciones unitarias de esta ruta de procesamiento ya que ninguno considera un mecanismo de control que haya sido evaluado. En la Figura 20 se observa que el principio 4 es mayor para SX en comparación al resto de las operaciones, esto se debe también al mayor factor H resultante de los materiales en SX como se menciona anteriormente.

4.3. Indicadores de consumo de agua, energía y GEI

En esta sección se presentan indicadores adicionales que permiten considerar otros aspectos relevantes para evaluar el nivel de sostenibilidad que poseen los procesos clásicos de producción de cobre, como son el uso de agua, consumo de energía y emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Los resultados presentados están basados en los reportes de Cochilco más recientes para estos 3 ámbitos mencionados (Cochilco, 2020; Cochilco, 2017).

4.3.1. Consumo de agua

Sheldon (2018) indica que incluir agua en el cálculo del factor E (indicador que mide el nivel de desechos generados) podría resultar en sesgos de los resultados. De esta forma procesos más limpios que utilicen grandes cantidades de agua podrían parecer tener un mayor impacto ambiental que procesos alternativos que generan grandes cantidades de desechos, pero utilizando menos agua. Para clarificar lo anterior, se calcula el uso de agua en cada ruta de procesamiento según los consumos unitarios (Cochilco, 2020) como se muestra en la Tabla 19. Cabe destacar que en el caso de la ruta pirometalúrgica el resultado corresponde a una estimación que no incluye el uso de agua en la fundición (operaciones de fusión, conversión y refinado a fuego) dado que solo se proporciona el coeficiente unitario para las concentradoras que es donde es mayor el consumo. A pesar de lo anterior, la contribución en el uso de agua en los procesos no considerados es menor como presenta el reporte de Cochilco donde se señala la distribución porcentual de las aguas según proceso minero para el año 2019. Esta distribución otorga un 64[%] del uso de agua en concentración, un 14[%] de hidrometalurgia y solo un 3[%] en fundición y refinación.

Tabla 19. Consumo de agua en las rutas de procesamiento evaluadas.

Fuente de agua [m^3]	Ruta Pirometalúrgica	Ruta Hidrometalúrgica
Agua continental	48.9	28.4
Agua salada o de terceros	21.7	6.7
Total	70.6	35.1

Como se observa en la Tabla 19, el consumo de agua en el procesamiento de sulfuros es cercano al doble del consumo de agua en la ruta hidrometalúrgica. Destaca la gran cantidad de agua salada o de terceros en pirometalurgia, esto se debe al creciente uso de agua de mar (desalada o directamente) en los procesos dado la escasez que presentan las fuentes de agua superficiales y subterráneas junto con el impacto ambiental que genera su consumo sobre los ecosistemas.

4.3.2. Consumo de energía

El consumo de energía en la minería del cobre proviene principalmente de 2 fuentes, calor generado a partir de combustibles y energía eléctrica. La Tabla 20 muestra el consumo unitario de energía en cada ruta de procesamiento y su desglose entre aquella que es producto de combustibles y la energía eléctrica. Las operaciones consideradas corresponden a la estructuración que realiza Cochilco (2018) en su reporte de consumo de energía. Este alcance es similar al considerado en la evaluación de la química verde de las rutas de procesamiento ya que en hidrometalurgia se consideran las mismas operaciones unitarias (aglomeración, lixiviación, SX y EW) y en el caso del procesamiento de sulfuros se incluyen las etapas posteriores al chancado primario (chancado secundario y terciario, molienda, filtros, etc), además del secado de concentrado previo a la fundición.

Tabla 20. Consumo de energía por tonelada de cobre en las rutas de procesamiento evaluadas.

Operaciones	Energía combustibles [MJ/t Cu]	Energía electricidad [MJ/t Cu]	Energía total [MJ/t Cu]
Concentradora	361.8	12369.6	12731.4
Fundición	5234.6	3655.5	8890.1
Refinería	1898.1	1344.7	3242.8
Ruta pirometalúrgica	7494.1	17369.8	24864.3
Ruta hidrometalúrgica	2302.4	12429.2	14731.6

Esto permite tener un conocimiento más acabado del consumo de energía en el procesamiento de sulfuros ya que las etapas de conminución son las que más energía demandan en toda la línea de procesos, esto se evidencia en la Tabla 20 ya que el consumo de energía total en la concentradora abarca aproximadamente el 51[%] del consumo de energía total en la ruta pirometalúrgica. En el procesamiento de óxidos, el consumo de energía proviene principalmente de electricidad y el consumo total de energía es aproximadamente un 41[%] menor al consumo en la ruta pirometalúrgica. De forma paralela se calcula la energía consumida por ruta empleando coeficientes unitarios en relación a la masa de mineral (o concentrado según corresponda) procesado, se emplea la masa de mineral obtenida para cada ruta de procesos junto con la masa de concentrado calculada y se obtiene un consumo de 21118.9[MJ] en la ruta pirometalúrgica y 11187.6[MJ] en la ruta hidrometalúrgica, estos resultados no consideran la etapa de ER en la ruta de alta temperatura por lo que el consumo de energía asociado esta subestimado, no obstante, se obtiene la misma tendencia mencionada anteriormente en base a la diferencia del consumo de energía entre ambas rutas.

Debido a los procesos de alta temperatura, el uso de combustibles es mayor en el procesamiento de sulfuros, lo cual genera un mayor impacto ambiental debido a la mayor emisión de GEI. Además, cabe destacar que el proceso más intensivo en el uso de combustibles en la extracción por método rajo (80.1[%] del total de combustibles usados en minería) ya que los vehículos mineros consumen una gran cantidad de combustibles, la fundición es el siguiente proceso de mayor demanda de este material (Cochilco, 2020).

4.3.3. Emisión de GEI

Las emisiones de gases de efecto invernadero son calculadas considerando aquellas emisiones directas por el efecto del uso de combustibles e indirectas. Las emisiones indirectas en la minería del cobre son el resultado del consumo total de electricidad y de la composición de la matriz nacional de generación eléctrica al que está conectado, esta se compone de fuentes altas en emisiones de GEI como las termoeléctricas a carbón o diésel, la energía hídrica, y también de energías renovables no convencionales con nula o bajas emisiones de GEI (Cochilco, 2020).

Tabla 21. Emisión de GEI en las rutas de procesamiento evaluadas.

Tipo de emisión [kg CO ₂ eq/t Cu]	Ruta Pirometalúrgica	Ruta Hidrometalúrgica
Directa	330	170
Indirecta	1957	1400
Total	2287	1570

Las emisiones indirectas se calculan empleando un factor de 0.4056[tCO₂eq/MWh], que corresponde al obtenido para el año 2019 en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). En la Tabla 21 se observa que la ruta pirometalúrgica tiene un GWP considerablemente mayor al obtenido para la ruta alternativa con emisiones directas e indirectas también mayores. La mayor emisión directa de GEI en el procesamiento de sulfuros se debe principalmente a que, como se muestra en la sección anterior, esta ruta presenta un mayor uso de energía proveniente de combustibles. La mayor emisión indirecta se debe a que el consumo de energía eléctrica es también mayor al correspondiente en la ruta hidrometalúrgica, generando consecuentemente mayores emisiones producto del consumo de electricidad.

