

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

**Desarrollo e implementación de una metodología para el
cálculo de la Huella Hídrica de procesos hidro-
electrometalúrgicos para la refinación de zinc**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ingrid Hernández Robles

Asesor:

Dr. Israel Razo Soto

Co-asesora:

Dra. María Isabel Lázaró Báez

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2026





FACULTAD DE
INGENIERÍA

22 de mayo de 2025

**ING. INGRID HERNÁNDEZ ROBLES
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Israel Razo Soto y María Isabel Lázaro Báez**, *Asesor y Coasesora de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 22 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Desarrollo e implementación de una metodología para el cálculo de la Huella Hídrica de procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc"

- I. Introducción
 - II. Huella Hídrica como indicador ambiental y su aplicación en la industria minero-metalúrgica
 - III. Procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc
 - IV. Metodología para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc
 - V. Discusión de resultados de la implementación de la metodología en un caso de estudio para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc
 - VI. Conclusiones y recomendaciones
- Referencias

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
*bvlg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Desarrollo e implementación de una metodología para el cálculo de la Huella Hídrica de procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc

se realizó en el periodo agosto de 2023 a febrero de 2026 bajo la dirección del Dr. Israel Razo Soto y la Dra. María Isabel Lázaro Baéz.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Ingrid Hernández Robles.

DESCARGO

Los datos, análisis, resultados y conclusiones aquí expuestos deben interpretarse en el contexto integral del estudio realizado, considerando el alcance metodológico, las condiciones específicas de obtención de la información, las limitaciones inherentes al trabajo y el marco temporal en el que se desarrolló la investigación. La extracción parcial de información, su descontextualización o su interpretación aislada pueden conducir a conclusiones erróneas o imprecisas.

Las interpretaciones y conclusiones son responsabilidad exclusiva de la autora y de sus asesores y se circunscriben estrictamente a los objetivos académicos del trabajo.

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Área de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Refinería Electrolítica de Zinc, Grupo México

CON FINANCIAMIENTO DE:

RECURSOS DEL ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

AGRADEZCO A SECIHTI EL OTORGAMIENTO DE LA BECA NACIONAL

Becario No. 1319927

LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA CUENTA CON EL RECONOCIMIENTO DE PROGRAMAS EN EL SISTEMA NACIONAL DE POSGRADOS DE SECIHTI

Agradecimientos institucionales

Hago extensivo mi más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado a través de la beca No. 4011987, que hizo posible la realización de mis estudios de Maestría en el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Agradezco a GoldSim Technology Group LLC por facilitar la licencia académica del software GoldSim (www.goldsim.com), herramienta fundamental para el desarrollo de parte de esta investigación.

Asimismo, expreso mi reconocimiento a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP) de la Facultad de Ingeniería por los apoyos académicos e institucionales brindados durante mi formación de posgrado.

Finalmente, agradezco al personal de la Refinería Electrolítica de Zinc de Grupo México por las atenciones otorgadas, así como por la información y los datos proporcionados para la realización de este trabajo.

Agradecimientos personales

"Ni la vida, ni la justicia social, ni los logros personales nacen del individualismo; son resultado de lo colectivo."

- Lola Vendetta.

Agradezco profundamente a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este proyecto.

Expreso mi más sincero reconocimiento al Dr. Israel Razo Soto y a la Dra. María Isabel Lázaro Báez por su acompañamiento, orientación y valiosas enseñanzas a lo largo de mis estudios de posgrado.

Agradezco al Dr. Luis Armando Bernal Jácome y al Dr. Alfredo Ávila Galarza por su disposición y por formar parte de este proyecto. Así como al Dr. Jorge Eduardo García por su orientación y apoyo a lo largo de este proyecto.

Mi especial agradecimiento al Dr. Heberto Ortiz Vázquez y al Dr. Sergio Castro Larragoitia por el apoyo brindado, la confianza depositada en mi trabajo y la oportunidad de colaborar conjuntamente. Extiendo también mi reconocimiento a los supervisores, operadores y al personal de la Refinería Electrolítica de Zinc de Grupo México por su apoyo, paciencia y por compartir generosamente sus conocimientos.

A mi familia, a mis hermanos y especialmente a mis padres, Teresa y Daniel, gracias por su amor incondicional, respaldo constante y por todos los sacrificios realizados para que pudiera alcanzar esta meta.

A mis amigos y seres queridos, y en particular a mi red de apoyo durante esta etapa, mujeres extraordinarias que han sido fuente de inspiración: Ara, Liz, Ale, Sara, Andrea, Cyn, Eli y Ángeles, gracias por su acompañamiento, fortaleza y cariño.

Finalmente, agradezco a todas las personas que me han apoyado de manera desinteresada; este logro es, sin duda, un esfuerzo colectivo.

Resumen

La Huella Hídrica es un indicador ambiental que permite cuantificar tanto el uso directo como indirecto del agua para un consumidor, producto o proceso a través de la cadena de suministro, así como la apropiación de los recursos hídricos. Aunque se ha estudiado ampliamente en sectores como la agricultura, otros como la minería y metalurgia han sido menos investigados debido a la complejidad de sus procesos.

En este trabajo se abordó como caso de estudio el proceso piro-hidrometalúrgico RLE (Roasting-Leaching-Electrowinning) utilizado en la refinación de zinc. La metodología utilizada para calcular la Huella Hídrica del proceso RLE en el presente estudio, utiliza una metodología desarrollada para procesos minero-metalúrgicos. Esta metodología ha sido previamente aplicada en procesos de lixiviación en pilas de plata y oro, así como en la flotación de sulfuros de cobre. El desarrollo de la metodología se estructuró en cuatro etapas clave: 1) Delimitación y reconocimiento del sistema a evaluar, 2) Definición del modelo conceptual del sistema 3) Generación de un modelo numérico 4) Implementación de la metodología.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar una metodología específica para el cálculo de la Huella Hídrica del proceso RLE para la obtención de zinc e implementar su aplicación en la operación de la refinería de zinc de la empresa Industrial Minera México (IMMSA), la cual está ubicada en la ciudad de San Luis Potosí. Los resultados muestran que es posible calcular la Huella Hídrica de las etapas del proceso, a través de un modelo numérico desarrollado en el software GoldSim y mediante la recopilación de datos de campo.

Se encontró que la mayor parte de la Huella Hídrica está asociada al Agua Azul (HHA), especialmente en los módulos de **Electrólisis y Disposición** de residuos minero-metalúrgicos. El módulo de Disposición de residuos minero-metalúrgicos representa más del 90% de la Huella Hídrica Verde. Asimismo, para la determinación global no se cuantificó Agua Gris debido a la ausencia de descargas en el proceso. Además, fue posible determinar una disminución de la HHA a través de la identificación de agua tratada en el proceso, lo cual disminuye en un 76% la HHA cuantificada. La metodología propuesta permite una evaluación integral de la Huella Hídrica, lo que podría ayudar a identificar oportunidades de mejora en la gestión del agua en los procesos RLE lo que es clave para promover la sostenibilidad en el sector minero-metalúrgico.

Contenido

Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Abreviaturas y símbolos	15
Glosario	16
I. Introducción	18
Justificación	20
Hipótesis	21
Objetivos	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
II. Huella Hídrica como indicador ambiental y su aplicación en la industria minero-metalúrgica....	22
II. 1 Análisis bibliométrico del tema de huella hídrica	22
Resultados de análisis bibliográfico	22
III. Procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc	34
III. 1 Generalidades del zinc	34
III.2 Procesos para la transformación de metales	36
III. 3 Antecedentes históricos de la producción de zinc	38
III. 4 Proceso RLE: Roasting-Leaching-Electrowinning.....	40
III.4. 1 Recepción de material.....	40
III.4.2 Operación de Tostación	41
III.4.4 Lixiviación	42
III.4.5 Planta de flotación	43
III.4.6 Purificación	43
III.4.7 Planta de concentración.....	44
III.4.8 Electrólisis.....	44
III.4.9 Fundición	45
III.3.5 Impactos ambientales negativos de las actividades mineras y metalúrgicas en los recursos hídricos	47
IV. Metodología para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc	51
IV.2 Modelo conceptual	55
IV.3 Desarrollo del modelo numérico	67
IV.3.1 Módulo Recepción de material.....	68
IV.3.2 Módulo Tostación	74

IV.3.3 Módulo Planta de ácido	77
IV.3.4 Módulo Lixiviación	81
IV.3.5 Módulo Planta de flotación.....	86
IV.3.6 Módulo Purificación.....	90
IV.3.7 Módulo Planta de concentración.....	94
IV.3.8 Módulo Electrólisis.....	96
IV.3.9 Módulo Fusión y moldeo	101
IV.3.10 Módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos	104
IV.3.11 Módulo Reservorio de soluciones acuosas.....	108
IV.3.12 Módulo Pileta de seguridad	111
IV.4 Caso de estudio	114
V. Discusión de resultados de la implementación de la metodología en un caso de estudio para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc.....	118
VI. Conclusiones y recomendaciones	156
Referencias.....	159

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de las fases establecidas en las metodologías para la evaluación de la Huella Hídrica.	28
Tabla 2. Propiedades físicas del zinc (Modificado de ILZSG, 2023).	34
Tabla 3. Potenciales estándar de reducción a 25°C (1 M, 1 atm)(Modificado de Lide, 2008).....	44
Tabla 4. Obras e infraestructuras dentro de módulos propuestos (Elaboración propia).....	60
Tabla 5. Nomenclatura de módulos del sistema.	64
Tabla 6. Clasificación de flujos por tipo de agua.....	65
Tabla 7. Lista de verificación de datos requeridos para modelo numérico.....	115
Tabla 8. Pruebas de calidad realizadas para estaciones climatológicas seleccionadas	121

Índice de figuras

Figura 1. Artículos publicados por institución (Elaboración propia).....	23
Figura 2. Artículos publicados por autor (Elaboración propia).....	24
Figura 3. Artículos publicados por año (Elaboración propia).....	24
Figura 4. Citas por año de publicación (Elaboración propia).....	25
Figura 5. Mapa de redes de coocurrencia elaborado en software VOSviewer (Elaboración propia).26	
Figura 6. Aplicaciones del zinc (Modificado de LATIZA, 2024).....	34
Figura 7. Acontecimientos relevantes en la producción de zinc (Elaboración propia a partir de Kania y Saternus, 2023; Habashi, 1997).....	39
Figura 8. Esfalerita (Tomada de Freepik,2021)	40
Figura 9. Muestra de calcina.....	41
Figura 10. Lingotes de zinc de alta pureza	45
Figura 11. Diagrama de flujo simplificado del proceso de RLE para la obtención de zinc (modificado de Monhemius, 2017)	46
Figura 12. Diagrama de proceso RLE (Modificado de Habashi, 1997; Uceda Herrera, 2016; Kania y Saternus, 2023; Hellgren, et al., 2024; Gutiérrez Ortega, 2019; Balarini et al., 2008).....	54
Figura 13. Modelo conceptual de proceso RLE.....	55
Figura 14. Flujos de proceso RLE. Flujos de transferencia (líneas punteadas en color naranja), flujos de entrada (líneas continuas en color verde) y flujos de salida (líneas continuas en color rojo) (Elaboración propia).....	61
Figura 15. Consideraciones para la cuantificación en el balance diario entre evaporación y precipitación (Tomado de Rodríguez-García, 2024).	63
Figura 16. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Recepción de material (REC).	68
Figura 17. Toma de muestra para determinación de humedad en analizador.	69
Figura 18. Patio de riego (izquierda), medición volumétrica de flujo de riego (derecha).	70
Figura 19. Bitácora y flujómetro del área, área de bandas (de izquierda a derecha).....	70
Figura 20. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Tostación (TOS).....	74
Figura 21. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Planta de ácido (ACI).	77
Figura 22. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Lixiviación (LIX).	81
Figura 23. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Planta de flotación (FLO).	86
Figura 24. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Purificación (ACI).	90
Figura 25. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Planta de concentración (CON). ...	94
Figura 26. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Electrólisis (ELE).....	96
Figura 27. Láminas de zinc catódico	98
Figura 28. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Fusión y moldeo (FUS).....	101
Figura 29. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos (DIS).....	104

Figura 30. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Reservoirio de Soluciones Acuosas (RES).	108
Figura 31. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Pileta de seguridad (PIL).	111
Figura 32. Ubicación de sitio de estudio (Elaboración propia).	114
Figura 33. Modelo numérico de proceso RLE en software Goldsim (Elaboración propia).	117
Figura 34. Ubicación de estaciones climatológicas cercanas a sitio de estudio (Google Earth).	120
Figura 35. Climograma de sitio de estudio.	121
Figura 36 Climograma modificado por criterio de Gaussen de sitio de estudio.....	122
Figura 37. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Recepción de materiales en m ³ /año.....	123
Figura 38. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Recepción de materiales en L/t.	124
Figura 39. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Tostación en m ³ /año.....	124
Figura 40. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Tostación en L/t.	125
Figura 41. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de ácido en m ³ /año.....	125
Figura 42. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de ácido en L/t.	126
Figura 43. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Lixiviación en m ³ /año.....	126
Figura 44. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Lixiviación en L/t.	127
Figura 45. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de flotación en m ³ /año.	128
Figura 46. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de flotación en L/t.	128
Figura 47. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Purificación en m ³ /año.	129
Figura 48. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Purificación en L/t.	129
Figura 49. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de concentración en m ³ /año.	130
Figura 50. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de concentración en L/t.....	130
Figura 51. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Electrólisis en m ³ /año.	131
Figura 52. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Electrólisis en L/t.....	131
Figura 53. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Fusión y moldeo en m ³ /año.....	132
Figura 54. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Fusión y moldeo en L/t.	132
Figura 55. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos en m ³ /año.....	133
Figura 56. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos en L/t.	133
Figura 57. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Reservoirio de soluciones acuosas en m ³ /año.	134
Figura 58. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Reservoirio de soluciones acuosas en L/t.	134
Figura 59. Huella Hídrica Azul de cada módulo en m ³ /año.	135
Figura 60. Huella Hídrica Azul de cada módulo en L/t.	136
Figura 61. Proporción de Huella Hídrica Azul correspondiente a cada módulo.	136

Figura 62. Huella Hídrica Azul de cada módulo en m ³ /año.	137
Figura 63. Huella Hídrica Verde de cada módulo en L/t.	138
Figura 64. Proporción de Huella Hídrica Verde correspondiente a cada módulo.	138
Figura 65. Huella Hídrica Verde y Azul Total del proceso RLE en L/t.	139
Figura 66. Huella Hídrica Verde y Azul Total del proceso RLE en m ³ /año.	140
Figura 67. Proporción de Huella Hídrica correspondiente a cada tipo de agua (Verde, Azul, Gris).	140
Figura 68. Tipos de distribuciones utilizadas en el modelo: normal, uniforme, triangular (Tomada de GoldSim, 2025).	143
Figura 69. Gráfico de distribución de resultados con 100 iteraciones	144
Figura 70. Gráfico de distribución de resultados con 500 iteraciones	144
Figura 71. Gráfico de distribución probabilística de resultados de Huella Hídrica Total Diaria (m ³).	145
Figura 72. Análisis de sensibilidad de datos de entrada (volumen de riego y tiempo de riego) vs datos de salida (Huella Hídrica Azul Total).....	147
Figura 73. Análisis de sensibilidad de datos estocásticos de entrada.	147
Figura 74. Análisis de sensibilidad X-Y normalizadas de datos estocásticos de entrada.....	149
Figura 75. Análisis de sensibilidad tornado de datos estocásticos de entrada.	149
Figura 76. Origen de Agua Azul del proceso	152
Figura 77. La contabilidad de la Huella Hídrica Azul en el caso del reciclaje y reutilización del agua (Tomado de Hoekstra et al., 2011).....	153
Figura 78. Agua Azul que se contabiliza para determinar la Huella Hídrica Azul.	154

Abreviaturas y símbolos

AA: Agua Azul

AV: Agua Verde

AG: Agua Gris

HH: Huella Hídrica

HHA: Huella Hídrica Azul

HG: High Grade (Grado Alto)

HHG: Huella Hídrica Gris

HHV: Huella Hídrica Verde

LME: London Metal Exchange (Bolsa de metales de Londres)

MEHH: Manual de Evaluación de la Huella Hídrica

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

RLE: Roasting-Leaching-Electrowinning (Tostación - Lixiviación - Electro-obtención)

SHG: Special High Grade (Grado Alto Especial)

SMC: Simulación Monte Carlo

WFN: Water Footprint Network (Red de la Huella Hídrica)

Glosario

Agua Azul: Agua dulce de origen superficial o subterráneo, de uso consuntivo, es decir, todo aquel volumen que es extraído y que no regresa a mediano o corto plazo.

Agua Verde: Agua que precipita, cuyo volumen no genera escurrimientos y no se infiltra en el subsuelo, permaneciendo temporalmente en la superficie del suelo o de la vegetación, o quedándose contenida en el suelo.

Agua Gris: Agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes basado en las concentraciones naturales y en las normas o legislación de calidad del agua existentes.

Coocurrencia: Se refiere a la frecuencia de dos o más términos en un documento o texto.

Estocástico: Perteneciente o relativo al azar.

Huella Hídrica Azul: Es un indicador del uso consuntivo del agua dulce superficial o subterránea.

Huella Hídrica Verde: Es un indicador del uso del agua proveniente de las precipitaciones terrestres que no se transforman en escurrimiento ni en aguas subterráneas.

Huella Hídrica Gris: Es el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes basado en las concentraciones naturales y en las normas o legislación de calidad del agua existentes.

Simulación: Proceso de creación de un modelo de un sistema propuesto con el fin de identificar y comprender los factores que lo controlan y/o predecir el comportamiento futuro del sistema.

Simulación Monte Carlo: Método para propagar incertidumbres en las entradas del modelo en incertidumbres en los resultados del modelo.

I. Introducción

Actualmente, hay una alta demanda de una amplia gama de metales y minerales que está estrechamente relacionada con el avance tecnológico, la calidad de vida y la necesidad de tecnologías más limpias (European Commission, 2020). Sin embargo, esta demanda contrasta con la naturaleza finita de los recursos minerales, por lo que la explotación de estos a lo largo del tiempo ha traído consigo la disminución de las leyes de los minerales dificultando cada vez más su obtención, por lo que, para satisfacer las necesidades de materias primas en forma permanente, se requiere de más recursos y de mejores tecnologías en los procesos minero-metalúrgicos (Sotoudeh et al., 2021).