4.4. Efecto de parámetros operacionales en DOZN

Con el propósito de visualizar posibles oportunidades y algunos riesgos con relación al rendimiento químico verde de las rutas de procesamiento evaluadas, en esta sección se presentan las variaciones del puntaje global DOZN en cada ruta ante cambios en los parámetros operacionales considerados en cada operación unitaria, los gráficos presentados solo incluyen parámetros cuyo cambio modifica en al menos un 1[%] el puntaje global y los rangos empleados en cada ruta de procesamiento se muestran en la Tabla 15 y Tabla 16.

4.4.1. Variaciones en ruta hidrometalúrgica

En la lixiviación de óxidos de cobre, los parámetros asociados al consumo de ácido o concentraciones de cobre y ácido en el refino no presentan variaciones considerables en el puntaje global de esta ruta de procesamiento.

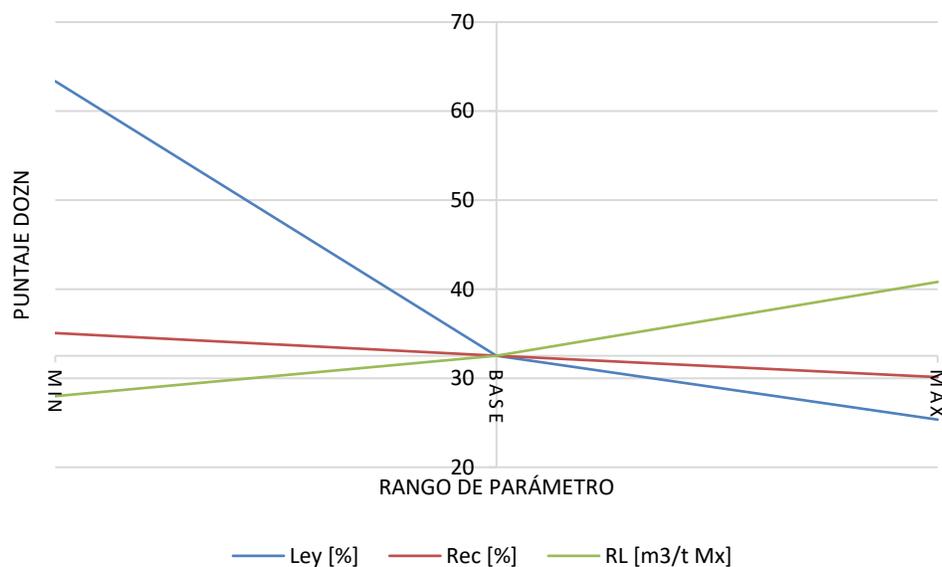


Figura 21. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de lixiviación.

Los únicos parámetros de lixiviación que presentan variaciones considerables en el puntaje global son la recuperación, ley del mineral y la razón de lixiviación (RL). Si bien es posible mejorar la recuperación de cobre en la lixiviación, también depende de la mineralogía ya que en esta operación el mineral lixiviado generalmente contiene también sulfuros de cobre además de los óxidos.

Por otra parte, la ley del mineral es una característica intrínseca del yacimiento minero del cual se extrae y por ende no se puede controlar. En la Figura 21 se observa que un aumento en la ley del mineral o recuperación disminuye el puntaje global DOZN de la ruta de procesamiento. Esto se debe a que un aumento en alguno de estos parámetros disminuye la masa de mineral a lixiviar requerida para producir una tonelada de cobre fino. El grado de mejora en el rendimiento químico verde para la ley y recuperación máximas consideradas son de un 22.1[%] y 7.4[%] respectivamente. Por otra parte, una disminución en RL implica un mejor rendimiento químico verde ya que se agrega una menor masa de refino por tonelada de mineral a lixiviar. El valor mínimo considerado para este parámetro genera un 13.9[%] de disminución en el puntaje global DOZN. Cabe destacar que el mayor riesgo observado en esta operación está asociado al menor valor de ley (Figura 23), donde el puntaje global DOZN aumenta en un 94.8[%] con relación al caso base analizado.

Dado que los rangos de estos parámetros se obtienen en base a operaciones que emplean el método de lixiviación en pilas (permanentes o dinámicas), cabe destacar que un proceso de lixiviación ROM, caracterizado por menores leyes y recuperaciones tendría un puntaje global DOZN aún mayor que los casos extremos considerados, es decir, un proceso de lixiviación en pilas tiene intrínsecamente un mejor rendimiento químico verde que una lixiviación ROM bajo este método de evaluación.

Dentro de los parámetros considerados en SX, la Figura 22 presenta aquellos que más influyen en el puntaje global DOZN. Los parámetros que presentan una mayor oportunidad de mejora en el rendimiento químico verde son la concentración de cobre en el electrolito proveniente de EW y la concentración de cobre en el PLS que ingresa, bajo los valores máximos de estos parámetros (43 y 6.5 respectivamente) el puntaje global DOZN presenta una disminución de un 7.2 y 5.6[%] respectivamente. Un aumento en la concentración de cobre en el PLS genera una mayor tasa de extracción, por lo tanto el tiempo requerido para producir una tonelada de cobre disminuye y por consiguiente disminuye el principio 6 (eficiencia energética), además la disminución en el tiempo genera una menor masa de orgánico necesaria para el proceso lo cual se traduce en una disminución en la masa de diluyente requerido y con esto menores valores para los principios incluidos en el uso de recursos y reducción de peligros humanos.

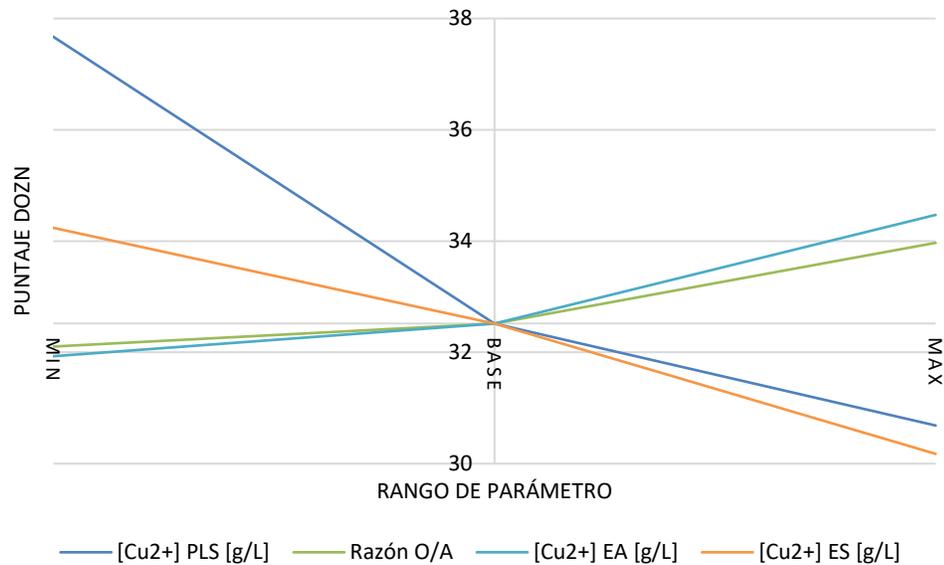


Figura 22. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de SX.

La mejora en el nivel de química verde provocada por un aumento en la concentración de cobre en el electrolito gastado se debe a que, dada la tasa de extracción del caso base de evaluación, este aumento de concentración produce un aumento en el flujo de electrolito en el *stripping* y, por consiguiente, aumenta la masa de cobre producida en el electrolito avanzado (EA) y la masa de cobre recirculada en el electrolito gastado (ES). El efecto anterior provoca una reducción en el valor de la mayoría de los principios de la química verde de este proceso debido a un efecto combinado entre la mayor recirculación (mejor rendimiento del principio 2) y mayor eficiencia en el uso de recursos al generar una mayor proporción de productos con relación a los materiales empleados para lograrlo.

Los valores mínimos para la concentración de cobre en el EA y para la razón O/A generan mejoras en el rendimiento químico verde asociadas a un 1.8 y 1.3[%], respectivamente, de disminución en el puntaje global de la ruta de procesamiento. Una baja en la razón O/A considerando el flujo de PLS base se traduce en un menor flujo de orgánico y a su vez una menor masa requerida de extractante y diluyente, favoreciendo la reducción de materiales empleados y en particular de la de materiales peligrosos para la salud humana. El mayor riesgo observado en los parámetros de SX corresponde al aumento de 15.8[%] en el puntaje global de la ruta hidrometalúrgica al emplear el valor mínimo de concentración de cobre en el PLS.

La operación de EW es la que presenta las mayores oportunidades con relación a las variaciones de sus parámetros operacionales. Los valores máximos para el número de cátodos (80), área catódica (1.26), intensidad de corriente (340) y eficiencia de corriente (92) generan una disminución en el puntaje global de 15.3, 14.1, 9.9 y 3.2[%], respectivamente como se muestra en la Figura 23. Esto se debe a que un aumento en estos parámetros genera una disminución en el tiempo requerido para producir una tonelada de cobre y a su vez una disminución en el principio 6, cuyo valor es el más influyente de los principios de la química verde en este proceso.

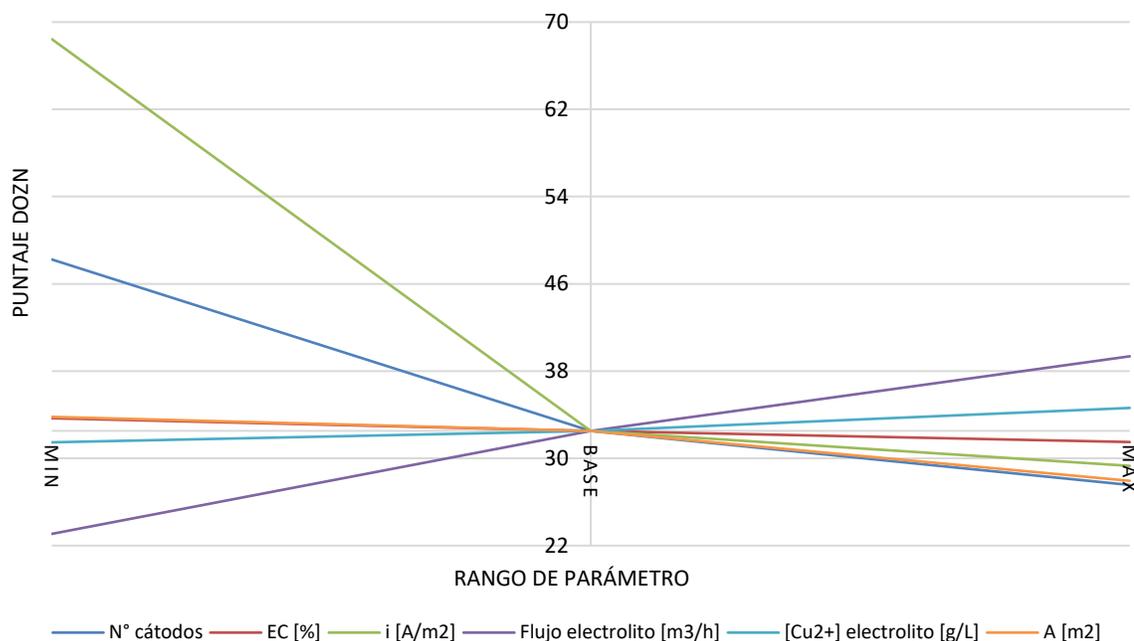


Figura 23. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de EW.

Como la masa de cobre en el electrolito está determinada en base al flujo respectivo y el tiempo, una disminución en la concentración de cobre en el electrolito genera una disminución en el puntaje global (3.2[%] en su valor mínimo) debido a una menor masa de cobre empleada. De igual forma, disminuir el flujo de electrolito implica emplear una menor cantidad de agua y cobre disuelto en el proceso, el flujo mínimo considerado genera una mejora en el rendimiento químico verde de un 29[%] para la ruta de procesamiento. Cabe destacar que la masa de aditivos agregados en este proceso no impacta en el rendimiento químico verde ya que su valor es muy bajo en comparación a la masa de cobre disuelto que ingresa.

Con relación a los riesgos destacan la intensidad de corriente y el número de cátodos, cuyos valores mínimos generan un aumento del puntaje global de un 110 y 48[%], respectivamente. Estos valores se producen dado el amplio rango de estos parámetros en comparación al promedio considerado (Tabla 16). Es importante mencionar que, si bien la disminución del flujo de electrolito resulta ser el parámetro de mayor influencia en esta operación, no es una práctica común dado que implica disminuir la producción al procesar una menor masa de cobre en solución.

4.4.2. Variaciones en ruta pirometalúrgica

En la flotación de la pulpa mineral, los reactivos empleados para mejorar las condiciones del proceso tienen una baja dosificación en comparación a la masa de mineral que ingresa, por esta razón la masa de xantato, MIBC y cal agregadas no influye en el rendimiento químico verde del procesamiento de sulfuros.

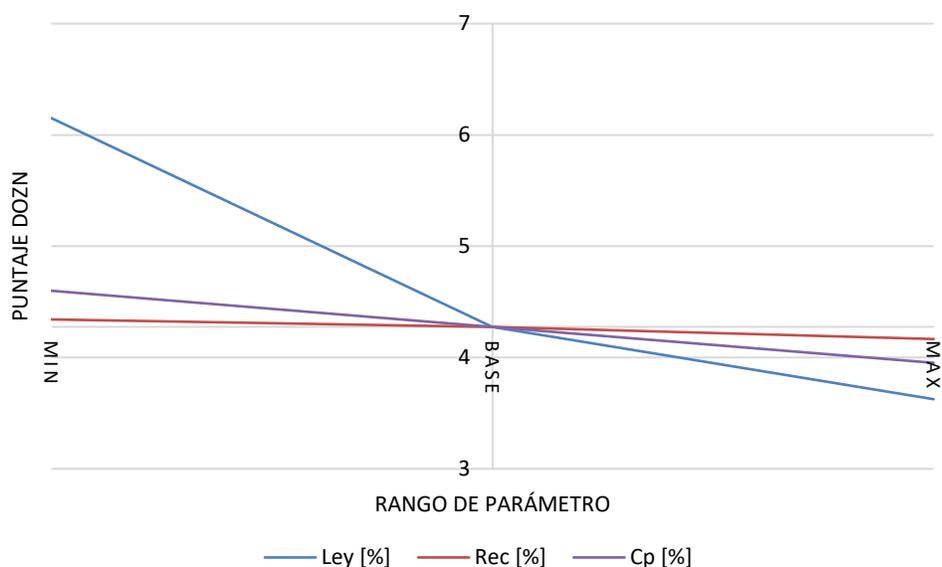


Figura 24. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta pirometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de flotación.