En general, las operaciones minero-metalúrgicas requieren de agua en cantidades tales que frecuentemente deben afrontar desafíos por la limitada disponibilidad de recursos hídricos en los lugares donde se sitúan (Meißner, 2021). En la literatura se ha estimado que, a escala global, el sector minero consume solamente alrededor del 3 % del agua dulce disponible en fuentes superficiales y subterráneas si se considera su uso total en distintas industrias, lo que sugiere que su participación global no es dominante frente a sectores como la agricultura o la industria manufacturera. Sin embargo, esta misma literatura enfatiza que a nivel local el consumo puede ser muy significativo, especialmente en regiones áridas o semiáridas donde numerosas operaciones están ubicadas, generando competencia por agua entre usuarios y presionando los recursos hídricos locales (Arias Alvarado et al., 2022; Meißner, 2021).

Debido a los impactos ambientales de la minería y la metalurgia, así como sus demandas de recursos hídricos y energéticos, entre otros, en las recientes décadas se han implementado diversas acciones para promover la sostenibilidad de estas actividades económicas. Entre dichas acciones destacan la reutilización y el reciclaje del agua dentro de los procesos productivos, lo que se refleja en prácticas más sostenibles de gestión hídrica y en el desarrollo de indicadores como la huella hídrica para cuantificar y reducir el consumo total de agua en las operaciones mineras (Hoekstra et al., 2011, Malla et al., 2024).

En general, las operaciones minero-metalúrgicas requieren de agua en cantidades tales que, frecuentemente deben afrontar desafíos por la limitada disponibilidad de recursos hídricos en los lugares donde se sitúan (Meißner, 2021). Debido a los impactos ambientales de la minería y la

metalurgia, así como sus demandas de recursos hídricos y energéticos, entre otros, en las recientes décadas se han implementado diversas acciones para promover la sostenibilidad de estas actividades económicas. Entre dichas acciones destacan la reutilización y el reciclaje del agua dentro de los procesos productivos (Zhang et al., 2023; Malla et al., 2024).

Con respecto a su relación con el uso de recursos hídricos, en la actualidad las operaciones mineras modernas se esfuerzan por reducir el consumo de agua con procesos de cero descargas. No obstante, estas actividades tienden a ser consumidoras de agua en un sentido general, razón por la cual se hace necesario no sólo conocer los volúmenes de agua utilizados en cada uno de los procesos minero-metalúrgicos, sino también comprender el uso directo e indirecto del recurso hídrico en términos de apropiación y retorno al sistema hídrico natural, para lo cual el indicador de la Huella Hídrica tiene una contribución relevante. La Huella Hídrica (HH) permite cuantificar el uso directo como indirecto del agua para un consumidor, producto o proceso y puede ser adaptado a procesos mineros debido a la estrecha relación que tiene este sector con el recurso hídrico (Hoekstra et al., 2011). En este trabajo de investigación se propone desarrollar y aplicar una metodología diseñada para la cuantificación de la Huella Hídrica del proceso de refinación electrolítica de zinc, el cual se ha estimado que llega a proveer cerca del 85% de la producción mundial de este metal (Ballester et al., 2000).

La metodología que se propone aplicar en este trabajo se deriva de una adaptación de la metodología establecida en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011). Tal metodología permite evaluar los tres componentes de la Huella Hídrica (Huella Verde, Huella Azul y Huella Gris) y ha sido aplicada y validada en trabajos anteriores sobre procesos de recuperación de plata y oro por lixiviación en pilas, así como flotación de sulfuros de cobre (Rodríguez García, 2016 y Rodríguez et al., 2023).

Justificación

Actualmente, existen datos de Huella Hídrica para diversos productos o procesos principalmente agrícolas, observando un considerable retraso en un sector de gran importancia como es el minero-metalúrgico. La carencia de información sobre la Huella Hídrica de los metales y minerales obtenidos por la minería y, en consecuencia, de todos los productos derivados de estas materias primas, se puede deber a la carencia de metodologías específicas para la determinación de Huella Hídrica de procesos minero-metalúrgicos que consideren su complejidad y variabilidad. Por lo que, mediante el desarrollo de una metodología diseñada para incluir las particularidades del proceso hidro-electrometalúrgico de refinación de zinc, este trabajo busca contribuir en la aplicación del indicador de Huella Hídrica para comprender y conocer los impactos ambientales de la industria minero-metalúrgica, a fin de promover una mejor gestión del recurso hídrico, contribuyendo así en avanzar hacia una minería sostenible.

Hipótesis

La adaptación de una metodología para la evaluación de la huella hídrica en un proceso hidro-electrometalúrgico para la refinación de zinc permite calcular este indicador de manera precisa, es flexible y adaptable para cualquier operación minera-metalúrgica de este tipo.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar una metodología para la cuantificación de la Huella Hídrica del proceso hidro-electrometalúrgico involucrado en la obtención de zinc refinado e implementar su aplicación en un caso de estudio a nivel industrial.

Objetivos específicos

1. Delimitar y reconocer el sistema por evaluar
2. Establecer un modelo conceptual integrado por módulos que representen los componentes y/o etapas del sistema
3. Determinar los flujos de agua de entrada, salida y transferencia que se cuantificarán
4. Desarrollar un modelo numérico para el cálculo de los flujos desconocidos
5. Implementar la metodología desarrollada mediante su aplicación práctica en un caso de estudio.
6. Evaluar la Huella Hídrica del zinc mediante un análisis crítico de los resultados.

II. Huella Hídrica como indicador ambiental y su aplicación en la industria minero-metalúrgica

II. 1 Análisis bibliométrico del tema de huella hídrica

Con el objetivo de identificar las tendencias de investigación, los principales actores académicos y la evolución del conocimiento científico en torno a la huella hídrica aplicada a la minería, se realizó un análisis bibliométrico del estado del arte. Este análisis permitió evaluar el desarrollo del tema, su grado de consolidación y las oportunidades de investigación existentes.

Para la búsqueda de información se recurrió a los recursos disponibles en la página de CREATIVA (Centro de Recursos Académicos Informáticos Virtuales), perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Desde este centro de recursos se accedió a Web of Science, base de datos multidisciplinaria, con más de 12,000 revistas de investigaciones de alto impacto en el mundo, incluidas las de acceso abierto. De manera independiente se realizó una búsqueda en PubMed, motor de búsqueda de libre acceso que permite consultar principal y mayoritariamente los contenidos de la base de datos MEDLINE, aunque también una variedad de revistas científicas de similar calidad pero que no son parte de MEDLINE.

La búsqueda se realizó en el mes de enero del año 2024, para refinar la búsqueda se utilizaron las palabras “mine water footprint” el resultado dentro de la base de datos de Web of Science consistió en 380 resultados, mientras que en PubMed se encontraron 75 resultados que consisten básicamente en artículos, artículos de revisión, documentos, entre otros.

A partir de estos resultados se construyó una hoja de cálculo en donde se seleccionaron los títulos de mayor interés, con un resultado de 80 artículos que van desde el año 2009 hasta el año 2024. A partir de la información compilada se lograron observar ciertas tendencias en las investigaciones realizadas relacionadas con el tema de tesis, las cuales se muestran a continuación.

Resultados de análisis bibliográfico

Dentro de la investigación realizada relacionada con la huella hídrica de la minería, se puede apreciar en la Figura 1 que Monash University en Australia es la institución con mayor número de artículos publicados (5 publicaciones), en segundo lugar se encuentra la Universidad de Witwatersrand en Sudáfrica (4 publicaciones), posteriormente, en tercer lugar se encuentra la Universidad de

Queensland así como el Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), ambas en Australia (3 publicaciones), en cuarto lugar se encuentran la Universidad de Tokio en Japón, Middle East Technical University en Turquía, Nanchang University en China y Central South University en China (2 publicaciones). Se puede identificar un gran interés por el tema en instituciones de Australia, Sudáfrica y países orientales.

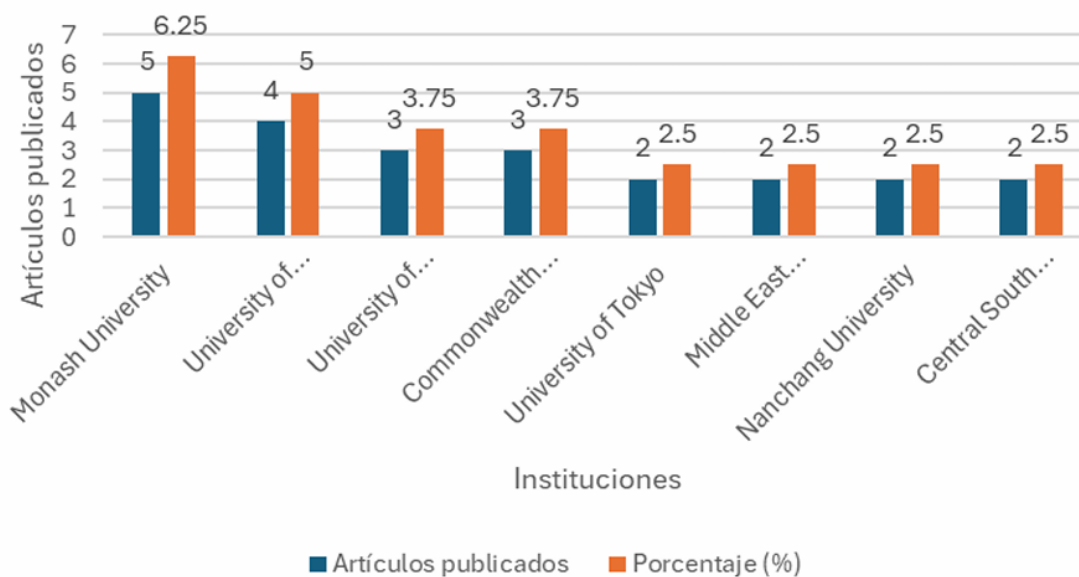


Figura 1. Artículos publicados por institución (Elaboración propia).

En la Figura 2 se puede observar que destacan 4 autores en el tema, en primer lugar, se encuentra Northey S. con 7 artículos y posteriormente le siguen Guney E., Islam K. y Yan F. con 2 artículos, lo que también indica que es un tema en donde hay oportunidades de investigación.

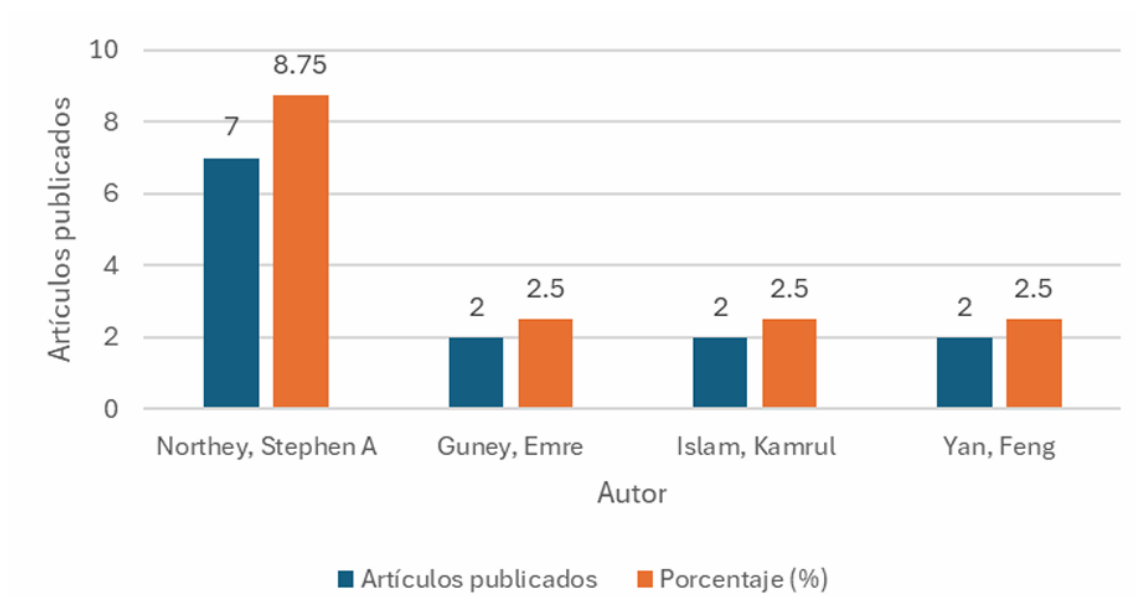


Figura 2. Artículos publicados por autor (Elaboración propia).

En la Figura 3, se encuentran el número de artículos publicados por año en donde se puede observar que a partir del 2014 empieza a aumentar el número de publicaciones relacionadas al tema y un mayor número de artículos publicados en el 2021, lo que a su vez indica que es un tema relativamente nuevo. El concepto de huella hídrica se formalizó en el año 2002 (Hoekstra et al., 2011) lo que aporta una idea de por qué las publicaciones empiezan a tomar fuerza, años después del surgimiento de este concepto.

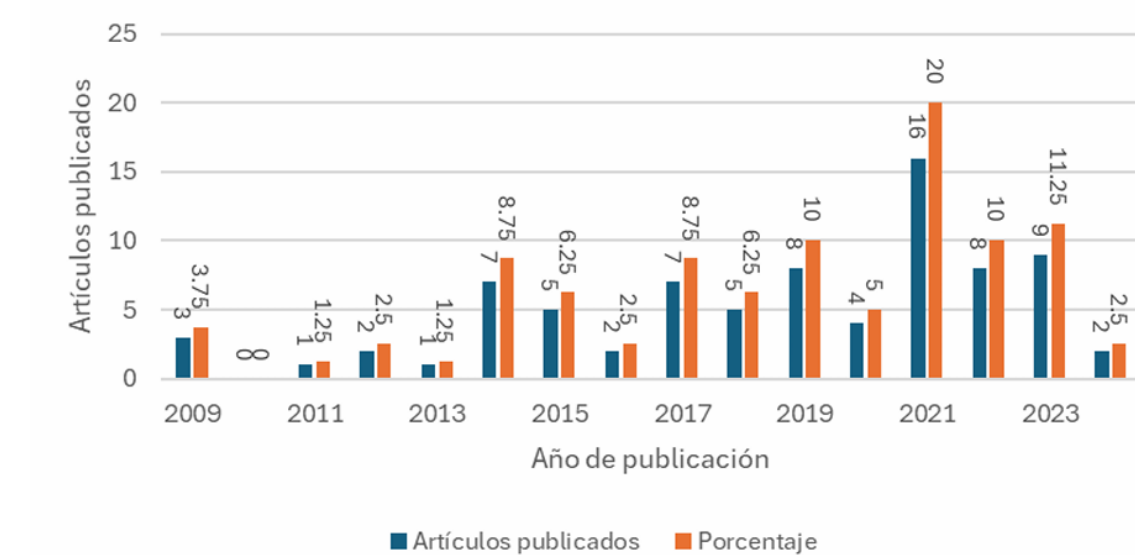


Figura 3. Artículos publicados por año (Elaboración propia).

El total de publicaciones seleccionadas suman un total de 2,183 citas, con un promedio por artículo de 27.3 citas, de las cuales, la mayoría se concentran en artículos del 2014 con un total de 356 citas que corresponden al 16.3% (Figura 4). También es posible observar que en la mayoría de los años se sobrepasan las 100 citas, con excepción de los años más recientes.

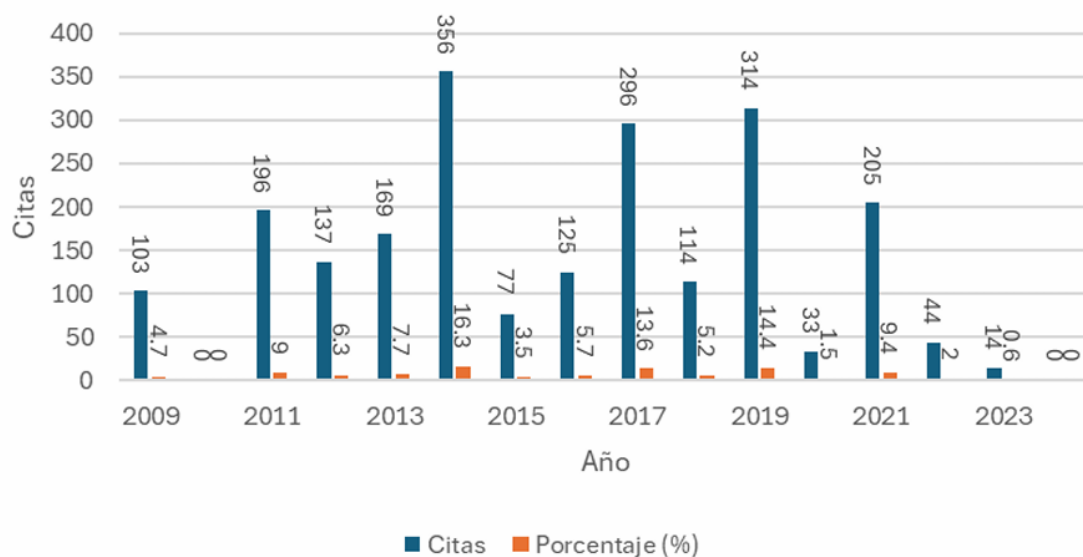


Figura 4. Citas por año de publicación (Elaboración propia).

La Figura 5 muestra las relaciones entre palabras claves a partir de las bases de datos consultadas y a partir del visualizador VosViewer fue posible construir un mapa de relaciones en donde el tamaño del nodo, así como las conexiones entre palabras claves indican la co-ocurrencia de términos. Algunas de las palabras clave más sobresalientes son huella hídrica, huella, recursos, sostenibilidad, minería, entre otras.