La Figura 24 muestra el impacto de la recuperación, la ley de cobre y el porcentaje de sólidos en el puntaje global DOZN de la ruta pirometalúrgica, se observa que un aumento en estos parámetros genera una mejora en el rendimiento químico verde. La oportunidad de mejora en el nivel de química verde se traduce en un 15.2[%] para la ley, un 2.6[%] en la recuperación y un 7.6[%] en el porcentaje de sólidos. Esto se debe a que la ley y recuperación, al igual que en la ruta hidrometalúrgica, influyen directamente en la masa de mineral que se requiere para producir una tonelada de cobre fino.

Además, un mayor porcentaje de sólidos empleado para producir una tonelada de cobre implica un menor uso de agua, generando una disminución en la masa de materiales requeridos en la operación. Los parámetros que generan la mayor disminución en el puntaje global para este proceso son también los que generan el mayor aumento bajo sus rangos mínimos. En efecto, el valor mínimo para la ley de cobre genera un aumento de un 43.9[%] y el valor mínimo para el porcentaje de sólidos genera un aumento de un 7.6[%].

Las etapas de fusión, conversión y refino a fuego no son intensivas en el uso de materiales, por lo que las variaciones en sus respectivos parámetros considerados no modifican el puntaje global DOZN de la ruta de procesamiento.

Los parámetros de mayor influencia en el proceso de ER presentan niveles de mejora en la química verde similares bajo sus parámetros favorables como se muestra en la Figura 25. Dentro de los parámetros de influencia, el tiempo requerido para la reacción, el número y área de cátodos son los que generan un mayor impacto. Emplear una mayor cantidad de cátodos o ampliar el área catódica mejoran el rendimiento químico verde en un 7.1 y 5.8[%], respectivamente, considerando sus valores máximos. Considerando la razón másica entre ánodos requeridos por tonelada de cátodo (Razón a/c), su valor mínimo genera una disminución de un 5.8[%] en el puntaje global. Los cambios en esta razón dependen principalmente del porcentaje de *scrap* que se obtiene de este proceso, mientras mayor sea, implica que una menor masa de ánodos fue requerida para la producción de cátodos y con ello se mejora el uso de recursos en este proceso.

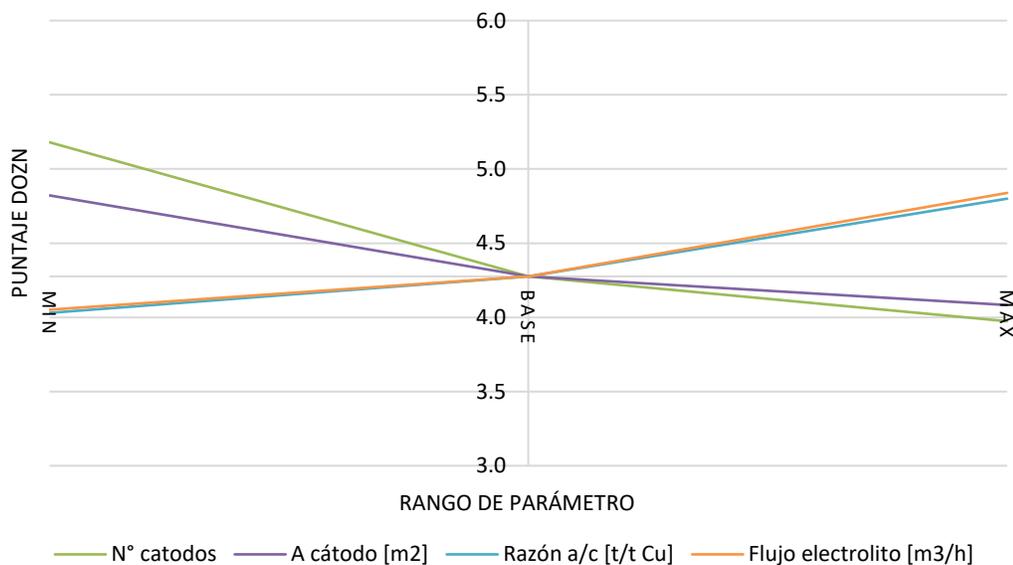


Figura 25. Variaciones en el puntaje global DOZN para la ruta pirometalúrgica según cambios en los parámetros operacionales de ER.

Una disminución en el flujo de electrolito en la celda, considerando el tiempo base de reacción en esta operación, genera una mejora en el nivel de química verde debido a la menor masa de materiales auxiliares empleados, en particular, de electrolito. El flujo mínimo genera una mejor de un 5.3[%]. El principal riesgo se observa en el número de cátodos mínimo, cuyo valor aumenta el puntaje global en un 21.1[%].

Al igual que el proceso de EW, en ER la masa de aditivos que ingresan no tiene influencia en el rendimiento químico verde ya que su proporción es menor con relación a la masa de ánodos.

4.5. Evaluación de Química Verde en ruta alternativa

En esta sección se estudia el nivel de química verde de una ruta de procesamiento alternativa a las dos anteriormente mencionadas. Esta ruta de procesamiento está compuesta por las operaciones unitarias de flotación, lixiviación presurizada a alta temperatura y cementación. El objetivo es evitar el elevado valor de química verde obtenido anteriormente en la etapa de EW y lixiviación (Figura 14) para la ruta hidrometalúrgica, esto se logra procesando el concentrado obtenido en flotación en autoclaves para generar un PLS que posteriormente es enviado a precipitadores de cono, por ejemplo, para realizar la purificación del PLS en la etapa de cementación, obteniendo un producto de menor ley de cobre pero con un menor nivel de química verde en comparación a la ruta clásica de hidrometalurgia para la obtención de cobre.

Tabla 22. Datos operacionales de lixiviación presurizada de cobre (Schlesinger M. et al., 2011).

Parámetro	Kansanshi, Zambia
Ley de concentrado [%]	23-27
Temperatura [°C]	220
Presión de operación [kPa]	3000
C _p [%]	45-50
Consumo de ácido [kg/t Mx]	1.9
Recuperación [%]	99
Lixivante	
H ₂ SO ₄ [g/L]	64-66
Cu [g/L]	<1.3
Flujo [m ³ /h]	75-90
PLS	
H ₂ SO ₄ [g/L]	56-62
Cu [g/L]	20-25
Flujo [m ³ /h]	80-110

La Tabla 22 y Tabla 23 presentan los datos operacionales empleados para el balance de masa en la lixiviación presurizada y cementación, respectivamente. La operación en Zambia procesa concentrados de cobre obtenidos desde flotación en autoclaves a alta presión y temperatura. Por otra parte, en Pelambres se procesa concentrado de molibdeno en una lixiviación férrica para disminuir el contenido de cobre en el concentrado, el PLS obtenido es tratado en la etapa de cementación para recuperar cobre a través del cemento obtenido y recircular el flujo resultante.

Tabla 23. Datos operacionales de cementación de cobre (Fredes, 2015).

Parámetro	Pelambres, Chile
Volumen solución [m ³]	5
Tiempo de reacción [h]	1
Eficiencia [%]	90
Consumo de chatarra [kg Fe/kg Cu ²⁺]	1.3
Ley de cemento [%]	90
[Cu ²⁺] en PLS [g/L]	30
Temperatura inicial [°C]	20
Temperatura máxima [°C]	60

Los datos presentados corresponden a una operación en particular en cada caso y el sistema de procesamiento completo de cada una no responde a la ruta de procesamiento planteada en esta sección, no obstante, son útiles para realizar el cálculo de producción de una tonelada de cobre fino en cada caso.

Considerando los parámetros presentados anteriormente y empleando cálculos similares a los aplicados para obtener el balance de masa de las operaciones unitarias descritas en la Sección 4.1.2. se obtienen los materiales de entrada y salida de cada operación. Al realizar la evaluación de la química verde en el *software*, se obtiene un valor de 3.09, menor al obtenido para ambas rutas clásicas de obtención de cobre evaluadas anteriormente. Los valores obtenidos por principio y categorías se muestran en el Anexo 2 (Tabla 28).

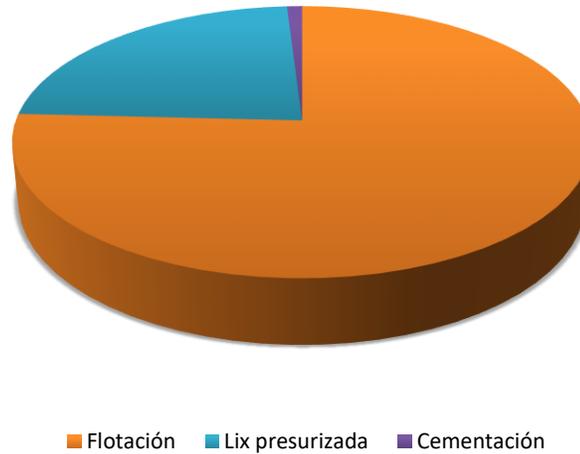


Figura 26. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en la ruta de procesamiento alternativa (Flotación: 75.8[%]; Lix. Presurizada: 23.2[%]; Cementación: 1[%]).

La Figura 26 presenta la influencia de las operaciones unitarias consideradas en el puntaje global de la ruta de procesamiento completa, se observa que al igual que en el procesamiento convencional de sulfuros, la flotación es la operación que más contribuye al puntaje global. Esto se da debido a que es un proceso más intensivo en el uso de materiales en comparación el resto de las operaciones unitarias consideradas. La cementación de cobre con chatarra de fierro resulta ser el proceso con mejor rendimiento químico verde dado por un puntaje global de 0.03.

Esta ruta alternativa evaluada presenta una gran oportunidad al plantear, bajo el análisis en DOZN 2.0, que su nivel de química verde es mejor que el de las rutas clásicas de procesamiento de sulfuros y óxidos de cobre. Cabe destacar que si bien se obtiene un producto de menor calidad en la ruta alternativa propuesta (cemento de cobre), se mantiene el supuesto de producir una tonelada de cobre fino en cada etapa de la ruta de procesamiento.

4.6. Integración de operaciones unitarias

En la Sección 4.2. se presentan los resultados para la evaluación del rendimiento químico verde por cada ruta de procesamiento evaluada y desglosada por cada operación unitaria que la compone. En la evaluación señalada se considera la producción de una tonelada de cobre fino en cada operación, el tiempo requerido, sin embargo, difiere para cada proceso como muestran la Tabla 17 y Tabla 18.

En esta sección se analizan las variaciones en el nivel de química verde de las rutas hidrometalúrgica y pirometalúrgica ante cambios en los tiempos de producción de algunas operaciones unitarias de modo que la producción de una tonelada de cobre fino se lleve a cabo a tiempos similares para cada proceso que compone la ruta de procesamiento determinada. La mayor diferencia se encuentra en las operaciones de ER y EW, que tienen un tiempo de 30.2[h] y 26.5[h], respectivamente, el resto de las operaciones tienen órdenes de magnitud similares en el tiempo. Es por esta razón que corrigiendo los tiempos de producción de estas dos operaciones es posible analizar la variación de los resultados al considerar tiempos similares de producción en todas las operaciones unitarias.

La diferencia de tiempo en los procesos de electrometalurgia se debe a que se considera la producción del cátodo de cobre en una celda electrolítica. El aumento en la velocidad de producción se obtiene aumentando la cantidad de celdas empleadas y esto a su vez se calcula imponiendo que el tiempo para producir una tonelada de cobre en cada celda sea el mismo tiempo obtenido para las operaciones más rápidas. En particular se considera el tiempo de fusión (0.03[h]) para calcular las celdas en ER y el tiempo de SX (0.06[h]) para calcular las celdas en EW. Considerando las velocidades de producción respectivas y redondeando la cifra para obtener un número entero de celdas, se obtienen 1105 celdas en ER y 439 celdas en EW.

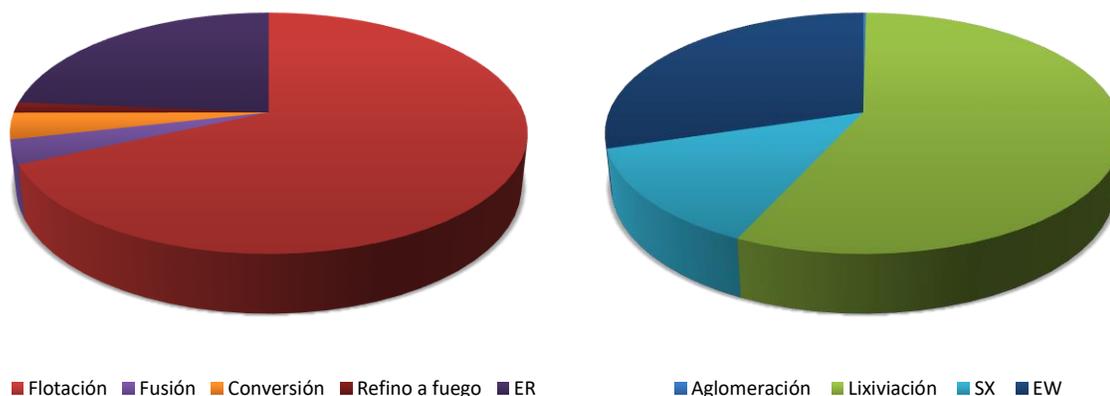


Figura 27. Distribución de puntaje global DOZN según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento con tiempo ajustado para ER y EW (Flotación: 68.2[%]; Fusión: 3.2[%]; Conversión: 3.6[%]; Refino: 1.4[%]; ER: 23.6[%]; Aglo: 0.2[%]; LIX: 56.6[%]; SX: 13.4[%]; EW: 29.7[%]).

Estos valores se encuentran dentro del rango obtenido en el *benchmarking* presentado en la Tabla 11 y Tabla 14 para los procesos de ER y EW, respectivamente, donde el promedio de celdas empleadas es de 1130 para ER y 393 en EW.

La Figura 27 presenta los resultados obtenidos en el rendimiento químico verde de las dos rutas de procesamiento luego del ajuste en los procesos de ER y EW, el puntaje global DOZN para la ruta hidrometalúrgica se reduce a 24.1 y para la ruta pirometalúrgica se reduce a 3.4 (Figura 14 proporciona los resultados de la evaluación inicial). La participación de ER en la ruta pirometalúrgica disminuye de un 39[%] a un 24[%] debido al menor valor en el principio de eficiencia energética (principio 6), mientras que en la ruta hidrometalúrgica la participación de EW disminuye de un 48[%] hasta un 30[%] debido a la misma razón que para ER.