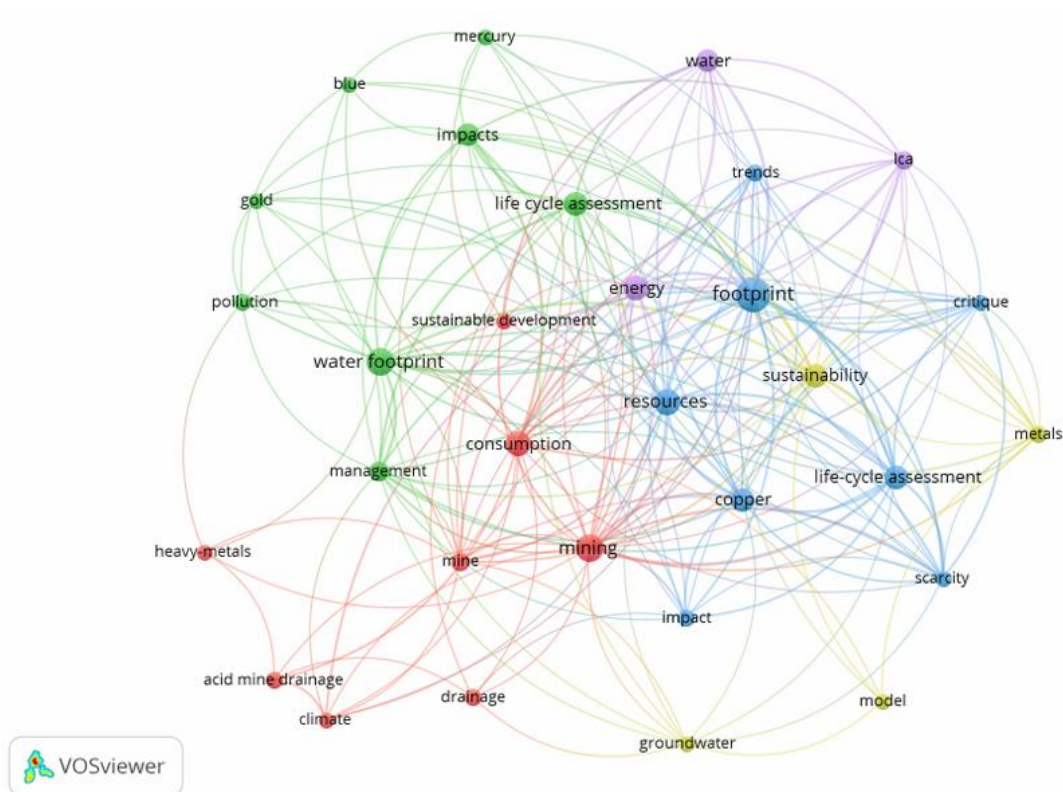


Figura 5. Mapa de redes de coocurrencia elaborado en software VOSviewer (Elaboración propia).

Esta revisión permite concluir que, las revistas con mayor número de publicaciones son de las editoriales Elsevier y Springer, que son reconocidas mundialmente por su gran aportación en publicaciones de ciencia. Además, fue posible observar que las instituciones australianas son líderes en el tema y que muy pocos autores destacan, debido a la relativa novedad del tema, lo que provee un amplio campo de trabajo de la huella hídrica en la minería.

Por otro lado, es posible visualizar una tendencia del tema de huella hídrica a partir del 2014, ya que el concepto empezó a tomar forma cerca del 2002, se puede observar interés en cuantificar el uso de agua en operaciones mineras y otros tipos de procesos desde años atrás. Las palabras clave están relacionadas a los impactos de la minería, pero también hacia la sostenibilidad de esta actividad y el uso del agua.

II.2 La huella hídrica como indicador ambiental

Actualmente existe una gran necesidad por comprender los impactos ambientales, por ello han surgido diversos indicadores ambientales que permiten identificar este tipo de impactos. En el caso del agua, la Huella Hídrica (HH) es un concepto que surgió en el 2002, como un indicador que permite cuantificar el uso directo como indirecto del agua para un consumidor, producto o proceso a través de la cadena de suministro, así como la apropiación de los recursos hídricos (Hoekstra et al., 2011).

El concepto de Huella Hídrica (HH) surge a partir del reconocimiento de que el agua dulce disponible en el planeta es limitada y que su disponibilidad está determinada por los flujos del ciclo hidrológico, el cual regula los procesos de precipitación, infiltración, escorrentía y evapotranspiración. En este contexto, el uso sostenible del agua implica que las extracciones y consumos no superen la capacidad natural de renovación de los sistemas hídricos en una región determinada.

Bajo esta premisa, surge la pregunta: ¿cuánta agua dulce se consume realmente para sostener una actividad, producto o proceso? La huella hídrica permite responder esta interrogante al cuantificar tanto el uso directo como el indirecto de agua a lo largo de toda la cadena de valor. El uso directo considera las extracciones y consumos efectuados en el sitio de operación (por ejemplo, agua incorporada al proceso o evaporada), mientras que el uso indirecto contempla el agua empleada en etapas previas, como la producción de insumos, energía y materiales.

Al integrar ambos componentes, la HH no solo mide volúmenes extraídos, sino el consumo neto de agua, es decir, aquella que no retorna a la misma cuenca en condiciones adecuadas y dentro de un periodo compatible con el ciclo hidrológico local. De esta manera, la huella hídrica constituye un indicador que vincula la demanda antropogénica con la capacidad de renovación natural del recurso, permitiendo evaluar presiones sobre las cuencas y apoyar la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad hídrica (Hoekstra et al., 2011).

A la fecha, existen dos metodologías para evaluar la HH, a través de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) presentado en la Norma Internacional ISO:14046 (ISO, 2014) y a través de la metodología propuesta en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica (MEHH) (Hoekstra et al., 2011), estas metodologías constan de 4 fases muy similares (Tabla 1):

- 1) Objetivos y alcance:** En esta etapa se define el límite y propósito de la investigación
- 2) Cuantificación:** Implica la medición de los volúmenes que conforman la HH de estudio ya sea mediante medición directa o a partir de inventarios de volúmenes o consumo de agua
- 3) Evaluación:** Se realiza un análisis de impacto o sostenibilidad de la HH de estudio
- 4) Resultados:** Se realiza una interpretación de los resultados y se formulan propuestas de mejora, entre otras (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de las fases establecidas en las metodologías para la evaluación de la Huella Hídrica.

Fases	ACV	MEHH
1.Objetivos y alcance	Definición de objetivos y alcance	Definición de objetivos y alcance
2.Cuantificación	Análisis del inventario de la HH	Contabilidad de la HH
3.Evaluación	Evaluación del impacto de la HH	Análisis de la sostenibilidad de la HH
4.Resultados	Interpretación de resultados	Formulación de respuesta a la HH

En este trabajo se usa una metodología desarrollada para procesos minero-metalúrgicos, la cual es una adaptación de la metodología propuesta en el MEHH. Previamente ha sido aplicada en procesos de recuperación de plata y oro por lixiviación en pilas, y de flotación de sulfuros de cobre (Rodríguez García, 2016 y Rodríguez et al., 2023).

La HH según el MEHH, considera el origen proveniente del agua y, en función de ello, la clasifica en 3 tipos (Hoekstra, et al., 2011; IMTA, 2017):

Agua Azul: Agua dulce de origen superficial o subterráneo, de uso consuntivo, es decir, todo aquel volumen que es extraído y que no regresa a mediano o corto plazo.

Agua Verde: Agua que precipita, cuyo volumen no genera escurrimientos y no se infiltra en el subsuelo, permaneciendo temporalmente en la superficie del suelo o de la vegetación, o quedándose contenida en el suelo.

Agua Gris: Agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes basado en las concentraciones naturales y en las normas o legislación de calidad del agua existentes.

A partir de esta clasificación, la huella hídrica se puede desglosar en huella hídrica azul, verde y gris, cada una asociada al tipo de agua que interviene:

Huella Hídrica Azul (HHA): Se refiere a la que se encuentra en los cuerpos de agua superficial (ríos, lagos, esteros, etc.) y subterráneos; es decir la extracción de agua superficial y subterránea de determinada cuenca. Se expresa como:

$$HH_A = E_A + In_A + Pe_A \quad \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad (Ec. 1)$$

Donde:

HH_A= Huella Hídrica Azul

E_A= Evaporación de Agua Azul

In_A= Incorporación de Agua Azul en el proceso o producto

Pe_A= Flujo de retorno perdido, es decir, aquella cantidad de agua que se pierde y no retorna en el periodo evaluado.

Huella Hídrica Verde (HHV): Es el agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad, es decir, el uso de agua de lluvia ocupada durante el flujo de la evapotranspiración del suelo que se utiliza en agricultura y producción forestal. Se expresa como:

$$HH_V = E_V + In_V \quad \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad (Ec. 2)$$

Donde:

HH_V= Huella Hídrica Verde

E_V= Evaporación de Agua Verde

In_V= Incorporación de Agua Verde en el producto o proceso

Huella Hídrica Gris (HHG): Es el agua contaminada durante un proceso y es un indicador de la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales conocidas de éstos y los estándares locales de calidad del agua vigentes. La HHG suele calcularse para el contaminante más crítico en el cuerpo receptor.

$$HH_G = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad (Ec. 3)$$

Donde:

HH_G= Huella Hídrica Gris

L= Carga contaminante (masa/tiempo)

C_{max}= Concentración máxima permitida de contaminante a evaluar (masa/volumen)

C_{nat}= Concentración natural en la masa de agua receptora (masa/volumen)

La suma de la Huella Hídrica verde, azul y gris que requiere un producto o servicio dentro de todo el proceso de elaboración será su Huella Hídrica y se puede calcular para un producto, proceso, industria, consumidor, cuenca, estado o país.

$$HH_T = HH_A + HH_V + HH_G \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad (Ec. 4)$$

Donde:

HH_T= Huella Hídrica Total

HH_A= Huella Hídrica Azul

HH_V= Huella Hídrica Verde

HH_G= Huella Hídrica Gris

La Huella Hídrica ha sido aplicada principalmente en el sector agrícola, debido a que este sector utiliza la mayor cantidad de agua a nivel mundial (Hoekstra et al., 2011), por lo tanto, hay sectores en donde existe poco desarrollo de metodologías para cuantificar la HH, tal es el caso del sector minero-metalúrgico.

II. 3 Huella Hídrica en la industria minero-metalúrgica

La industria minera actual se enfrenta a dos grandes desafíos, por un lado, una mayor demanda de minerales para satisfacer las necesidades de la sociedad y por otro, la disminución de la ley de los minerales, lo cual está muy relacionado con un mayor consumo de recursos, como el hídrico (Ekman-Nilsson et al., 2017).

En este contexto, existe un mayor interés por la sostenibilidad de este tipo de procesos, debido también a las regulaciones más estrictas que existen en la actualidad, por esto son cada vez más comunes los informes sobre proyectos mineros, en donde se cuantifican aspectos ambientales y en donde también se busca la manera de reducir el consumo de agua, este objetivo se puede lograr utilizando métricas e indicadores como la Huella Hídrica (Northey et al., 2016).

Northey et al. (2016) discuten los retos de cuantificar la HH en procesos minero-metalúrgicos debido a que las interacciones del recurso hídrico con este sector son complejas, esto se ve reflejado en los pocos estudios sobre HH en la minería, las principales dificultades para cuantificar la HH son la falta de metodologías específicas para cuantificar el dinamismo y variabilidad de estas operaciones, la disponibilidad de datos, entre otras, que desde otro punto de vista se convierte en un área de oportunidad.

Estudios como el de Islam y Murakami (2020) reportan el cálculo de la huella hídrica (HH) siguiendo la metodología de la MEHH, mediante la cuantificación de sus componentes a partir del balance de entradas y salidas de agua en una mina de cobre. Con base en este enfoque, los autores identificaron los principales puntos de consumo dentro del proceso productivo y propusieron estrategias orientadas a reducir la demanda hídrica.

Asimismo, estimaron el consumo de agua por tonelada de los distintos metales producidos, lo que permitió comparar la intensidad hídrica asociada a cada producto. Los resultados mostraron que la Huella Hídrica Azul (HHA) es el componente predominante respecto a la verde y la gris, situación que se explica principalmente por la localización de estas operaciones en regiones áridas o semiáridas, donde la precipitación es limitada y la dependencia de fuentes superficiales y subterráneas es mayor.

Por otro lado, la HH además de ayudar a cuantificar el uso de agua en un proceso minero, también ayuda a complementar los análisis de impactos ambientales y a determinar el desempeño de la industria con respecto a la utilización de recursos hídricos (Meißner, 2021).

Estas aplicaciones se logran porque la Huella Hídrica no solo cuantifica el volumen total de agua consumida, sino que integra dicho consumo con indicadores de disponibilidad y escasez hídrica a escala regional. Metodologías como las descritas por Meißner (2021) combinan inventarios de consumo de agua derivados del análisis de ciclo de vida (LCA) con indicadores de estrés hídrico (WSI) y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

De esta manera, la HH funciona no solo como una métrica volumétrica, sino como una herramienta de evaluación ambiental estratégica que complementa análisis de impactos y facilita la medición del desempeño sectorial respecto al uso sostenible de los recursos hídricos.

Otros de los retos de la determinación de la HH en el sector minero-metalúrgico, es la inconsistencia con la que se presentan los datos de HH y por otro lado la metodología utilizada para la cuantificación de este indicador ya sea mediante el ACV o la metodología del MEHH, lo que dificulta la comparación y el análisis de estos datos (Angel, 2016).

Aunque la Huella Hídrica (HH) se ha estudiado principalmente en metales de alto valor como el oro (González et al., 2012; Rodríguez, 2016), esta no es un valor fijo asociado al proceso productivo, sino un indicador dependiente del contexto geográfico. En el caso de un mismo metal obtenido mediante el mismo proceso en dos sitios distintos, la HH puede variar porque su cálculo incorpora variables ambientales locales.

Influyen variables meteorológicas como la precipitación y la evaporación, ya que determinan la disponibilidad natural de agua y las tasas de reposición hídrica en la zona. Por ejemplo, en regiones áridas con alta evaporación, el volumen de agua efectivamente consumida (agua azul) tiende a ser mayor en términos relativos respecto a la disponibilidad total.

Las condiciones climatológicas, como el tipo de clima predominante, afectan tanto la recarga de acuíferos como los caudales superficiales y los requerimientos ambientales del ecosistema. Esto

implica que el mismo volumen de agua utilizado puede representar distintos niveles de presión hídrica dependiendo del entorno.

La HH no solo cuantifica el volumen utilizado, sino que permite contextualizarlo respecto a la escasez local, disponibilidad de recursos y riesgo de conflictos por el agua. Por ello, el análisis de la Huella Hídrica complementa la evaluación de impactos ambientales al considerar no solo cuánto agua se utiliza, sino dónde y en qué condiciones hidrológicas se realiza dicha utilización, aspectos que se desarrollarán con mayor profundidad en apartados posteriores (Meißner, 2021).

III. Procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc

III. 1 Generalidades del zinc

El zinc es el tercer metal no ferroso más utilizado en el mundo debido a sus propiedades físicas, químicas, térmicas, eléctricas y aislantes únicas, en la Tabla 2 se muestran algunas generalidades de este metal. Es empleado en múltiples aplicaciones principalmente en la industria de la galvanización y aleaciones, como se muestra en la Figura 6, pero además en diversos sectores de la industria que incluyen a la automotriz, aeroespacial, de la construcción, eléctrica, energética, electrónica, entre otras (ILZSG, 2023; LATIZA, 2024; Ekman-Nilsson et al., 2017).

Tabla 2. Propiedades físicas del zinc (Modificado de ILZSG, 2023).

Símbolo químico	Zn
Número atómico	30
Serie química	Metales de transición
Densidad	7140 kg/m ³
Apariencia	Gris pálido azulado
Punto de fusión	420 °C
Punto de ebullición	907 °C
Calor de vaporización	115.3 kJ/mol
Calor de fusión	7.3 kJ/mol
Calor específico	390 J/kg K
Conductividad eléctrica	16.6106 mohm
Conductividad térmica	116 W mK

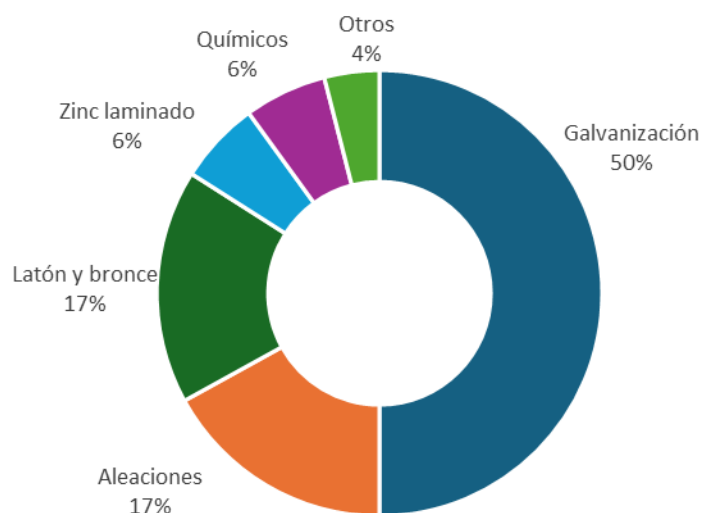


Figura 6. Aplicaciones del zinc (Modificado de LATIZA, 2024)

El zinc (Zn) se obtiene principalmente a partir de minerales sulfurados, siendo la esfalerita (ZnS) la mena más importante a nivel mundial. Otros minerales relevantes son la smithsonita (ZnCO_3) y la hemimorfita, aunque su explotación es menos común en comparación con los sulfuros. (Treviño Rodríguez et al., 2025)

El proceso industrial más utilizado para la obtención de zinc metálico es la ruta hidrometalúrgica conocida como Tostación-Lixiviación-Electroobtención (RLE, por sus siglas en inglés). En primer lugar, el concentrado de esfalerita se somete a tostación, donde el ZnS se oxida para formar óxido de zinc (ZnO) y dióxido de azufre (SO_2). Posteriormente, el ZnO se lixivia con ácido sulfúrico para producir una solución de sulfato de zinc (ZnSO_4). Durante esta etapa se realizan procesos de purificación para eliminar impurezas como hierro, cadmio, cobre y cobalto, que podrían interferir en la etapa final. Finalmente, el zinc se recupera mediante electroobtención, donde el Zn^{2+} en solución se reduce en el cátodo para obtener zinc metálico de alta pureza ($\geq 99.99\%$), detalles del proceso se mencionan más adelante.

En cuanto a la producción de concentrado de zinc, México se encuentra en la cuarta posición al 2022 con 6.87% de la producción mundial, equivalente a 876,985 t (IZA, 2023; WMD, 2024). Entre los principales productores de zinc refinado en el mundo se encuentran países como China, Unión Europea, Corea del Sur, India, Canadá, Japón, Australia y Perú; donde destaca México en octavo lugar al 2022, con una producción aproximada de 363 mil t, equivalentes al 3% de la producción mundial.

En el país, destacan las refinerías de Peñoles en Torreón, Coahuila con una producción aproximada de 350 mil t/año y Grupo México en San Luis Potosí, SLP con una producción de 100 mil t/año (CAMIMEX, 2023; Peñoles, 2021; GMéxico, 2022).

III.2 Procesos para la transformación de metales

Debido a sus propiedades fisicoquímicas, los metales no se encuentran en estado puro en la naturaleza, si no que suelen encontrarse contenidos en minerales, por lo que debe realizarse una serie de procedimientos antes de obtener un metal de alta pureza; en la metalurgia, estos procedimientos son denominados beneficio y transformación (SGM, 2023).

El beneficio consiste básicamente en separar el material aprovechable del que se extrae el metal de interés (mena), del material que contiene minerales que acompañan a la mena, pero que no son de interés en el momento de la explotación (ganga). El beneficio implica uno o más procesos, tales como trituración, molienda, homogenización, clasificación y concentración (gravimétrica, flotación, magnética) (SGM, 2017).

Posterior al beneficio, se lleva a cabo la transformación de mineral beneficiado (también llamado concentrado), que consiste en modificaciones mecánicas o químicas, para obtener un producto distinto al original. Se clasifican en:

Pirometalurgia: Se hace uso de altas temperaturas para recuperar metales como el caso del cobre, níquel, hierro, plomo, entre otros.

Hidrometalurgia: Se hace uso de soluciones acuosas para la recuperación de metales, a través de la disolución en reactivos para posteriormente precipitarlos. Tal es el caso de metales como el cobre, uranio, oro, plata, entre otros.

Electrometalurgia: Se utiliza corriente eléctrica para la recuperación de metales (Electrólisis), para metales como el zinc, cadmio, níquel, plomo, cobre y cobalto.

El interés por estudiar los procesos hidrometalúrgicos y electrometalúrgicos para la recuperación de zinc se debe al requerimiento de grandes volúmenes de agua dentro de la industria minero-metalúrgica, además de que a partir de este tipo de procesos (proceso RLE) se obtiene cerca del 85% de la producción de zinc a nivel mundial (Ballester et al., 2000).

Las ventajas de los procesos hidrometalúrgicos y electrometalúrgicos frente a los pirometalúrgicos son diversas (Román-Ortega, 1992). En general, estos procesos permiten tratar minerales de baja ley y concentrados con mayor contenido y variedad de impurezas, a diferencia de los procesos pirometalúrgicos, que requieren minerales de alta ley y bajo contenido de impurezas para operar

eficientemente. Asimismo, posibilitan una extracción más selectiva del metal de interés, facilitan la implementación de sistemas a menor escala y ofrecen un mejor control y manejo de los residuos acuosos generados durante el proceso.

Esto no significa que uno sea mejor que otro, ya que en la mayoría de las ocasiones ambos tipos de procesamiento se complementan para la obtención de un producto final.

Tal es el caso de los sulfuros metálicos, particularmente el sulfuro de zinc (ZnS), que constituye la principal materia prima para la obtención de zinc de alta pureza mediante el proceso RLE (Roasting-Leaching-Electrowinning), es decir, Tostación-Lixiviación-Electroobtención. Este proceso es actualmente uno de los más eficientes para la producción de zinc, debido a que integra de manera complementaria etapas pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas y electrometalúrgicas. La tostación (etapa pirometalúrgica) permite oxidar el ZnS para formar óxido de zinc (ZnO) y eliminar el azufre en forma de dióxido de azufre (SO_2), facilitando su posterior tratamiento. La lixiviación (etapa hidrometalúrgica) posibilita la disolución selectiva del ZnO y la separación de impurezas, lo que mejora la pureza de la solución. Finalmente, la electroobtención (etapa electrometalúrgica) permite recuperar zinc metálico con alta pureza mediante la reducción controlada del Zn^{2+} en solución. La eficiencia del proceso radica en que cada etapa optimiza una función específica, lo que se traduce en altas recuperaciones y elevada calidad del producto final (Ballester et al., 2000; Kania y Saternus, 2023; Habashi, 1997).

III. 3 Antecedentes históricos de la producción de zinc

La historia de la minería del zinc (Figura 7) data de hace miles de años, en las antiguas civilizaciones griegas y romanas, se obtenía a partir de la smithsonita y se fundía para obtener latón (aleación de cobre y zinc) principalmente con fines ornamentales. Posteriormente, cerca del año 1500, en China e India se comienza a obtener y describir la obtención de este metal de forma aislada. Las primeras producciones de zinc a escala industrial datan de principios del siglo XVII, principalmente en Europa en donde se utiliza el proceso de tostación para oxidar el mineral de zinc (Habashi, 1997).

La Revolución Industrial (1760-1840) trajo consigo mejoras en el proceso de producción de zinc, tales como el método Ruberg (proceso de retorta horizontal) en 1798 que consistía principalmente en calentar concentrados de zinc (principalmente sulfuro de zinc, ZnS) en hornos horizontales para producir vapor de zinc, que después se condensaba para la obtención del metal, a mediados del siglo XIX la producción industrial de zinc se extendió a América y se mejoró el proceso de retorta (Kania y Saternus, 2023).

En el siglo XX, se tienen los mayores avances en la producción de este metal, ya que se desarrolla el proceso RLE (Roasting-Leaching-Electrowinning de sus siglas en inglés para Tostación-Lixiviación y Electro-obtención) que sustituye a los procesos totalmente pirometalúrgicos. Después de la Primera Guerra Mundial, se introduce el proceso de flotación para la concentración de metales que se encuentran como impurezas en el mineral de zinc y se lleva a cabo la producción electrolítica de zinc de alta pureza en Canadá y New Jersey en Estados Unidos. La precipitación de jarosita revolucionó la industria del zinc, ya que mediante este procedimiento se remueven impurezas no deseables de hierro, que causaban interferencias en la electro-obtención/electrólisis de zinc.

Actualmente las principales innovaciones del proceso están encaminadas a la eficiencia y eficacia del proceso, principalmente mejorar la calidad del producto final, disminución de costos y de residuos. Tal es el caso de la lixiviación directa o a presión que omite la etapa de tostación y permite disminuir costos operativos (Kania y Saternus, 2023; Habashi, 1997).

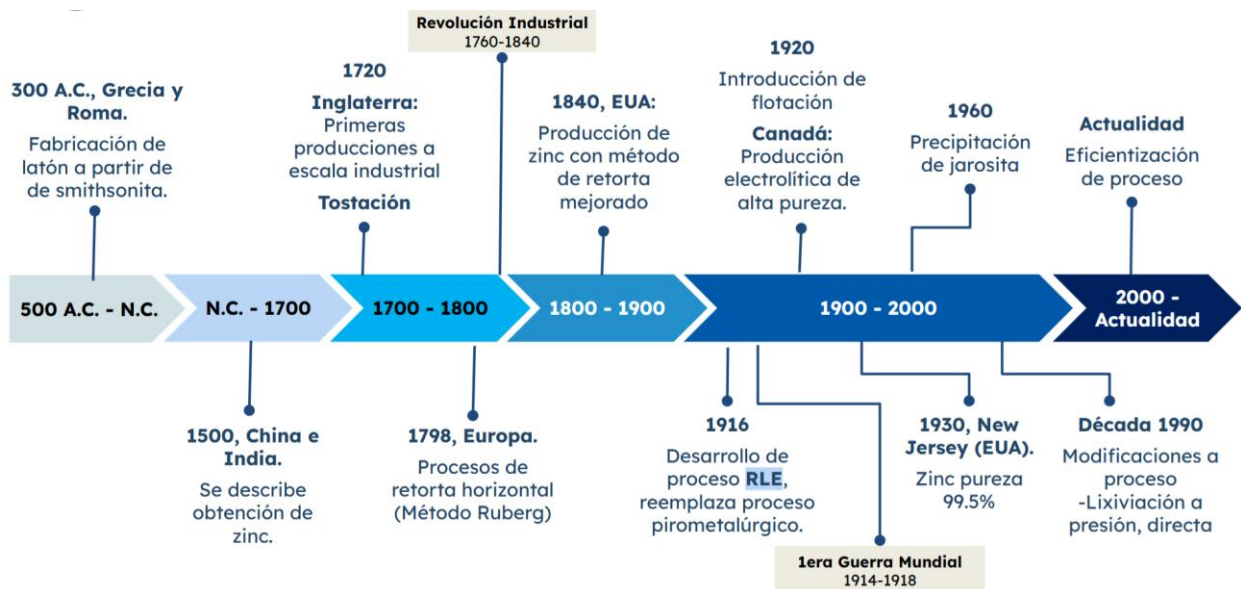


Figura 7. Acontecimientos relevantes en la producción de zinc (Elaboración propia a partir de Kania y Saturnus, 2023; Habashi, 1997).

Notas: *AC: Antes de Cristo *NC: Nacimiento de Cristo

III. 4 Proceso RLE: Roasting-Leaching-Electrowinning

El proceso Roasting-Leaching-Electrowinning o RLE, es mundialmente el más utilizado para obtener zinc de alta pureza, consiste en tres etapas básicas o principales: Tostado (Roasting) del sulfuro de zinc para obtener óxido de zinc (calcina), Lixiviación (Leaching) de la calcina de zinc en una solución de ácido sulfúrico y posteriormente un proceso de electrólisis (Electrowinning) de zinc a partir de una solución saturada de zinc, mediante el uso de cátodos de aluminio para la deposición de Zn y ánodos de plomo y plata para cerrar el circuito en una celda de electrólisis (Ballester et al., 2000).

Además de estas tres etapas básicas, en el proceso RLE existen etapas intermedias para obtener zinc de alta pureza. A partir de la información revisada fue posible establecer las etapas básicas del proceso, que se describen a continuación.

III.4. 1 Recepción de material

En esta etapa se realiza la recepción del concentrado de zinc proveniente del proceso de beneficio mineral. El principal mineral de mena del cual se obtiene el zinc es la **esfalerita** (ZnS), también conocida como blenda. Tras las operaciones de trituración, molienda y concentración, el material enviado a la planta metalúrgica corresponde a un concentrado rico en ZnS , cuyo contenido de zinc puede aproximarse al 50–60 %, dependiendo de la eficiencia del proceso de beneficio. Además del zinc, el concentrado contiene elementos acompañantes como hierro, plomo, cadmio, plata y oro, los cuales se encuentran asociados mineralógicamente a la esfalerita (Haldar, 2020).

En la planta, este concentrado es almacenado, muestreado y caracterizado químicamente para verificar su composición y asegurar que cumpla con las especificaciones requeridas para su posterior transformación metalúrgica.



Figura 8. Esfalerita (Tomada de Freepik,2021)

El concentrado de zinc puede provenir de una o varias minas y antes de ser procesada es necesario conocer su composición química y realizar diversos análisis químicos y de caracterización mineralógica para ajustar las variables operativas correspondientes.

III.4.2 Operación de Tostación

Se lleva a cabo cuando el sulfuro de zinc (ZnS) se somete a altas temperaturas en tostadores, mediante la inyección de aire caliente, en donde el oxígeno (O_2) actúa con el sulfuro para obtener óxido de zinc (ZnO , también denominado calcina) y dióxido de azufre (SO_2) (Figura 9). Esta reacción se describe en la Ecuación 5 (Ec. 5).

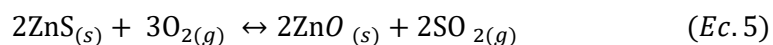


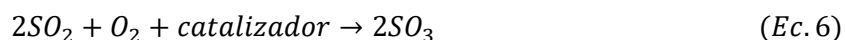
Figura 9. Muestra de calcina.

III.4.3 Planta de ácido

Uno de los productos secundarios más relevantes en el proceso RLE, es el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que contribuye a la sostenibilidad económica del proceso ya que se producen grandes volúmenes de este a partir del proceso de tostación. El procesamiento de este coproducto se lleva a cabo en una planta de ácido.

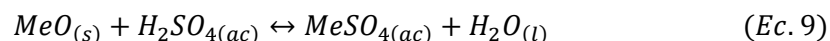
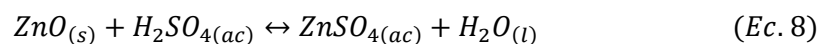
En la tostación del sulfuro de zinc se produce dióxido de azufre (SO_2) en forma de gas a altas temperaturas y con restos de calcina, este gas se hace circular a infraestructura destinada a enfriamiento y limpieza de gases, en electro filtros secos y húmedos, posteriormente se añade pentóxido de vanadio, que es uno de los catalizadores más utilizados para acelerar la reacción de

SO₂ a trióxido de azufre (SO₃) (Ec. 6), a través de torres de secado se remueve el contenido de humedad en forma de vapor de agua y posteriormente se añade ácido sulfúrico al 98-98.5% para que el SO₃ reaccione con el agua contenida en la solución ácida (H₂SO₄ + H₂O) y se forme ácido sulfúrico de alta pureza (98-98.5%) (Ec. 7) destinado principalmente a venta para múltiples aplicaciones industriales, minoritariamente se utiliza en diversas etapas del proceso.



III.4.4 Lixiviación

Durante esta etapa se adiciona una solución de ácido sulfúrico al óxido de zinc (ZnO) (Ec. 8) que fue generado en la etapa de tostación, este óxido denominado calcina generalmente contiene impurezas en forma de óxidos metálicos (MeO; Me= cadmio, cobre, plomo o hierro), que también son lixiviados a su forma de sulfatos (Ec. 9).



La lixiviación suele llevarse a cabo en diferentes etapas, variando el pH y temperatura, dependiendo de los contenidos promedio de metales e impurezas en el concentrado de zinc.

La lixiviación de ferritas de zinc (ZnO·Fe₂O₃) corresponde al tratamiento del zinc combinado con hierro que se forma durante la tostación del concentrado. Estas ferritas son compuestos refractarios que no se disuelven fácilmente en las condiciones de lixiviación neutra, por lo que requieren etapas de lixiviación ácida o caliente, con mayores concentraciones de ácido sulfúrico y temperaturas elevadas. Bajo estas condiciones, el zinc se solubiliza como sulfato de zinc (ZnSO₄), mientras que el hierro permanece en solución como Fe³⁺ y posteriormente se elimina mediante procesos de precipitación (jarosita, goethita o hematita), permitiendo así maximizar la recuperación global de zinc en el proceso RLE (Grant, 2001).

III.4.5 Planta de flotación

Como se mencionó, los sulfuros de zinc, particularmente la esfalerita (ZnS), pueden contener otros metales en su estructura cristalina. Sin embargo, esta variabilidad composicional no responde únicamente a su naturaleza mineralógica, sino principalmente a las condiciones de génesis del yacimiento. Durante su formación, factores como la temperatura, presión, composición del fluido mineralizante y condiciones redox controlan la incorporación de elementos en solución sólida (por ejemplo, Fe) o como elementos traza (Cd, Ge, Co, Ni). Asimismo, la presencia de metales como Au y Ag suele estar asociada a fases sulfuradas coexistentes, como sulfuros de cobre (Cu_2S , CuFeS_2) y plomo (PbS), formadas en determinados ambientes geológicos. En consecuencia, la esfalerita presentará una composición más o menos pura dependiendo de las condiciones fisicoquímicas bajo las cuales se originó el depósito.

Algunos de estos elementos poseen alto valor económico, como el oro y la plata. Estos pueden recuperarse a partir de las corrientes generadas durante el procesamiento hidrometalúrgico, ya sea desde los residuos sólidos de la lixiviación, donde pueden encontrarse asociados a fases como PbSO_4 , o mediante etapas complementarias de concentración. Para su recuperación se emplean procesos como la flotación, en los cuales se adicionan reactivos específicos que permiten concentrar los metales en forma de lodos o concentrados. Posteriormente, estos son sometidos a secado y acondicionamiento para su comercialización. Este tipo de procesamiento se aplica principalmente para la recuperación de metales como el plomo y la plata (Martínez-Pedraza, 2023).

III.4.6 Purificación

En esta etapa a la solución obtenida en la etapa de lixiviación (MeSO_4) se le añade zinc metálico en forma de polvo (Zn) para remover metales como el cobre, cobalto y cadmio mediante cementación (Ec. 10). Esto debido al potencial estándar de reducción del zinc (-0.76 V) que lo hace susceptible de ser un reductor de los otros metales que se encuentran como impurezas (Tabla 3). (Grupo México, 2024).

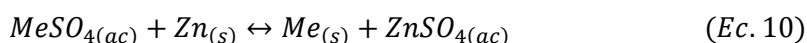


Tabla 3. Potenciales estándar de reducción a 25°C (1 M, 1 atm)(Modificado de Lide, 2008)

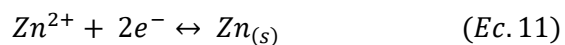
Semirreacción	E° (V)
$\text{Co}^{3+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Co}^{2+}_{(\text{ac})}$	+1.82
$\text{Au}^{+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Au}_{(\text{s})}$	+1.68
$\text{Ag}^{+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Ag}_{(\text{ac})}$	+0.80
$\text{Fe}^{3+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}_{(\text{ac})}$	+0.77
$\text{Cu}^{2+}_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- = \text{Cu}_{(\text{ac})}$	+0.34
$\text{Pb}^{2+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Pb}^{+}_{(\text{ac})}$	-0.13
$\text{Ni}^{2+}_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- = \text{Ni}_{(\text{s})}$	-0.25
$\text{Co}^{2+}_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- = \text{Co}_{(\text{s})}$	-0.28
$\text{Cd}^{2+}_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- = \text{Cd}_{(\text{s})}$	-0.40
$\text{Fe}^{2+}_{(\text{ac})} + 2\text{e}^- = \text{Fe}_{(\text{s})}$	-0.44
$\text{Zn}^{2+}_{(\text{ac})} + \text{e}^- = \text{Zn}_{(\text{s})}$	-0.76

III.4.7 Planta de concentración

Los metales o impurezas que se remueven en la etapa de purificación en forma de cementos suelen presentar un alto contenido de valores metálicos, como Cadmio (Cd), Cobalto (Co), entre otros, estos cementos se trasladan a hornos de fundición para separar los metales por diferencias de densidad y punto de fusión.