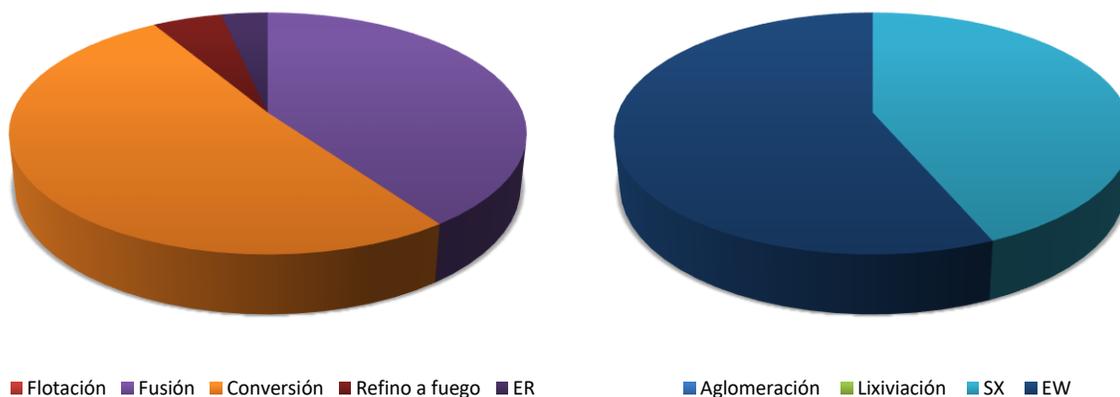


Figura 28. Distribución de puntaje en la categoría de eficiencia energética según operaciones unitarias en cada ruta de procesamiento con tiempo ajustado para ER y EW (Flotación: 0[%]; Fusión: 40.2[%]; Conversión: 51.3[%]; Refino: 5.1[%]; ER: 3.4[%]; Aglo: 0[%]; LIX: 0[%]; SX: 43.5[%]; EW: 56.5[%]).

Los cambios mencionados modifican en gran medida la contribución de cada operación unitaria a la ruta de procesamiento respectiva en la categoría de eficiencia energética, como se observa en la Figura 28. La operación de ER pasa de ser el proceso con peor desempeño en la eficiencia energética a ser la operación de mejor desempeño con un valor de 0.04 en esta categoría, aportando solo un 3.4[%] al resultado global de la ruta de procesamiento en C2, a diferencia del 97[%] que tenía previo al ajuste realizado en ER (Figura 15). Las operaciones de conversión y fusión son las que obtienen el peor rendimiento en la eficiencia energética para el procesamiento de sulfuros representando el 51[%] y 40[%], respectivamente. En la ruta hidrometalúrgica el proceso de EW continúa siendo el proceso de mayor participación en C2, sin embargo, considerando el cambio en la velocidad de producción, su valor se reduce de 420.5 a 0.96 (puntaje C2). Dado esto EW contribuye en un 56.5[%] al puntaje C2 del procesamiento de óxidos, dejando a SX con un 43.5[%], muy superior a la participación que tenía antes dado la disminución en la magnitud de EW. Los valores específicos para los principios y categorías asociados a los procesos de EW y ER, así como también los cambios generados en los valores del puntaje global de las rutas de procesamiento respectivas se presentan en el Anexo 2 (Tabla 27).

5. Conclusiones

Evaluar los impactos ambientales generados por el procesamiento y metalurgia extractiva del cobre es una labor compleja dado que existe una gran variedad de métodos para este propósito y la mayoría requiere de una amplia recolección de datos como es el caso del método LCA empleado en este reporte.

La ruta pirometalúrgica presenta un mejor rendimiento químico verde dado por un puntaje global en el *software* DOZN 2.0 de 4.3, menor en comparación al resultado obtenido para la ruta hidrometalúrgica que corresponde a 32.5. De igual forma el procesamiento de sulfuros obtiene mejores rendimientos en las 3 categorías abordadas al igual que en todos los principios de la química verde con excepción de los principios 4 y 10. Las operaciones de flotación y ER son las que más influyen en el nivel de química verde de la ruta de procesamiento con un 54.8 y 38.7[%] de participación en el puntaje global para cada operación. Estas mismas operaciones son las de mayor impacto en las categorías de uso de recursos y reducción de peligros. La operación de ER abarca un 97[%] de la categoría de eficiencia energética. En la ruta hidrometalúrgica, las operaciones de EW y lixiviación son las que más contribuyen al nivel de química verde con un 48 y 42[%] del puntaje global, respectivamente. Esta tendencia se mantiene en las categorías 1 y 2 pero con creciente participación de SX en C2. La operación de EW representa el 99[%] de la categoría de eficiencia energética. Con relación a los indicadores adicionales calculados, la ruta pirometalúrgica requiere de aproximadamente 70.6[m³] de agua en comparación al requerimiento de 35.1[m³] por parte de la ruta alternativa, para producir una tonelada de cobre. El consumo de energía es también mayor en el procesamiento de sulfuros con un consumo unitario de 24.9[GJ/t Cu] mientras que para la ruta hidrometalúrgica se estima en el consumo en 14.7[GJ/t Cu]. Las GWP para la ruta de alta temperatura es de 2.29[t CO₂eq] y de 1.57[t CO₂eq] en el procesamiento de óxidos. Los parámetros de mayor potencial para mejorar el nivel de química verde de la ruta hidrometalúrgica son el número de cátodos, área catódica, ley del mineral, intensidad de corriente, concentración de cobre en el electrolito gastado y razón de lixiviación con porcentajes de mejora que van de 7.2 a 22.1[%] de reducción en el puntaje global de la ruta de procesamiento. En la ruta pirometalúrgica los parámetros que generan un mejor rendimiento químico verde son la ley del mineral, el porcentaje de sólidos, el número de cátodos y la razón másica de ánodo por tonelada de cátodo, las mejoras en el nivel de química verde van de 5.8 a un 15.2[%] de reducción del puntaje global. El análisis de los parámetros operacionales indica que la ruta hidrometalúrgica aún tiene un amplio margen de mejora en el rendimiento químico verde, mayor al de la ruta alternativa, principalmente en EW, tanto en el grado de mejora como en la cantidad de parámetros que lo permiten.

6. Recomendaciones

La metodología empleada en el cálculo del nivel de química verde en las rutas de procesamiento pirometalúrgica e hidrometalurgia abarca la metalurgia extractiva del cobre en sus principales operaciones unitarias desde el procesamiento de minerales, no obstante, la inclusión de los procesos mineros permitiría un análisis a lo largo de toda la cadena productiva, incluyendo los desechos generados en el material estéril removido de la mina y la aplicación de materiales adicionales que pudieran impactar en la salud humana y el medio ambiente como por ejemplo los explosivos empleados en tronadura.

En el consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero, es relevante la inclusión de nuevas tecnologías de fusión que favorecen el uso de energía eléctrica sobre el uso de combustibles y poseen mayor eficiencia energética, induciendo menores consumos totales de energía y menores emisiones de GEI directos. A modo de ejemplo, Coursol et al. (2015) evalúa el consumo unitario de energía eléctrica y combustible para distintas combinaciones de equipos que permiten fundir un concentrado de cobre y generar ánodos. De esta forma cambiando los equipos empleados en las operaciones unitarias, es posible lograr menores consumos de energía y generar menores emisiones de GEI. Finalmente, cabe mencionar que la inclusión de energías renovables no convencionales es una forma de cambiar la composición de la matriz de energía empleada para lograr una menor emisión de GEI indirecto por concepto de consumo de energía y GEI directo al disminuir el consumo de combustibles.