III.4.8 Electrólisis

El zinc contenido en la solución purificada como Zn^{2+} se reduce a zinc metálico (Zn) o también llamado zinc catódico de alta pureza (Ec. 11). Esto se lleva a cabo en infraestructura denominada casa de celdas, en donde se recupera zinc catódico a partir de la solución purificada saturada de zinc con una concentración de 80 g/L de Zn y 180 g/L de H_2SO_4 aproximadamente, denominada electrolito, usando cátodos de aluminio y ánodos de una aleación Pb-Ag (1% de Ag) con espesores milimétricos aplicando una densidad de corriente de aproximadamente 500 A/m² (Martínez-Pedraza, 2022).



III.4.9 Fundición

En esta etapa el zinc catódico es fundido y moldeado para obtener lingotes de zinc puro como producto final, así como polvo de zinc, aleaciones, entre otros, según las especificaciones del mercado al cual está dirigido.

Este proceso se lleva a cabo en máquinas lingoteras y/o moldeadoras a temperaturas mayores a la temperatura de fusión del zinc. El producto final suele obtenerse en diversas presentaciones:

Aleaciones: Zinc con contenido minoritario de otros metales, como plomo.

Polvo de zinc: Se utiliza principalmente para etapa de purificación del mismo proceso.

Lingotes y jumbos (Figura 10): Se clasifican a su vez dependiendo del grado de pureza del zinc, esto se hace a través de análisis de pureza al producto final, se clasifica de acuerdo con su pureza y se emite un certificado de acuerdo con especificaciones de organismos internacionales tales como London Metal Exchange (LME) (Peñoles, 2024):

- **SHG (Special High Grade):** Alto Grado Especial de sus siglas en inglés, grado de pureza >99.995%
- **HG (High Grade):** Alto Grado de sus siglas en inglés, grado de pureza >99.900%
- **PWG (Prime Western Grade):** Primer Grado Occidental, grado de pureza >98.000%



Figura 10. Lingotes de zinc de alta pureza

La Figura 11 presenta un esquema general del proceso hidrometalúrgico para la obtención de zinc metálico a partir de concentrados de sulfuro de zinc. En él se integran de manera secuencial las etapas principales e intermedias del proceso, comenzando con el tostado del concentrado y la producción de ácido sulfúrico en la planta de ácido, seguido de las etapas de lixiviación neutra y ácida para la disolución del zinc. Posteriormente, el licor de lixiviación crudo (solución lixiviada) es

sometido a purificación mediante la adición de polvo de zinc para la remoción de impurezas como Cd, Cu, Ni y Co, obteniéndose una solución purificada de sulfato de zinc. Finalmente, la solución es enviada a la etapa de electroobtención, donde se producen cátodos de zinc, mientras que el electrolito agotado es recirculado al circuito de lixiviación (Monhemius, 2017).

Este esquema permite visualizar de manera integral la interrelación entre las distintas operaciones unitarias y facilita la comprensión de la descripción técnica presentada anteriormente.

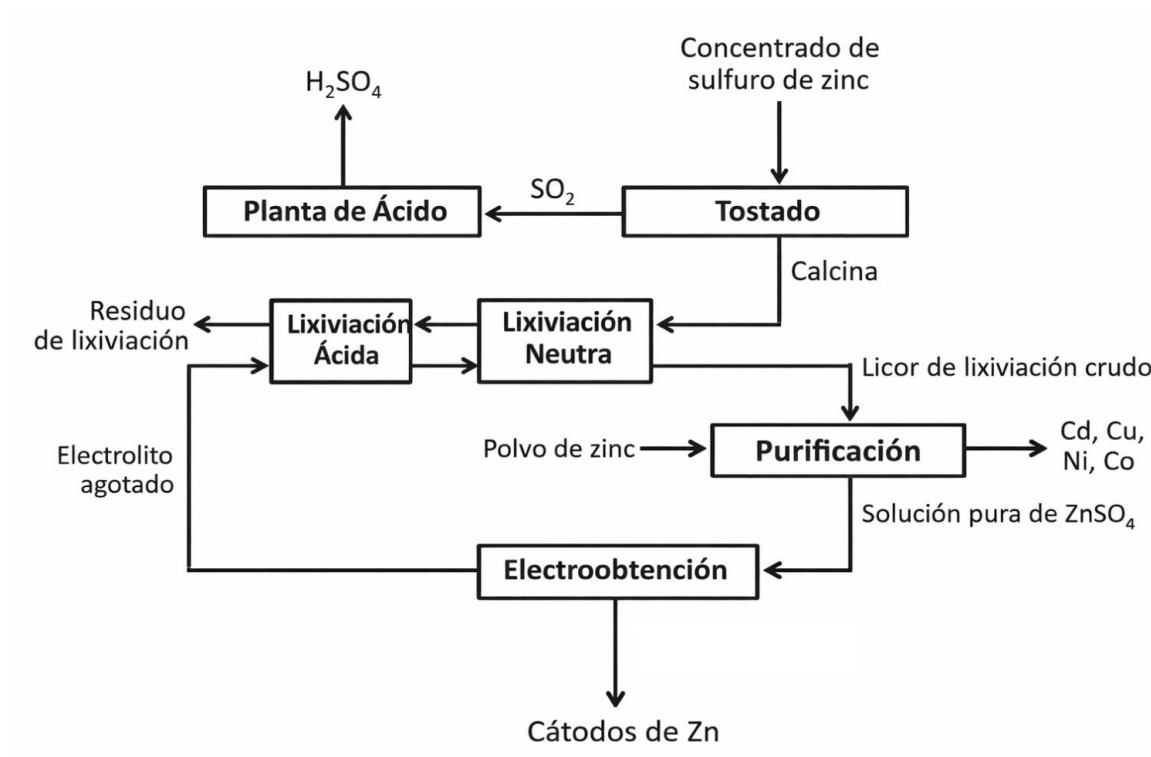


Figura 11. Diagrama de flujo simplificado del proceso de RLE para la obtención de zinc (modificado de Monhemius, 2017)

III.3.5 Impactos ambientales negativos de las actividades mineras y metalúrgicas en los recursos hídricos

La minería juega un papel esencial para la sociedad en la actualidad y lo será también en el futuro. Se ha vuelto indispensable para el modelo económico actual en donde la industrialización se basa en el uso de recursos minerales para mejorar la calidad de vida, el desarrollo de tecnologías y para satisfacer la creciente y actual demanda de energías limpias (Northey et al., 2016; Carvalho, 2017; Atakhanova, 2023).

Además de ser una de las industrias más importantes, la minería también es actividad humana impactante desde el punto de vista ambiental y social. Las actividades minero-metalúrgicas han ido acompañadas de un legado de impactos que están vinculados a pasivos ambientales históricos de los que aún hay evidencia, debido a que la minería se ha desarrollado desde hace miles de años, los impactos generados han sido ampliamente investigados (Luckeneder et al., 2021; Clay et al., 2022).

El aumento de la demanda de minerales ha provocado un mayor impacto negativo en el medio ambiente propiciando la deforestación, pérdida de hábitat y biodiversidad, fragmentación de ecosistemas, interrupción de las cadenas alimenticias, contaminación del aire y por su supuesto, impactos negativos en el recurso hídrico (Zhang et al., 2023).

La industria minero-metalúrgica se considera una de las más diversas con respecto a su interacción con los recursos hídricos, debido a que se lleva a cabo en todo el espectro de contextos hidrológicos, ecosistémicos y climatológicos, desde regiones áridas y desérticas, hasta regiones tropicales (Northey et al., 2016). Por lo tanto, las interacciones de la industria minero-metalúrgica con los recursos hídricos son muy complejas y específicas dependiendo del sitio en donde se desarrolle, así como la identificación de los impactos potenciales tanto en la hidrología como en la calidad del agua en todo el ciclo de vida de una mina. En consecuencia, esta variabilidad plantea una serie de desafíos para determinar y cuantificar los impactos, específicamente en el recurso hídrico (Northey et al., 2016; Atakhanova, 2023).

Actualmente, cerca del 90% de los sitios de extracción minera a nivel mundial se localizan en regiones cuya disponibilidad hídrica renovable per cápita se encuentra por debajo del promedio mundial, estimado en aproximadamente 5 000–6 000 m³ por persona al año. Asimismo, alrededor

del 70% de las operaciones mineras de gran escala se ubican en zonas clasificadas con estrés hídrico, entendido como la condición en la que la demanda de agua supera la disponibilidad del recurso o cuando más del 40% de los recursos hídricos renovables son extraídos anualmente, lo que limita su acceso y sostenibilidad. En este contexto, la minería metálica destaca por ser una de las actividades con mayor consumo de agua dentro del sector minero. No obstante, pese a su alta dependencia del recurso hídrico, muchas operaciones minero-metalúrgicas destinadas a la obtención de metales se desarrollan en regiones con marcada escasez de agua. En consecuencia, la minería constituye una actividad con implicaciones ambientales y sociales significativas, particularmente en territorios con alta vulnerabilidad hídrica (Carvalho, 2017; Atakhanova, 2023).

Las operaciones minero-metalúrgicas suelen obtener agua de cuerpos superficiales o subterráneos cercanos, generando impactos en el recurso hídrico que pueden desencadenar problemáticas de diversos tipos, desde ambientales hasta sociales, como se describe a continuación.

No obstante, en los últimos años se ha promovido el uso de agua tratada o residual tratada como fuente alternativa de abastecimiento, particularmente en regiones con estrés hídrico. El empleo de este tipo de agua permite disminuir la extracción de fuentes naturales, reducir la competencia por el recurso con otros sectores (como el agrícola o el doméstico) y avanzar hacia esquemas de economía circular dentro de la industria. En diversos casos, el agua proveniente de plantas municipales de tratamiento es sometida a procesos adicionales de acondicionamiento para cumplir con los requerimientos de calidad del proceso metalúrgico (por ejemplo, control de sólidos disueltos, dureza o materia orgánica).

Si bien el uso de agua tratada representa una estrategia relevante para mitigar impactos sobre fuentes primarias, su implementación depende de la disponibilidad local, la infraestructura existente, los costos de transporte y tratamiento, así como de la regulación aplicable. En este contexto, el aprovechamiento de aguas residuales tratadas se perfila como una alternativa viable para mejorar la gestión hídrica del sector minero-metalúrgico, aunque no exenta de desafíos técnicos, económicos y sociales (CAMIMEX, 2023, Ghooli y Patel, 2023; De Lima et. Al, 2025)

Impactos en los servicios ecosistémicos: Durante la operación de una mina, suele extraerse agua para los diversos procesos minero-metalúrgicos, lo que provoca el cambio del ciclo hidrológico

natural impactando los ecosistemas existentes e incluso a comunidades aledañas (Northey et al., 2016).

Contaminación del agua: Las actividades mineras pueden dar lugar a la liberación de contaminantes al medio ambiente.

Trabajos como los de Zhou et al. (2020) han demostrado que existen concentraciones, principalmente de metales pesados, más altas que las cantidades establecidas por las normas internacionales de agua potable, en cuerpos de agua cercanos a sitios mineros.

También se documenta que las principales fuentes de metales en el agua difieren alrededor del mundo, siendo la minería una de las principales fuentes responsables de la mayor parte de la contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua superficiales de América del Sur, América del Norte, Asia y Europa (Zhou et al., 2020).

Uno de los tipos más dañinos de contaminación del agua es el drenaje ácido de las minas, que tiene efectos adversos en la calidad del agua, la salud humana y la biodiversidad (Northey et al., 2016).

Problemáticas sociales: Una parte importante de las minas, suele ubicarse en zonas remotas y áridas, lo que hace que la demanda de agua sea aún más significativa y ha provocado la competencia por el agua entre diversos sectores, ya que, a nivel local, la minería representa un importante consumidor de agua. Esto ha provocado conflictos con otros usuarios del agua, como las comunidades locales, los agricultores, pescadores, el turismo local, entre otros (Zhang et al., 2014; Meißner, 2021; Northey et al., 2016).

Es importante destacar que los impactos negativos en el recurso hídrico existen en todo el ciclo de vida de una mina y pueden persistir aún después del cierre de esta, por esto, en los últimos años se han propuesto regulaciones más estrictas en cuanto a medidas de prevención y mitigación de impactos relacionados con el recurso hídrico (Northey et al., 2016).

Es difícil cuantificar con precisión el impacto de la minería en los recursos hídricos debido a las propiedades únicas de cada sitio minero y las diversas interacciones con los cuerpos de agua, el

tiempo de vida de las operaciones mineras, la ausencia de datos y técnicas de evaluación para la evaluación de impactos (Northey et al., 2016; Mardonova y Han, 2023).

La minería es, sin duda, una actividad indispensable para satisfacer las necesidades de la sociedad actual, para mejorar la calidad de vida y el desarrollo tecnológico. Debido a la gran dependencia de esta industria con el recurso hídrico, los impactos en este y generalmente en el ambiente se intensificarán, conforme aumente la demanda de minerales. En la actualidad la escasez de agua dulce propone un gran desafío para la industria y para la sociedad como consumidora de minerales y del recurso hídrico en cantidad y calidad.

Actualmente, las operaciones minero-metalúrgicas suelen operar con un tipo de licencia social, como parte del uso responsable del recurso de las comunidades aledañas y con el fin de disminuir los impactos ambientales. Por otro lado, existen alternativas documentadas para disminuir estos impactos, que van desde la obtención de metales de fuentes secundarias como el procesamiento de residuos mineros y la recuperación de valores metálicos de aguas residuales mineras, así como la implementación de políticas y regulaciones más estrictas para este sector a favor de la conservación del agua y de su uso sostenible, en conjunto con el aprovechamiento de los recursos minerales. Así como la implementación en las últimas décadas del cierre de mina diseñado, que evite impactos aún después del término de las operaciones (Northey et al., 2016; Mardonova y Han, 2023).

IV. Metodología para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc

El desarrollo de metodologías para evaluar la Huella Hídrica (HH) de operaciones minero-metalúrgicas que ha sido aplicado anteriormente en operaciones de oro y cobre, se ha fundamentado en el balance hídrico de un sistema abierto que se compone de diferentes módulos en los que se considera la variabilidad operativa de los procesos analizados, el dinamismo en sus áreas operativas y la interacción que existe de las operaciones con los factores meteorológicos (Rodríguez et al. 2023).

Para el desarrollo de la metodología anteriormente descrita se empleó a manera de guía el Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica desarrollado por Hoekstra et al. (2011) debido a que éste establece los criterios fundamentales para evaluar la HH y sus componentes en un proceso productivo mediante la clasificación de los diferentes flujos por tipo de Agua (Verde, Azul y Gris), así como las ecuaciones generales de cálculo de las Huellas Hídricas Verde, Azul y Gris. Sin embargo, dependiendo de las características específicas del proceso evaluado, puede ser necesario hacer una adaptación de los criterios y lineamientos del manual para tener una coherente y correcta cuantificación del indicador, sobre todo y debido a que este indicador ambiental ha sido aplicado ampliamente al sector agrícola, por lo que la mayor parte de la información disponible se ha desarrollado en torno a este sector.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de la metodología para evaluar la HH de procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc, consta de cuatro etapas:

- (1)** Delimitación de la frontera y reconocimiento del sistema a evaluar;
- (2)** Definición de un modelo conceptual del sistema a evaluar
- (3)** Generación del modelo numérico para el cálculo de la Huella Hídrica y
- (4)** Análisis e interpretación de los resultados de la aplicación de la metodología a un caso de estudio.

Con respecto a la etapa (1), con base en diagramas de flujo de las etapas y procesos, de diagramas de tuberías e instrumentación, y planos de las instalaciones, así como de visitas de reconocimiento a una planta de electro refinación de zinc, se delimitó y describió el sistema evaluado, el cual fue posteriormente representado en la etapa (2) mediante un modelo conceptual.

Así, el producto de la segunda etapa consistirá en la construcción del modelo conceptual del sistema, el cual constituye en una representación simplificada y estructurada de los elementos que lo conforman (módulos) y de las interacciones que existen entre ellos (flujos). Este modelo conceptual se visualiza mediante un diagrama de flujo representativo del sistema evaluado.

Para su elaboración fue necesario adquirir un conocimiento integral del proceso, que permitió identificar los componentes relevantes y sus interrelaciones a partir del análisis de los flujos de materia y agua. En esta etapa se empleó evidencia documental y los conocimientos obtenidos durante el estudio de caso, con el fin de asegurar que el modelo conceptual reflejara de manera coherente la estructura y funcionamiento del sistema.

Una vez adaptado el modelo conceptual a las características específicas del sistema bajo evaluación, se procedió a definir y delimitar los flujos que serían considerados para la posterior cuantificación de la HH.

En la etapa (3) se desarrolló un modelo numérico en el que se definieron las ecuaciones y las respectivas variables necesarias para el cálculo de los flujos desconocidos, tomando como base el modelo conceptual previamente estructurado. Cabe señalar que el proceso RLE fue representado en un total de 12 módulos, los cuales fueron identificados y delimitados durante la etapa anterior.

Como etapa (4), el modelo numérico se desarrolló para cuantificar la Huella Hídrica del sistema para un intervalo de tiempo de un año de operación (año 2022), pero se estableció que los flujos identificados en el modelo conceptual sean determinados con una base de cálculo diaria, por lo que, aun cuando la información de algunas variables solo pueda ser obtenida de manera acumulada o mediante valores promedio mensuales o anuales, dependiendo del seguimiento particular de estas variables, se procurará emplear la mayor cantidad de información con registros diarios para obtener resultados con la mayor representatividad y variabilidad de los factores involucrados en la determinación de los flujos de agua del proceso.

Para la solución del modelo numérico se utilizará el programa GoldSim, el cual es un programa de simulación que permite resolver modelos complejos de sistemas dinámicos. Este programa es capaz

de aplicar cálculos determinísticos y probabilísticos en la determinación de las variables, en este caso, de los flujos de entrada y salida del proceso (GoldSim, 2026).

IV.1 Delimitación y reconocimiento del sistema a evaluar

Para delimitar el sistema a evaluar se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica del proceso RLE en libros y manuales de metalurgia, páginas web de empresas que realizan este proceso o que ofrecen servicios a este tipo de industria, también se tuvo la posibilidad de acceder a una planta de electro refinación de zinc, que fue tomada como caso de estudio.