7. Glosario

En este glosario se mencionan los factores empleados en las métricas aplicadas por el *software* DOZN 2.0 para el cálculo de los principios de la química verde, se detallan los rangos de valores que estos factores pueden tener.

- Gravedad de residuos: factor aplicado al principio 1 de prevención de desechos. Su valor va de 0.5 hasta 10 siendo 0.5 un desecho menos peligroso y 10 el más peligroso.
- Factores SF_T y SF_P: estos son los factores de seguridad para la temperatura y presión. Sus valores van de 0 hasta 5 según el aumento en estos parámetros.
- Factor H: se determina a partir de los puntos finales (factor E) de toxicidad para la salud humana de cada material considerado. Los factores E se encuentran en el SGA, el mayor factor E corresponde al factor H que se emplea en el cálculo de los principios 3, 4 y 5. Su valor va de 1 hasta 4.
- Factor B: corresponde al factor de bioacumulación empleado para el cálculo del principio 10. Su valor se determina mediante la información encontrada en la hoja de seguridad del material, particularmente en las secciones 2.1 y 12 donde se proporciona la información asociada a la categoría correspondiente en el SGA que permite obtener el factor B según la Tabla 24. Su valor va de 1 hasta 4 siendo 4 el material que mayor peligro ambiental representa.

Tabla 24. Criterios de decisión sobre toxicidad acuática para determinar factor B.

Elementos	GHS Categoría 1	GHS Categoría 2	GHS Categoría 3	GHS Categoría 4
Toxicidad acuática aguda	≤1.00 mg/l	>1.00 pero ≤ 10.0 mg/l	>10.0 pero ≤100.0 mg/l	>100 mg/l
Toxicidad acuática crónica, NOEC (pescado, dafnia)	≤1.00 mg/l	>1.00 pero ≤10.0 mg/l	>10.0 pero ≤100.0 mg/l	>100 mg/l
Factor B	4	3	2	1

- Factor P: corresponde al factor empleado en el cálculo del principio 12. Se determina basándose en los puntos finales (factor Z) para peligros físicos del SGA incluyendo explosividad, inflamabilidad, entre otros. El factor P es el mayor factor Z considerando todos los materiales. Su valor va de 1 hasta 4.

8. Bibliografía

Anastas P. y Warner J. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.

Anastas P. y Williamson T. (1996). *Green Chemistry: An Overview*.

Andraos J. (2016). *Critical Evaluation of Published Algorithms for Determining Environmental and Hazard Impact Green Metrics of Chemical Reactions and Synthesis Plans*.

Andraos J. (2016). *Critical Evaluation of Published Algorithms for Determining Material Efficiency Green Metrics of Chemical Reactions and Synthesis Plans*.

Andraos (2018). *Useful tools for the next quarter century of green chemistry practice: A dictionary of terms and a data set of parameters for high value industrial commodity chemicals*.

Azapagic A. (2004). *Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry*.

Caffery G., Shook A., Grace J., Samarasekera I. y Meadowcroft T. (2000). *Comparisons between sulfide flash smelting and coal combustion*.

Cochilco (2018). *Estadísticas consume de energía de la minería del cobre al año 2017*.

Cochilco (2018). *Producción chilena de cobre por producto [base de datos]*.

Cochilco (2018). *Producción cobre de fundición mundial y Chile [base de datos]*.

Cochilco (2018). *Producción cobre de mina mundial y Chile [base de datos]*.

Cochilco (2018). *Producción cobre refinado mundial y Chile [base de datos]*.

Cochilco (2020). *Consumo de agua en la minería del cobre al 2019*.

Cochilco (2020). *Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2019*.

Cochilco (2020). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019*.

Coursol P., Mackey P., Kapusta J. y Cardona N. (2015). *Energy consumption in copper smelting: A new Asian horse in the race*.

Dhanwan N., Safarzadeh M., Miller J., Moats M. y Rajamani R. (2012). *Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations.*

Fredes S. (2015). *Diseño de mejores prácticas operacionales en el procesamiento de concentrados de molibdeno para minera los pelambres.*

Fuentes M., Negrete M., Herrera-León S. y Kraslawski A. (2021). *Classification of indicators measuring environmental sustainability of mining and processing of copper.*

Gonzales T., Walters G. y White M. (2019). *Comparison of smelting technologies.*

Horvát I. (2018). *Introduction: Sustainable Chemistry.*

Horvát I. y Anastas P. (2007). *Introduction: Green Chemistry.*

Hosten C. y Tezcan A. (1990). *The influence of frother type on the flotation kinetics of a massive copper sulphide ore.*

Klimpel R. (2000). *Optimizing the industrial flotation performance of sulfide minerals having some natural floatability.*

Kreuder A., House-Knight T., Whitford J., Ponnusamy E., Miller P., Jesse N., Rodenborn R., Sayag S., Gebel M., Aped I., Sharfstein I., Manaster E., Ergaz I., Harris A. y Grice L. (2017). *A Method for Assessing Greener Alternatives between Chemical Products Following the 12 Principles of Green Chemistry.*

Lenoir D., Shramm K y Lalah J. (2021). *Green Chemistry: Some important forerunners and current issues.*

Lu J., Dreisinger D. y West-Sells P. (2016). *Acid curing and agglomeration for heap leaching.*

Moats M., Filzwieser A., Wang S., Davenport W., Siegmund A. y Robinson T. (2019). *Global survey of copper electrorefining: 2019 world tankhouse operating data.*

Moats M., Robinson T., Davenport W., Karcas G. y Demetrio S. (2007). *Electrolytic copper refining world tankhouse operating data.*

Moskalyk R. y Alfantazi A. (2003). *Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow.*

Naciones Unidas (2019). *Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos (SGA).*

- Nikoloski A. y Nicol M. (2008). *Effect of cobalt ions on the performance of lead anodes used for the electrowinning of copper – a literature review.*
- Nisbett A., Peabody S. y Crane P. (2009). *Concepts for developing high performing copper solvent extraction circuits.*
- Plotka-Wasyłka J., Mohamed H., Kurowska-Susdorf A., Dewani R., Fares M. y Andruch V. (2021). *Green analytical chemistry as an integral part of sustainable education development.*
- Poliakoff M., Licence P. y George M. (2018). *UN sustainable development goals: How can sustainable/green chemistry contribute? By doing things differently.*
- Robinson T., Davenport W., Moats M., Karcas G. y Demetrio S. (2007). *Electrolytic copper electrowinning - 2007 world tankhouse operating data.*
- Schlesinger M., King M., Sola K. y Davenport W. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper.* (5ta ed).
- Sheldon R. (2018). *Metrics of Green Chemistry and Sustainability: Past, Present, and Future.*
- Sole K. (2008). *Solvent extraction in the hydrometallurgical processing and purification of metals: process design and selected applications.*
- Sole K., Moats M., Sandoval S., Robinson T. y Davenport W. (2018). *Copper electrowinning: 2018 global survey of tankhouse operating practice and performance.*
- Sole K., Taute J., Tinkler O., Steeples J. y Zárate G. (2018). *Global survey of copper solvent extraction: 2018 operating data and practice.*
- Velarde G. (2005). *Agglomeration control for heap leaching processes.*
- Wang L., Yin S. y Wu A. (2020). *Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals.*
- Washnock R., Zarate G., y Scheffel R. (2016). *Copper leaching: 2014-2015 global operating data.*
- Watt L. y Kapusta J. (2019). *The 2019 copper smelting survey.*

9. Anexos

9.1. Anexo 1

La Figura 29 presenta la comparación entre la producción mundial y en Chile según distintos productos comercializables de la cadena de valor. Se observa la gran influencia en Chile de la producción de concentrado por sobre la producción de cátodos de cobre en ER y EW.