A partir de la información revisada se lograron identificar las etapas principales y secundarias, así como la infraestructura relacionada con la cuantificación de flujos de agua dentro de las diferentes etapas del proceso (Figura 12).

De esta manera se lograron identificar las etapas de Recepción de material, Tostación, Lixiviación, Purificación, Electrolisis, Fusión y moldeo, como las principales. Las etapas de Planta de ácido, Planta de flotación, Planta de concentración, Disposición de residuos, como secundarias. Así como a los lingotes, aleaciones y polvo de zinc, ácido sulfúrico (H_2SO_4), concentrados de metales como Ag y Cd, como respectivos productos y subproductos.

Cada uno de estas etapas y sus respectivos productos se describirán más adelante.

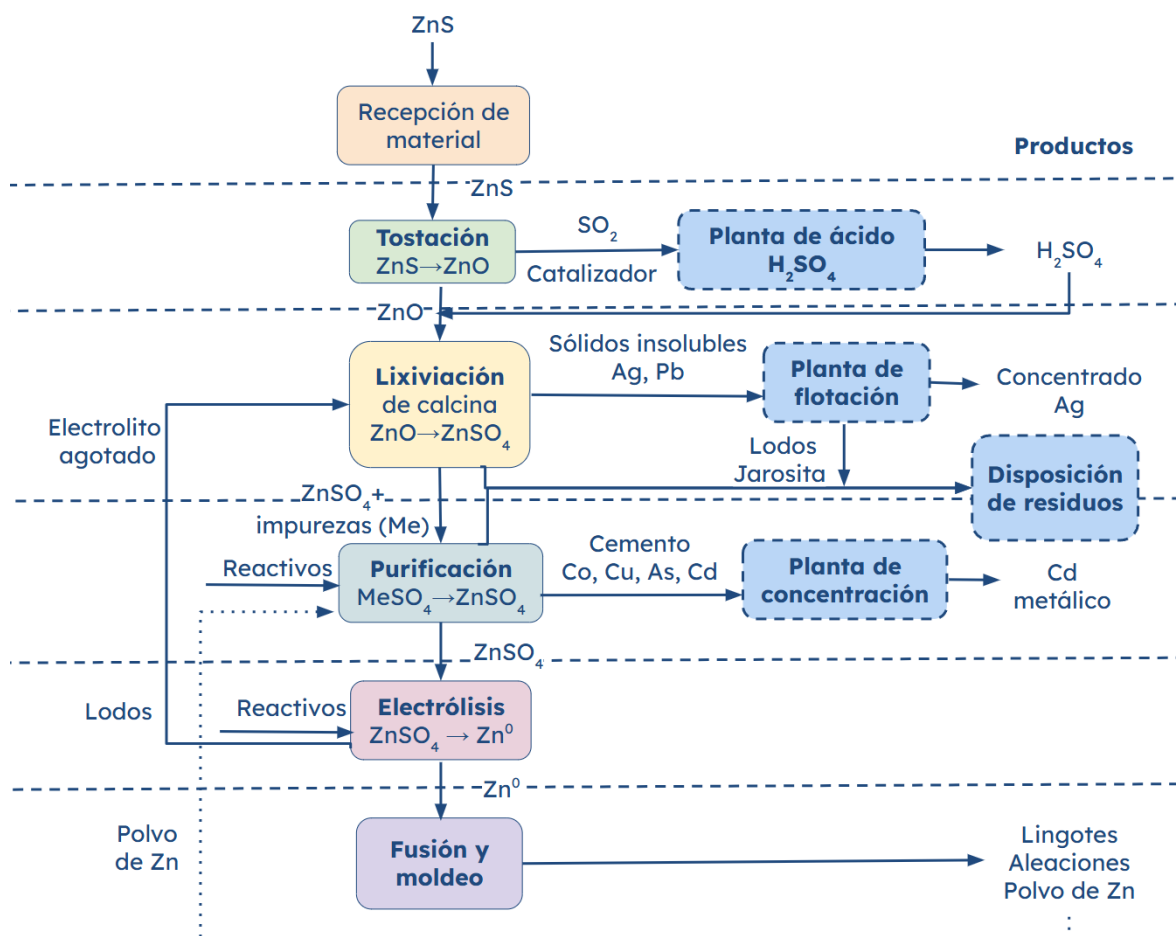


Figura 12. Diagrama de proceso RLE (Modificado de Habashi, 1997; Uceda Herrera, 2016; Kania y Saternus, 2023; Hellgren, et al., 2024; Gutiérrez Ortega, 2019; Balarini et al., 2008).

La delimitación y reconocimiento del sistema a evaluar fue imprescindible para las fases posteriores de la metodología, ya que se logró obtener la mayor representatividad de la configuración del proceso RLE, así como la identificación de los flujos de entrada, salida y transferencia que puedan existir en él.

IV.2 Modelo conceptual

Para definir el modelo conceptual del sistema a evaluar, se busca incluir todas las etapas del proceso más utilizado en la actualidad para la refinación de zinc, en este caso es el proceso RLE (Roasting-Leaching-Electro-winning, por sus siglas en inglés), con el fin de representar cualquier operación minero-metalúrgica que emplea este proceso hidro-electrometalúrgico para la refinación de zinc.

A partir de la información revisada fue posible establecer 6 etapas básicas del proceso y 4 etapas secundarias, que se representan mediante módulos (Figura 13). Adicionalmente se incluyeron 2 módulos más con el fin de facilitar el cálculo de la Huella Hídrica, estos son: Reservoirio de soluciones acuosas (RES) y Pileta de seguridad (PIL), conformando en total 12 módulos. Estos son descritos a continuación.

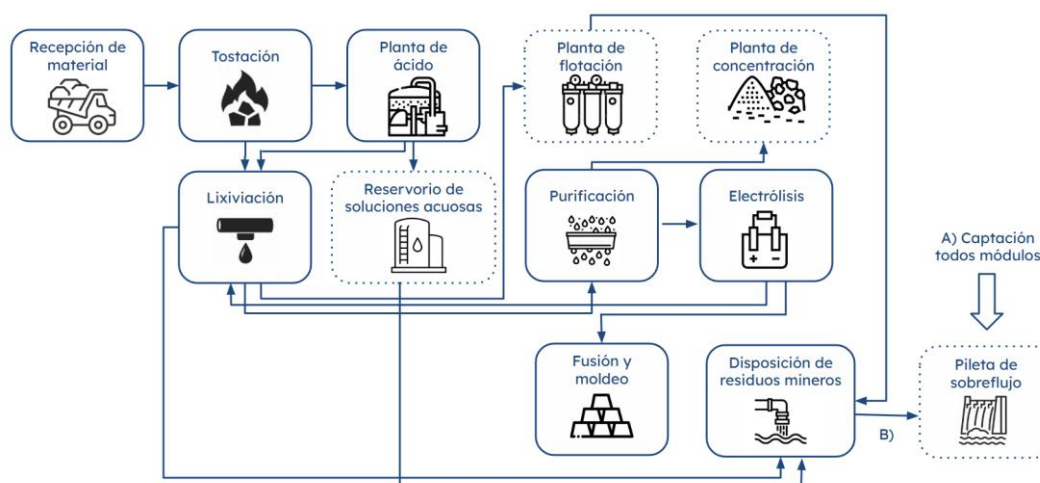


Figura 13. Modelo conceptual de proceso RLE.

Módulo Recepción de material (REC)

La delimitación de este módulo comienza cuando entra el material al área por medio de vehículos de carga con el concentrado de zinc, principalmente esfalerita (ZnS) proveniente de diversas minas, este material se analiza para conocer la composición de zinc y otros minerales de interés como Cd, Au, Ag y Cu, así como impurezas no deseadas tales como Pb, As, Fe, Co, entre otras.

Después de realizar los análisis de composición y humedad, el concentrado es sometido a mezclas de acuerdo con los resultados obtenidos, con el fin de homogeneizar sus características antes de su procesamiento. Este módulo contempla también el **almacenamiento temporal del concentrado**, el cual puede permanecer en patio o tolvas de acopio durante un periodo estimado que va desde

algunas horas hasta varios días, dependiendo de la logística de operación y la capacidad de alimentación del horno. Posteriormente, el material es transportado al módulo de tostación por medio de bandas transportadoras.

Debido al movimiento y transporte del concentrado, se lleva a cabo el riego del área para suprimir los polvos que se pueden movilizar.

Módulo Tostación (TOS)

En este módulo entra el concentrado de zinc proveniente de Recepción de materiales (REC) y se introduce a un tostador, generalmente de lecho fluidizado, a temperaturas entre los 700-900 °C, en donde se convierte el sulfuro de zinc a óxido de zinc soluble en ácido y dióxido de azufre en forma de gas. El óxido de zinc se envía a lixiviación y el dióxido de azufre se envía a la planta de ácido sulfúrico.

Módulo Planta de ácido (ACI)

Uno de los productos secundarios más importantes dentro de la producción de zinc, es el ácido sulfúrico, este se produce en una planta de ácido a partir de la alimentación de SO_2 proveniente de la oxidación del sulfuro de zinc en la tostación, posteriormente se añade un catalizador (principalmente pentóxido de vanadio, V_2O_5) para acelerar la reacción de SO_2 a SO_3 , este reacciona con agua para formar el H_2SO_4 para venta y para uso en distintas etapas del proceso.

Módulo Lixiviación (LIX)

En esta etapa del proceso, la calcina (principalmente óxido de zinc) se somete a lixiviación con una solución de ácido sulfúrico y electrolito agotado, con el propósito de disolver el zinc y otros metales solubles, así como de separar componentes no deseables. Como resultado, se obtiene una solución neutra de sulfato de zinc apta para las etapas posteriores de purificación. Durante el tratamiento, el hierro presente se elimina mediante su precipitación en forma de jarosita, mientras que el residuo sólido generado, enriquecido en plata y otros metales valiosos, se envía a la planta de flotación para su recuperación.

Módulo Planta de flotación (FLO)

El principal objetivo de este módulo es la obtención de un concentrado de metales secundarios de valor, principalmente plata (Ag) y oro (Au), mediante procesos de flotación. La alimentación

relevante corresponde a los sólidos insolubles generados en la etapa de lixiviación, los cuales contienen los metales preciosos no disueltos y que constituyen la fracción de interés para su recuperación.

Durante la flotación se adicionan reactivos específicos para favorecer la separación selectiva de estos metales valiosos respecto de la ganga. Una vez finalizado el proceso, las colas de flotación son enviadas al sistema de disposición de residuos, mientras que el concentrado obtenido se somete a deshidratación y secado, generalmente en patios acondicionados, para reducir su contenido de humedad antes de su almacenamiento temporal y posterior comercialización.

Módulo Purificación (PUR)

La solución proveniente de la lixiviación se somete a una etapa de purificación con el fin de remover metales disueltos que podrían interferir en la eficiencia y pureza del proceso de electrólisis. Durante esta operación se eliminan selectivamente dichas impurezas, como cobre, cadmio y cobalto, generalmente mediante cementación con polvo de zinc. Los sólidos obtenidos, que contienen estos metales, no solo representan impurezas del sistema, sino también subproductos de valor que pueden recuperarse posteriormente.

Módulo Planta de concentración (CON)

En este módulo se recibe el residuo sólido (cemento) proveniente del módulo de Purificación, proveniente del proceso de cementación, que incluye metales de interés económico, principalmente cadmio, para fundirlo y posteriormente comercializarlo.

Módulo Electrólisis (ELE)

La etapa de electrólisis es una de las operaciones más críticas del proceso, ya que en ella se deposita el zinc metálico con la pureza requerida. La solución purificada que alimenta las celdas debe someterse previamente a un control térmico riguroso. Después de la purificación, la solución presenta temperaturas cercanas a 50–55 °C, por lo que es enfriada antes de su ingreso al circuito electrolítico.

El enfriamiento se realiza mediante intercambiadores de calor, que operan con agua en circuito cerrado. A través de este sistema, la solución reduce su temperatura hasta un rango aproximado de

32–35 °C a la entrada de las celdas. Durante la electrólisis, debido al calor generado por el paso de corriente (efecto Joule), la temperatura del electrolito se incrementa, alcanzando valores cercanos a 38–40 °C a la salida del banco de celdas.

Este control térmico es fundamental, ya que la temperatura influye directamente en la eficiencia de corriente, la conductividad del electrolito y la calidad del depósito catódico. Un adecuado balance de enfriamiento permite mantener condiciones operativas estables y optimizar el rendimiento metalúrgico del proceso.

La solución que se obtiene después de este proceso se denomina electrolito agotado que es recirculado a lixiviación, para fines de control de pH y recuperación de agua.

Módulo Fusión y moldeo (FUS)

En esta etapa se funden las placas de zinc catódico para obtener lingotes de zinc de alta pureza, polvo de zinc y aleaciones. Este proceso se lleva a cabo en hornos de fundición y máquinas moldeadoras o lingoteras.

Módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos (DIS)

En este módulo se incluyen todos los flujos de residuos provenientes de los diversos módulos y etapas del proceso, considerando que el destino final es una instalación de disposición final de residuos metalúrgicos sólidos, que en ocasiones se denomina presa de jales, aunque no corresponde cabalmente a este tipo de instalación según se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, en donde principalmente se disponen residuos sólidos, cuyo contenido de humedad suele evaporarse por estar expuesto a la intemperie, en función de las condiciones climatológicas. Debido a la variabilidad de entradas a esta obra del proceso, se consideró establecerla como un módulo individual para una mejor interpretación del sistema.

Módulo Reservorio de soluciones acuosas (RES)

Corresponde a la infraestructura y/o dispositivos tales como tanques de almacenamiento, tuberías, drenes, entre otros, que sirven para contener por un periodo de tiempo indefinido y posteriormente transportar soluciones del proceso, así como reactivos entre módulos.

Dentro de este módulo, se pueden incluir infraestructura como:

- Planta de neutralización
- Planta de tratamiento de agua, entre otras.

Módulo Pileta de seguridad (PIL)

Módulo que representa el sistema de captación de agua de lluvia que no ingresa a los flujos del proceso, suponiendo:

- Áreas cerradas e impermeables
- Toda el agua captada escurre
- El agua de lluvia no se infiltra ni forma encharcamientos

Considerando dos escenarios:

- A) El agua que precipita es encausada directamente en este módulo
- B) El agua que precipita es captada en presa de jales, rebasa la capacidad de almacenamiento, y posteriormente se transporta a este módulo

Identificación de obras e infraestructuras dentro de módulos propuestos

Dentro de cada módulo del sistema existen diversas obras, infraestructura, equipos o maquinaria representativa que permitirán identificar los flujos de interés, estos se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Obras e infraestructuras dentro de módulos propuestos (Elaboración propia).

Módulo	Obras e infraestructura
Recepción de material	Patio Bandas transportadoras Área de camas Sótano
Tostación	Tostador Bandas transportadoras Tolvas Lanzas Almacén (Silo)
Planta de ácido	Torre de absorción y secado Ductos Electro filtros
Lixiviación	Tanques de reacción Espesadores Canaletas Filtros prensa
Planta de flotación	Celdas de flotación Tuberías Canaletas
Purificación	Tanques Canaletas Filtros prensa
Planta de concentración	Tanques Hornos de fundición Máquinas briquetadoras
Electrólisis	Torres de enfriamiento Canaletas Casa de celdas Área de lavado Tanques de almacenamiento
Disposición de residuos minero-metalúrgicos	Tuberías Presas de jales
Fusión y moldeo	Hornos de fundición Máquinas moldeadoras Máquinas lingoteras
Reservorio de soluciones acuosas	Planta de neutralización Tanques Tuberías
Pileta de seguridad	Pileta Canales Tuberías

Determinación de flujos de entrada, salida y transferencia

A partir de la información recabada, la delimitación del sistema y el modelo conceptual, así como la identificación de las obras e infraestructuras dentro de los módulos propuestos fue posible determinar los flujos de agua de entrada, salida y transferencia involucrados en cada uno de los módulos.

Con el fin de una mejor comprensión de los flujos de entrada y salida de cada uno de los módulos, en el modelo conceptual se trazaron en color verde los flujos de entrada, en color rojo los flujos de salida y en color naranja los flujos de transferencia, es decir flujos que son de salida en un módulo y de entrada en otro (Figura 14).

En total se cuantificaron 46 flujos, correspondientes a 17 flujos de entrada, 14 flujos de salida y 15 flujos de transferencia, cada uno de ellos identificado con una clave que indica el módulo-entrada o salida-número secuencial.

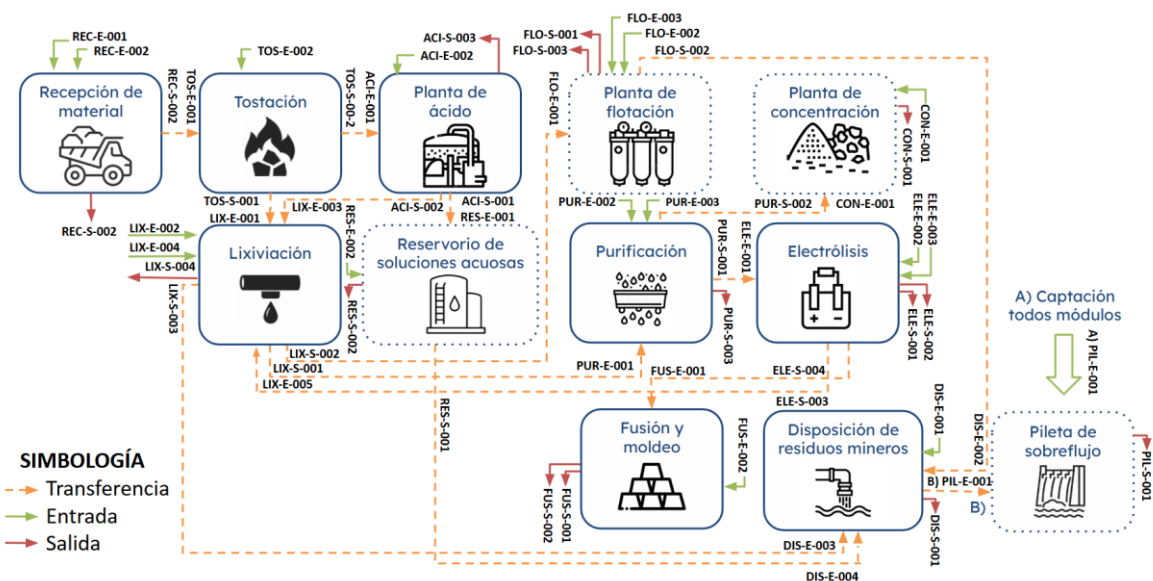


Figura 14. Flujos de proceso RLE. Flujos de transferencia (líneas punteadas en color naranja), flujos de entrada (líneas continuas en color verde) y flujos de salida (líneas continuas en color rojo)

(Elaboración propia).