Figura 29. Producción mundial vs Chile, Total Mina=Concentrado+cátodo EW, Fundición=blíster y ánodos, Refinado=cátodos ER y cátodos EW (Modificado a partir de base de datos Cochilco, 2018).

9.2. Anexo 2

En este anexo se muestran los resultados obtenidos para la evaluación de la química verde mediante el *software* DOZN 2.0 en cada una de las operaciones unitarias evaluadas. Los resultados se encuentran divididos por ruta de procesamiento y se proporciona el valor de cada principio de la química verde considerado (se excluyen los principios 8 y 9), el valor de cada una de las tres categorías y finalmente el valor del puntaje global.

La Tabla 25 presenta los puntajes DOZN obtenidos para cada operación unitaria perteneciente a la ruta hidrometalúrgica, así como también el puntaje global. La Tabla 26 muestra los resultados correspondientes a la ruta pirometalúrgica.

Tabla 25. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta hidrometalúrgica.

Principio/Operación	Aglomeración	Lixiviación	SX	EW	Hidro
P1 (Prevención de desechos)	0	516.75	0	0	516.75
P2 (Economía atómica)	1.09	-451.22	86.37	395.92	32.16
P3 (Procesos menos peligrosos)	2.19	1060.69	305.76	396.92	1765.56
P4 (Productos más seguros)	2.04	2.05	3.31	2.00	9.40
P5 (Disolventes más seguros)	0	0	44.71	0	44.71
P6 (Eficiencia energética)	0	0	0.74	420.45	421.19
P7 (Materia prima renovable)	1.09	1008.24	131.18	395.92	1536.43
P10 (Degradación)	2.00	2.00	2.74	2.00	8.74
P11 (Análisis en tiempo real)	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00
P12 (Química más segura)	2.09	1009.24	175.57	396.92	1583.82
Categorías					
Mejorar uso de recursos	0.80	268.69	54.64	198.21	522.33
Mayor eficiencia energética	0	0	0.74	420.45	421.19
Reducción de peligros humanos y ambientales	1.66	414.80	106.42	159.57	682.45
Puntaje general	0.05	13.67	3.24	15.56	32.52

Tabla 26. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta pirometalúrgica.

Principio/Operación	Flotación	Fusión	Conversión	Refino a fuego	ER	Piro
P1 (Prevención de desechos)	73.61	2.51	0.73	0	0	76.84
P2 (Economía atómica)	108.04	3.29	3.97	1.00	37.19	153.49
P3 (Procesos menos peligrosos)	109.04	4.65	5.81	2.06	64.48	186.04
P4 (Productos más seguros)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.68	10.68
P5 (Disolventes más seguros)	0	0	0	0	0	0
P6 (Eficiencia energética)	0	0.47	0.60	0.06	42.24	43.37
P7 (Materia prima renovable)	108.04	3.65	4.81	1.06	37.48	155.04
P10 (Degradación)	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	10.01
P11 (Análisis en tiempo real)	1.00	0	0	1.00	1.00	3.00
P12 (Química más segura)	109.04	4.65	5.81	2.06	38.48	160.04
Categorías						
Mejorar uso de recursos	72.67	2.36	2.38	0.77	18.92	97.09
Mayor eficiencia energética	0	0.47	0.60	0.06	42.24	43.37
Reducción de peligros humanos y ambientales	44.42	2.66	3.12	1.63	21.53	73.35
Puntaje general	2.34	0.11	0.12	0.05	1.65	4.28

La Tabla 27 muestra los resultados obtenidos para los puntajes de cada principio, categoría y puntaje global, de las operaciones de ER y EW luego del ajuste en el tiempo de producción detallado en la Sección 4.6. Además, se presentan los resultados de las rutas de procesamiento respectivas con la modificación en los procesos mencionados, los puntajes asociados al resto de las operaciones unitarias corresponden a los valores de la Tabla 25 y Tabla 26.

Tabla 27. Puntajes DOZN obtenidos en ER y EW al ajustar el tiempo de producción.

Principio/Operación	ER	Piro	EW	Hidro
P1 (Prevención de desechos)	0	76.84	0	516.75
P2 (Economía atómica)	37.21	153.51	396.22	32.46
P3 (Procesos menos peligrosos)	64.52	186.08	397.22	1765.86
P4 (Productos más seguros)	2.68	10.68	2.00	9.40
P5 (Disolventes más seguros)	0	0	0	44.71
P6 (Eficiencia energética)	0.04	1.17	0.96	1.70
P7 (Materia prima renovable)	37.50	155.06	396.22	1536.73
P10 (Degradación)	2.00	10.01	2.00	8.74
P11 (Análisis en tiempo real)	1.00	3.00	1.00	4.00
P12 (Química más segura)	38.50	160.06	397.22	1584.12
Categorías				
Mejorar uso de recursos	18.93	97.10	198.36	522.48
Mayor eficiencia energética	0.04	1.17	0.96	1.70
Reducción de peligros humanos y ambientales	21.54	73.37	159.69	682.57
Puntaje general	0.81	3.43	7.18	24.14

Finalmente, la Tabla 28 presenta los resultados en los puntajes DOZN obtenidos para la ruta alternativa considerada adicionalmente a las rutas de procesamiento convencionales de sulfuros y óxidos de cobre. Los valores en flotación para esta ruta corresponden a los mismos valores obtenidos anteriormente (Tabla 26). Cabe destacar que el valor obtenido para el puntaje global de la ruta alternativa es menor a los obtenidos para las rutas clásicas de obtención de cobre, incluso a los valores obtenidos luego del ajuste en ER y EW, esto indica un mejor rendimiento químico verde para la ruta alternativa propuesta.

Tabla 28. Puntajes DOZN obtenidos en la ruta alternativa.

Principio/Operación	Flotación	Lix presurizada	Cementación	Ruta alternativa
P1 (Prevención de desechos)	73.61	6.08	0	79.69
P2 (Economía atómica)	108.04	-30.94	0.05	77.15
P3 (Procesos menos peligrosos)	109.04	57.30	1.05	167.39
P4 (Productos más seguros)	2.00	2.22	2.00	6.22
P5 (Disolventes más seguros)	0	0	0	0
P6 (Eficiencia energética)	0	8.63	0.02	8.65
P7 (Materia prima renovable)	108.04	46.02	0.05	154.11
P10 (Degradación)	2.00	2.00	2.00	6.00
P11 (Análisis en tiempo real)	1.00	1.00	1.00	3.00
P12 (Química más segura)	109.04	47.02	1.05	157.11
Categorías				
Mejorar uso de recursos	72.67	5.54	0.28	78.49
Mayor eficiencia energética	0	8.63	0	8.65
Reducción de peligros humanos y ambientales	44.42	21.71	1.22	67.34
Puntaje general	2.34	0.72	0.03	3.09