Clasificación de flujos por tipo de agua

A partir de la identificación de los flujos de entrada, salida y transferencia es necesario establecer a qué tipo de agua pertenecen de acuerdo con su definición, Azul, Verde o Gris para determinar dentro de qué tipo de Huella Hídrica es necesario cuantificarlos (Azul, Verde o Gris)

De acuerdo con el MEHH (Hoekstra et al., 2011) e investigaciones previas de HH (Rodríguez, 2016; Rodríguez et al., 2023) se han realizado las siguientes consideraciones para la clasificación de flujos de acuerdo con el origen del agua.

Agua azul: Agua superficial o subterránea que se extrae de un cuerpo de usos consuntivo e incorpora al proceso.

1. **Cuantificación:** Se contabiliza sólo en pérdidas o descargas
2. **Pérdidas:** La mayoría están asociadas a la evaporación
3. **Incorporación:** Se clasifica como Agua Azul al agua que se incorpora al proceso

Agua verde: Agua de lluvia que se incorpora al proceso, a través de las superficies que se encuentran a la intemperie

1. **Escurremientos:** No se generan
2. **Incorporación:** Suele llevarse a cabo en superficies expuestas a la intemperie como: Reservorios de soluciones, presas de jales, tanques, entre otras.
3. **Captación:** Se considera captación cuando la precipitación es mayor a la evaporación en el balance diario ($P > E = \text{Captación}$)
4. Cuando la precipitación es igual a la evaporación, este flujo no se cuantifica en el cálculo de la Huella Hídrica, pero si para el balance general ($P = E$, no se cuantifica)
5. Cuando la evaporación es mayor que la precipitación, este flujo se clasifica como Agua Azul ($E > P = \text{Agua azul}$)

Agua gris: Agua necesaria para diluir los contaminantes que sobrepasen los límites máximos permisibles de acuerdo con la legislación vigente

1. **Cuantificación:** Se contabiliza únicamente en descargas o salidas de sistema
2. Se requiere conocer su composición con respecto a los contaminantes regulados

Estas consideraciones pueden observarse gráficamente en la Figura 15, que se muestra a continuación.



Figura 15. Consideraciones para la cuantificación en el balance diario entre evaporación y precipitación (Tomado de Rodríguez-García, 2024).

De acuerdo con el MEHH (Hoekstra et al., 2011), el agua tratada también se clasifica como agua azul, ya que generalmente proviene de fuentes de agua superficial o subterránea que son extraídas para su uso en actividades domésticas, industriales o productivas y posteriormente sometidas a procesos de tratamiento para su reutilización o descarga.

El tratamiento del agua residual puede contribuir a reducir la huella hídrica gris (Malla et al., 2024) debido a que disminuye la carga de contaminantes vertidos al ambiente y, por tanto, el volumen de agua requerido para su dilución.

Para nombrar a los flujos se hizo uso de nomenclatura, que consta de 3 letras representativas del módulo al que pertenece, seguido de la letra E o S, según sea el caso para un flujo de entrada (E) o salida (S), y 3 dígitos correspondientes al número de flujo en cada módulo, seguido de una breve descripción del flujo (Tabla 5).

Tabla 5. Nomenclatura de módulos del sistema.

Módulo	Nomenclatura
Recepción de materiales	REC
Tostación	TOS
Planta de ácido	ACI
Lixiviación	LIX
Planta de flotación	FLO
Purificación	PUR
Planta de concentración	CON
Electrólisis	ELE
Fusión y moldeo	FUS
Disposición de residuos minero-metalúrgicos	DIS
Reservorio de soluciones acuosas	RES
Pileta de seguridad	PIL

Por ejemplo, para el flujo **REC-E-001-Humedad del concentrado en la entrada:**

REC: Indica que el flujo corresponde al módulo Recepción de materiales

E: Indica que es un flujo de entrada

001: Indica que es el primer flujo del módulo.

Tomando en cuenta estas consideraciones se clasificaron los flujos propuestos de acuerdo con el tipo de agua al cual corresponden, para calcular la HH general del sistema evaluado, esta clasificación se muestra en la Tabla 6.

Como se puede visualizar la mayoría de los flujos clasificados corresponden a Agua Azul, estos están asociados con la incorporación de agua al proceso de origen superficial o subterráneo.

Una menor parte de estos flujos están clasificados como Agua Verde, estos se encuentran asociados a evaporación o captación de agua de lluvia en el proceso. Finalmente, y como es evidente, no se encontró ningún flujo correspondiente a Agua Gris, esto debido a la naturaleza del proceso, ya que no se llevan a cabo descargas de aguas residuales hacia cuerpos de agua con el potencial de ser contaminados ni hay salidas fuera del sistema estudiado. A pesar de ello, puede existir la posibilidad de descargas controlados o accidentales, en otros casos de estudio.

Tabla 6. Clasificación de flujos por tipo de agua.

Módulo	Clave	Nombre	Tipo	A	V	G
Recepción de material	REC-E-001	Humedad del concentrado en la entrada	Entrada	X		
	REC-E-002	Agua de riego de polvos	Entrada	X		
	REC-E-003	Alimentación para control de humedad	Entrada	X		
	REC-S-001	Humedad del concentrado en la salida	Salida	X		
	REC-S-002	Evaporación	Salida	X	X	
Tostación	TOS-E-001	Humedad del concentrada en la entrada	Entrada	X		
	TOS-E-002	Alimentación para control de humedad	Entrada	X		
	TOS-S-001	Humedad de la calcina en la salida	Salida	X		
	TOS-S-002	Vapor de agua en gases de salida	Salida	X		
Planta de ácido	ACI-E-001	Vapor de agua en gases de entrada	Entrada	X		
	ACI-E-002	Alimentación de agua	Entrada	X		
	ACI-S-001	Purga de ácido débil	Salida	X		
	ACI-S-002	Solución H ₂ SO ₄ - Lixiviación	Salida	X		
	ACI-S-003	Solución H ₂ SO ₄ - Venta	Salida	X		
Lixiviación	LIX-E-001	Humedad de la calcina en la entrada	Entrada	X		
	LIX-E-002	Preparación de reactivos	Entrada	X		
	LIX-E-003	Solución H ₂ SO ₄	Entrada	X		
	LIX-E-004	Captación	Entrada		X	
	LIX-E-005	Electrolito agotado	Entrada	X		
	LIX-S-001	Solución lixiviada	Salida	X		
	LIX-S-002	Solución de alimentación - Flotación	Salida	X		
	LIX-S-003	Jarosita	Salida	X		
	LIX-S-004	Evaporación	Salida	X	X	
Planta de flotación	FLO-E-001	Solución de alimentación	Entrada	X		
	FLO-E-002	Alimentación de agua	Entrada	X		
	FLO-E-003	Preparación de reactivos	Entrada	X		
	FLO-S-001	Evaporación	Salida	X	X	
	FLO-S-002	Colas de flotación	Salida	X		
	FLO-S-003	Humedad de concentrado en la salida	Salida	X		
Purificación	PUR-E-001	Solución lixiviada	Entrada	X		
	PUR-E-002	Preparación de reactivos	Entrada	X		
	PUR-E-003	Captación	Entrada		X	
	PUR-S-001	Solución purificada	Salida	X		
	PUR-S-002	Cemento	Salida	X		
	PUR-S-003	Evaporación	Salida	X	X	

Tabla 6. Clasificación de flujos por tipo de agua (Continuación).

Módulo	Clave	Nombre	Tipo	A	V	G
Planta de concentración	CON-E-001	Cemento	Entrada	X		
	CON-E-002	Alimentación de agua	Entrada	X		
	CON-S-001	Humedad del concentrado en la salida	Salida	X		
Electrólisis	ELE-E-001	Solución purificada	Entrada	X		
	ELE-E-002	Agua para lavado	Entrada	X		
	ELE-E-003	Captación	Entrada		X	
	ELE-S-001	Evaporación torres de enfriamiento	Salida	X		
	ELE-S-002	Evaporación	Salida	X	X	
	ELE-S-003	Electrolito agotado	Salida	X		
	ELE-S-004	Humedad en zinc catódico	Salida	X		
Fusión y moldeo	FUS-E-001	Humedad en zinc catódico	Entrada	X		
	FUS-E-002	Alimentación de agua	Entrada	X		
	FUS-S-001	Evaporación	Salida	X		
	FUS-S-002	Humedad en producto final	Salida	X		
Disposición de residuos minero-metalúrgicos	DIS-E-001	Captación	Entrada		X	
	DIS-E-002	Colas de flotación	Entrada	X		
	DIS-E-003	Jarosita	Entrada	X		
	DIS-E-004	Solución neutra	Entrada	X		
	DIS-S-001	Evaporación	Salida	X	X	
	DIS-S-002	Recuperación captación	Salida	X	X	
Reservorio de soluciones acuosas	RES-E-001	Purga de ácido débil	Entrada	X		
	RES-E-002	Captación	Entrada		X	
	RES-S-001	Solución neutra	Salida	X		
	RES-S-002	Evaporación	Salida	X	X	
Pileta de seguridad	PIL-E-001	Captación de módulos	Entrada		X	
	PIL-E-002	Captación desde presa de jales	Entrada		X	
	PIL-S-001	Evaporación	Salida	X	X	

IV.3 Desarrollo del modelo numérico

Previo a la simulación, se establecieron las ecuaciones de balance de materia necesarias para el cálculo de los flujos desconocidos en cada uno de los módulos del sistema. Una vez definidas estas expresiones, el programa GoldSim versión 12.1 se utilizó como herramienta para resolverlas y calcular los flujos en una base diaria.

La elección de este software se fundamenta en su capacidad para integrar variables determinísticas y estocásticas, lo que permite representar de manera más realista el comportamiento del sistema. La escala temporal adoptada fue diaria, con el fin de capturar adecuadamente la dinámica operativa del proceso. Idealmente, el modelo se alimenta con datos medidos día a día; sin embargo, ante posibles limitaciones en la disponibilidad de información, se incorporaron también distribuciones de probabilidad que permiten mantener una representación robusta y consistente del sistema.

A partir de la determinación de los flujos de entrada, salida y transferencia y de lo descrito en los capítulos anteriores, se establecieron los cálculos para determinar cada uno de los flujos, las fórmulas y ecuaciones propuestas se usaron dentro del modelo numérico para calcular los flujos desconocidos.

IV.3.1 Módulo Recepción de material



Figura 16. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Recepción de material (REC).

Flujos de entrada

REC-E-001 Humedad del concentrado en la entrada

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en el concentrado de zinc en forma de humedad, representa un volumen de agua que entra al módulo. Para calcular este flujo es necesario conocer la humedad del concentrado, así como la masa de concentrado a la entrada para obtener el flujo de agua contenido en el concentrado se utiliza las siguientes ecuaciones (Ec. 12 y 13).

$$ma_{e,REC} = \frac{HC_{e,REC} \cdot MC_{e,REC}}{100} \quad \text{Ec. 12}$$

$$VC_{e,REC} = \frac{ma_{e,REC}}{\rho_{agua}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$ma_{e,REC}$ = Masa de agua contenida en el concentrado a la entrada (t/d)

$HC_{e,REC}$ = Humedad del concentrado en la entrada (%)

$MC_{e,REC}$ = Masa de concentrado en la entrada (t/d)

$FC_{e,REC}$ = Flujo de agua contenida en el concentrado en la entrada (m³/d)

ρ_{agua} = Densidad del agua a 4°C y 1 atm (t/m³) = 1 t/m³

Es usual que se mida la humedad del concentrado a la entrada debido a que es necesario saber cuánto peso seco se debe de pagar a los proveedores de concentrados, en caso de que este dato no esté disponible se puede analizar la humedad mediante el método gravimétrico, o a través de un analizador de humedad que funciona a una temperatura aproximada de 150 °C, con una pequeña muestra de concentrado en pocos minutos (Figura 17).



Figura 17. Toma de muestra para determinación de humedad en analizador.

REC-E-002 Agua de riego de polvos

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizada para el riego del patio de Recepción de material para el control de polvos resultantes de la movilización del concentrado. Para determinar este flujo es necesario conocer la superficie de riego, así como el flujo de los dispositivos con los que se lleva esta acción, así como el tiempo de regado. En este caso no se contaba con un medidor de flujo, así que se realizaron mediciones de flujo midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido (Figura 18) y a través del sondeo al personal que se encarga de esta actividad ya que tampoco se tiene registro del tiempo de esta actividad.

$$F_{diario} = F \cdot t_{riego} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

F_{diario} = Flujo de agua utilizado para la supresión de polvos (m^3/d)

F = Gasto de dispositivos de riego (m^3/min)

t_{riego} = Tiempo de riego diario (min/d)



Figura 18. Patio de riego (izquierda), medición volumétrica de flujo de riego (derecha).

REC-E-003 Alimentación para control de humedad

Flujo correspondiente al volumen de agua añadido al concentrado para alcanzar el porcentaje de humedad dentro de los parámetros operativos (6-12% aproximadamente), este flujo de agua puede ser añadido a lo largo de las bandas transportadoras, así como en el área de camas, entre otro tipo de infraestructuras de acuerdo con las necesidades del proceso, generalmente este volumen de agua suele ser medido y registrado (Figura 19). Se puede calcular a partir de la ecuación 15.

$$VA_{e,REC} = A_{bandas} + A_{camas} + \dots + A_{otros} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$VA_{e,REC}$ = Flujo de agua añadida a concentrado (m^3/d)

A_{bandas} = Flujo de agua añadida a concentrado en bandas (m^3/d)

A_{camas} = Flujo de agua añadida a concentrado en camas (m^3/d)

A_{otros} = Flujo de agua añadida a concentrado en otras áreas de Recepción de material (m^3/d)



Figura 19. Bitácora y flujómetro del área, área de bandas (de izquierda a derecha).

Flujos de salida

REC-S-001 Humedad del concentrado en la salida

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en el concentrado a la salida, representa un volumen de agua que sale del módulo.

$$FC_{s,REC} = \frac{HC_{s,REC} \cdot MC_{s,REC}}{100 \cdot \rho_{agua}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$FC_{s,REC}$ = Flujo de agua contenida en el concentrado en la salida (m³/d)

$HC_{s,REC}$ = Humedad del concentrado en la salida (%)

$MC_{s,REC}$ = Masa de concentrado en la salida (t/d)

ρ_{agua} = Densidad del agua a 4°C y 1 atm (t/m³) = 1 t/m³

REC-S-002 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizada para el riego y control de polvos, que se evapora y por lo tanto forma parte de una salida en el sistema (Ec. 17)

$$E_{REC} = S_{rec} \cdot k \cdot E \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

E_{REC} = Flujo de agua evaporada en patio de riego (m³/d)

S_{REC} = Superficie destinada a riego para supresión de polvos (m²)

k = Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E = Evaporación diaria (m/d)

Debido a la evaporación presente en este flujo, es necesario aplicar un factor de corrección de la evaporación diaria (k), ya que este proceso ocurre bajo condiciones climáticas variables, como temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, que influyen directamente en su magnitud. Por ello, los valores medidos no siempre representan con precisión las condiciones reales del sistema, lo que hace necesaria su corrección para obtener estimaciones más confiables del balance hídrico (FAO, 2006).

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Recepción de material

Huella Hídrica Verde

De acuerdo con la definición de Huella Hídrica Verde, en este módulo la HHV corresponde al flujo **REC-S-002 Evaporación**, solo en caso de que en el balance diario la precipitación sobrepase a la tasa diaria de evaporación, es decir $P > E = \text{Agua Verde}$, por lo tanto, se calculará de la siguiente manera (Ec. 18).

$$HHV_{REC} = E_{REC} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

HHV_{REC} = Huella Hídrica Verde de módulo Recepción de materiales (m^3/d)

E_{REC} = Flujo de agua evaporada en patio de riego (m^3/d)

Huella Hídrica Azul

De acuerdo con el concepto de Huella Hídrica Azul, los flujos de incorporación de agua en el producto corresponden a:

3. REC-E-001 Humedad del concentrado en la entrada
4. REC-E-002 Agua de riego de polvos
5. REC-E-003 Alimentación para control de humedad

Así como el flujo **REC-S-002 Evaporación**, solo en caso de que en el balance diario la precipitación sea menor a la tasa diaria de evaporación, es decir $P < E = \text{Agua Azul}$. Por lo tanto, el valor de Huella Hídrica Azul corresponde a la sumatoria de estos flujos (Ec. 19)

$$HHA_{REC} = VC_{e,REC} + F_{diario} + VA_{e,REC} + E_{REC} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

HHA_{REC} = Huella Hídrica Azul de módulo Recepción de materiales (m^3/d)

$VC_{e,REC}$ = Flujo de agua contenida en el concentrado en la entrada (m^3/d)

F_{diario} = Flujo de agua utilizado para riego de polvos (m^3/d)

$VA_{e,REC}$ = Flujo de agua añadida a concentrado (m^3/d)

E_{REC} = Flujo de agua evaporada en patio de riego (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a la configuración del proceso en este módulo no se producen descargas en cuerpos de agua susceptibles a contaminación, por lo tanto, no se calcula Huella Hídrica Gris del módulo Recepción de materiales, asumiendo que cualquier escurrimiento generado en un evento de lluvia extraordinario en este módulo, sería encausado hacia el módulo de disposición de residuos y, en su caso, al de pileta de sobreflujo.

Huella Hídrica Total

Para el cálculo de la Huella Hídrica Total del módulo de Recepción de materiales simplemente se suman los componentes correspondientes a Huella Hídrica Verde y Azul (Ec. 20).

$$HH_{REC} = HHV_{REC} + HHA_{REC} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

HH_{REC} = Huella Hídrica de módulo Recepción de materiales (m³/d)

HHV_{REC} = Huella Hídrica Verde de módulo Recepción de materiales (m³/d)

HHA_{REC} = Huella Hídrica Azul de módulo Recepción de materiales (m³/d)

IV.3.2 Módulo Tostación

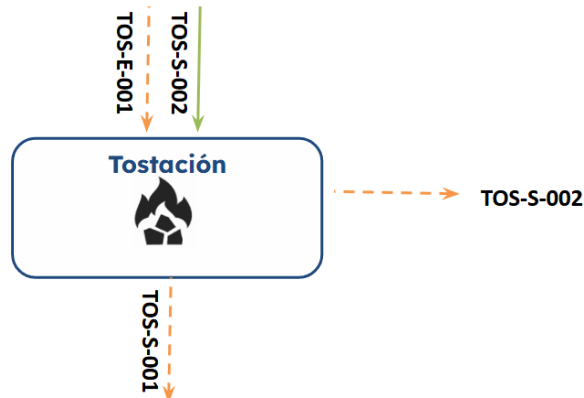


Figura 20. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Tostación (TOS).

Flujos de entrada

TOS-E-001 Humedad del concentrado en la entrada

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en el concentrado, representa un volumen de agua que entra al módulo. Corresponde a un flujo de transferencia, ya que es equivalente al que sale del módulo Recepción de materiales **REC-S-001 Humedad del concentrado en la salida** (Ec. 21).

TOS-E-002 Alimentación para control de humedad

Flujo correspondiente al volumen de agua añadida al concentrado, antes de ingresar al tostador de acuerdo con los parámetros operativos, este flujo de agua se puede añadir desde bandas mediante rociado, representa un volumen de agua que entra al módulo.

$$VA_{e,TOS} = A_{bandas} + \dots + A_{otros} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

$VA_{e,TOS}$ = Flujo de agua añadida a concentrado en la entrada (m^3/d)

A_{bandas} = Flujo de agua añadida a concentrado en bandas (m^3/d)

A_{otros} = Flujo de agua añadida a concentrado en otras áreas de Tostación (m^3/d)

Flujos de salida

TOS-S-001 Humedad de la calcina en la salida

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en la calcina (óxido de zinc), representa un volumen de agua que sale del módulo.

$$VCa_{s,TOS} = \frac{HCa_{s,TOS} \cdot MCa_{s,TOS}}{100} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$VCa_{s,TOS}$ = Flujo de agua contenida en la calcina a la salida (m^3/d)

$HCa_{s,TOS}$ = Humedad de la calcina a la salida (%)

$MCa_{s,TOS}$ = Masa de la calcina a la salida (t/d)

Debido a que la operación del horno o tostador se lleva a temperaturas cercanas a los 900°C , se considera que la calcina pierde toda el agua contenida en forma de humedad, por lo que para fines prácticos este flujo se considera igual a $0 \text{ m}^3/\text{d}$, aunque se debe reconocer que es un parámetro que no se determina en la operación.

TOS-S-002 Vapor de agua en gases de salida

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en gases y vapores que salen de tostación y entran a planta de ácido. Debido a que no es común que se mida este flujo, se recurre a un balance de materia (Ec. 23), suponiendo que debido a la alta temperatura a la que se somete el concentrado de zinc, se sobrepasa el punto de ebullición del agua (100°C), se supone que la calcina a la salida tiene un contenido de humedad nulo ($\sim 0\%$), por lo tanto se puede asumir que el agua con la que entra el concentrado al tostador en forma de humedad y el agua que se añade, se evaporan y al ser un sistema cerrado, se puede considerar que este flujo de agua en forma de vapor es el mismo que ingresa a la planta de ácido en conjunto con el dióxido de azufre en forma de gas ($\text{SO}_{2(g)}$) (Ec. 24).

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \quad \text{Ec. 23}$$

$$FG_{s,TOS} = VC_{s,REC} + VA_{e,TOS} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

$FG_{s,TOS}$ = Flujo de agua contenida en gases en forma de vapor (m^3/d)

$VC_{e,REC}$ = Flujo de agua contenida en el concentrado en la salida de Recepción de materiales (m^3/d)

$VA_{e,TOS}$ = Flujo de agua añadida a concentrado en la entrada (m^3/d)

Cálculo de Huella Hídrica en el módulo de Tostación

Huella Hídrica Verde

Debido que este módulo se encuentra en su mayoría techado y cerrado, se asume que no hay incorporación de agua de lluvia, por lo tanto, en este caso se supone que la HHV del módulo de Tostación es igual a 0 m³/d.

Huella Hídrica Azul

Los flujos correspondientes a Huella Hídrica Azul corresponden a aquellos en los que se incorpora agua al producto, en este caso solo en el flujo **TOS-E-002 Alimentación para control de humedad**, se incorpora agua en el proceso.

$$HHA_{TOS} = VA_{e,REC} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

HHA_{TOS} = Huella Hídrica Azul de módulo Tostación (m³/d)

$VA_{e,TOS}$ = Flujo de agua añadida al concentrado en la entrada (m³/d)

Huella Hídrica Gris

En este módulo no se producen descargas a cuerpos de agua susceptibles a contaminación, por lo tanto, no se cuantifica Huella Hídrica Gris.

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Azul cuantificada en el módulo, ya que no se cuantifican los componentes de la Huella Hídrica Verde ni Gris (Ec. 26).

$$HH_{TOS} = HHA_{TOS} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

HH_{TOS} = Huella Hídrica del módulo Tostación (m³/d)

HHA_{TOS} = Huella Hídrica Azul del módulo Tostación (m³/d)

IV.3.3 Módulo Planta de ácido

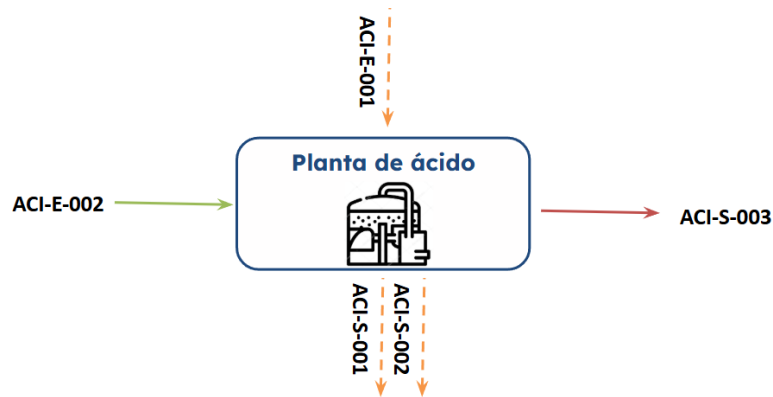


Figura 21. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Planta de ácido (ACI).

Flujos de entrada

ACI-E-001 Vapor de agua en gases de entrada

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en gases y vapores en la alimentación.

Este flujo corresponde a un flujo de transferencia, es decir en el módulo Planta de ácido es una entrada y en el módulo de Tostación es una salida (Flujo **TOS-S-002 Vapor de agua en gases de salida**), por lo tanto, la forma de calcularse es equivalente a la Ec 24.

ACI-E-002 Alimentación de agua

Flujo correspondiente al volumen de agua que alimenta a la Planta de ácido, principalmente para procesos de purga. La purga de ácido es un procedimiento que se realiza diariamente en este módulo con la finalidad de mantener el nivel de acidez deseado, controlar la concentración de impurezas y mantener la calidad y pureza del producto final.

$$A_{Aci} = N_{purgas} \cdot V_{purga} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

A_{Aci} = Flujo de agua correspondiente a la alimentación en Planta de ácido (m^3/d)

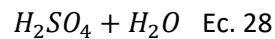
N_{purgas} = Número de purgas de ácido débil diarias (d^{-1})

V_{purga} = Volumen de agua adicionado para purga de ácido débil (m^3)

Flujos de salida

ACI-S-001 Purga de ácido débil

Flujo correspondiente a la solución de ácido sulfúrico (conocida como ácido débil) o agua de purga proveniente de la Planta de ácido, la cual representa una dilución de los niveles de acidez con fines operativos. La solución de ácido sulfúrico puede representarse de la siguiente manera:



Conociendo la concentración de la solución se puede calcular el volumen de agua.

$$\% = \frac{V_{\text{soluta}}}{V_{\text{solución}}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 29}$$

$$V_{\text{solución}} = V_{\text{soluta}} + V_{\text{solvente}} \quad \text{Ec. 30}$$

$$V_{\text{solvente}} = V_{\text{solución}} - V_{\text{soluta}} \quad \text{Ec. 31}$$

%= Concentración de solución de H_2SO_4 y agua

V_{soluta} =Volumen de H_2SO_4 contenido en solución (m^3)

$V_{\text{solución}}$ =Volumen de solución de H_2SO_4 y agua producida (m^3)

V_{solvente} =Volumen de agua contenido en solución (m^3)

A partir de este cálculo y conociendo el volumen diario aproximado que se añade para realizar las purgas de ácido débil (Ec 27) es posible calcular el flujo de agua que sale diariamente del sistema (Ec. 32).

$$V_{\text{purga}} = V_{\text{solvente}} + A_{\text{ACI}} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

V_{purga} =Volumen de agua en purga de ácido débil (m^3)

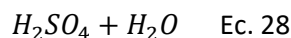
V_{solvente} =Volumen de agua contenido en solución de H_2SO_4 (m^3)

A_{ACI} = Flujo de agua correspondiente a la alimentación en Planta de ácido (m^3/d)

ACI-S-002 Solución H_2SO_4 – Lixiviación y ACI-S-002 Solución H_2SO_4 – Venta

Flujos correspondientes al volumen de agua contenido en la solución de ácido sulfúrico, debido a que la pureza aproximada es del 98.5%, por lo tanto, se supone que el 1.5% restante corresponde a un volumen de agua. Esta solución es generada en planta de ácido y es transportada a otros módulos

(flujo **ACI-S-002 Solución H₂SO₄ - Lixiviación**) o comercializada, es decir, sale del sistema (**ACI-S-002 Solución H₂SO₄ – Venta**). La solución de ácido sulfúrico puede representarse de la siguiente manera:



Conociendo la concentración de la solución se puede calcular el volumen de agua.

$$\% = \frac{V_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 29}$$

$$V_{\text{solución}} = V_{\text{soluto}} + V_{\text{solvente}} \quad \text{Ec. 30}$$

$$V_{\text{solvente,venta/lix}} = V_{\text{solución}} - V_{\text{soluto}} \quad \text{Ec. 31}$$

%= Concentración de solución de H₂SO₄ y agua

V_{soluto} =Volumen de H₂SO₄ contenido en solución (m³)

$V_{\text{solución}}$ =Volumen de solución de H₂SO₄ y agua producida por día (para venta o lixiviación) (m³)

$V_{\text{solv,venta/lix}}$ =Volumen de agua contenido en solución por día (m³)

Cálculo de la Huella Hídrica del módulo Planta de Ácido

Huella Hídrica Verde

Dentro de este módulo no se cuantifica HHV, debido a que la mayor parte de la infraestructura que comprende este módulo se encuentra techada, por lo que se asume que no hay incorporación ni evaporación de agua de lluvia, debido a que no existe interacción de las soluciones del proceso con la atmósfera.

Huella Hídrica Azul

Dentro de este módulo los flujos correspondientes a la incorporación de agua en el proceso son el flujo **ACI-S-002 Alimentación de agua**, para la purga de ácido débil y el flujo **ACI-S-002 Solución H₂SO₄ – Venta** que corresponde a salida de Agua Azul del sistema.

$$HHA_{ACI} = A_{ACI} + V_{\text{solv,venta}} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

HHA_{ACI} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de ácido (m³/d)

A_{ACI} = Flujo de agua correspondiente a la alimentación en Planta de ácido (m³/d)

$V_{\text{solv,venta}}$ = Flujo de agua contenido en solución por día (m³/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no se realizan descargas en un cuerpo de agua en este módulo, se asume que no existe HHG. A pesar de ello, pueden existir descargas en otros casos de estudio, por lo que es necesario calcular estas pérdidas a través de la ecuación de la Huella Hídrica Gris (Ec. 3).

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Azul calculada en este módulo.

$$HH_{ACI} = HHA_{ACI} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

HH_{ACI} = Huella Hídrica de módulo Planta de ácido (m³/d)

HHA_{ACI} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de ácido (m³/d)

IV.3.4 Módulo Lixiviación

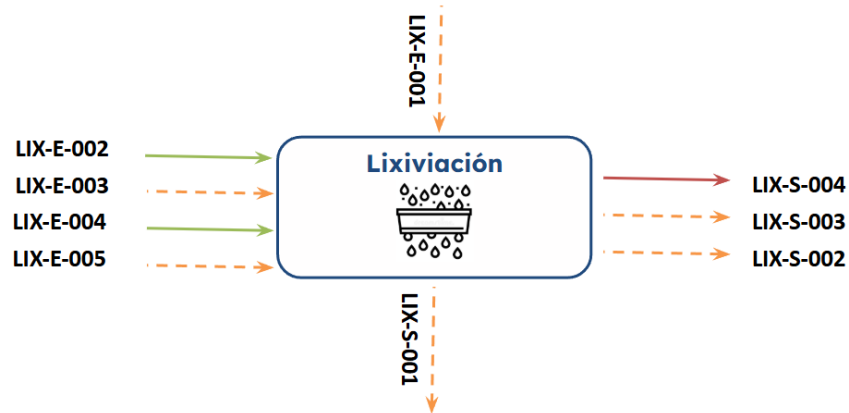


Figura 22. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Lixiviación (LIX).

Flujos de entrada

LIX-E-001 Humedad de la calcina a la entrada

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en la calcina (óxido de zinc), representa un volumen de agua que entra al módulo, debido a que la calcina pasa por un proceso de tostación a altas temperaturas, se asume que la humedad con la que entra a este módulo es casi nula, para fines prácticos se asume que este flujo es igual a 0 m³/d. Este flujo de transferencia es equivalente a **TOS-S-001 Humedad de la calcina en la salida** (Ec. 22).

LIX-E-002 Preparación de reactivos

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizado para la preparación de reactivos adicionados a lo largo del módulo de Lixiviación, tales como floculantes, para la separación sólido-liquido, entre otros.

$$V_{R,n} = V_{P,n} \cdot V_{sol,lix} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$V_{R,n}$ = Flujo de agua necesaria para preparación de reactivo n (m³/d)

$V_{P,n}$ = Volumen de agua necesario para preparar una masa determinada de reactivo n por cada m³ de solución lixiviada (m³/ m³)

$V_{sol,lix}$ = Volumen de solución lixiviada a la que se añadirá reactivo n (m³)

Esta ecuación deberá replicarse de acuerdo con el número de reactivos añadidos en este módulo.

LIX-E-003 Solución H₂SO₄

Flujo correspondiente a la solución de ácido sulfúrico que entra al módulo para la disolución de la calcina en conjunto con la solución de electrolito agotado, este flujo de transferencia es equivalente al **ACI-S-002 Solución H₂SO₄ – Lixiviación (Ec. 28-31)**.

LIX-E-004 Electrolito agotado

Flujo correspondiente al volumen de agua de electrolito agotado que entra al módulo para la disolución de la calcina en conjunto con la solución de ácido sulfúrico. Esta suele ser una medición directa ya sea a la entrada de este módulo o a la salida del módulo de Electrólisis y suele tomarse mediante totalizadores en unidades de volumen.

LIX-E-005 Captación - Lixiviación

Flujo correspondiente al volumen de agua que precipita y que se capta principalmente en canaletas, tanques y espesadores.

$$C_{lix} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

C_{lix} = Captación en el módulo de Lixiviación (m³/d)

S_{ExpT} = Superficie expuesta total (m²)

P = Precipitación pluvial diaria (m/d)

Flujos de salida

LIX-S-001 Solución lixiviada

Flujo correspondiente a la solución proveniente del proceso de lixiviación, representa un volumen de agua que sale del módulo. Esta suele ser una medición directa ya sea a la salida de este módulo o a la entrada del módulo de Purificación y suele tomarse mediante totalizadores en unidades de volumen.

LIX-S-002 Solución de alimentación - Flotación

Flujo correspondiente al volumen de la solución proveniente de Lixiviación que alimenta a la Planta de flotación para recuperación de minerales secundarios, debido a que esta solución tiene un contenido de sólidos de entre 20 a 30% aproximadamente, conociendo este valor, así como el volumen de solución que ingresa al módulo de Flotación, se puede determinar el valor del flujo.

$$SA_{FLO} = (S_{FLO} - 100) \cdot Sol_{fLO} \quad \text{Ec.37}$$

Donde:

SA_{FLO}= Flujo de agua de solución de alimentación en módulo Planta de flotación (m³/d)

S_{FLO}= Solución de alimentación en módulo Planta de Flotación (m³/d)

Sol_{FLO}= Porcentaje de sólidos en solución de alimentación (%)

LIX-S-003 Jarosita - Lixiviación

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en los lodos de jarosita provenientes de la lixiviación, representa un volumen de agua que sale del módulo.

$$m_{jar} = P_{jar} \cdot H_{jar} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

m_{jar}= Masa de agua contenido en jarosita (t/d)

P_{jar}= Producción diaria de jarosita (t/d)

H_{jar}= Porcentaje de humedad en jarosita (%)

LIX-S-004 Evaporación - Lixiviación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en lixiviación por efecto de la evaporación, principalmente en canaletas, tanques y espesadores.

$$E_{Lix} = ST_{exp} \cdot k \cdot (E - P) \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

E_{Lix}= Flujo de agua que se evapora en módulo de Lixiviación (m³/d)

S_{Texp}= Superficie de equipos que contienen soluciones y están expuestos a la superficie (m²)

k= Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E= Evaporación diaria (m/d)

P= Precipitación diaria (m/d)

Si la diferencia de E-P, es positiva se calcula como HHA, si es negativa como HHV.

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Lixiviación

Huella Hídrica Verde

La HHV es correspondiente al agua de lluvia que se capta en este módulo y corresponde a los flujos **LIX-S-005 Captación** y **LIX-S-004 Evaporación**, siempre y cuando en este último, la precipitación sea mayor a la evaporación en el balance diario ($P > E = HHV$), en su defecto, si la precipitación es menor a la evaporación se considerará a este flujo como parte de la Huella Hídrica Azul ($P < E = HHA$).

$$HHV_{LIX} = C_{LIX} - E_{LIX} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

HHV_{LIX} = Huella Hídrica Verde de módulo Lixiviación (m^3/d)

C_{LIX} = Captación en el módulo de Lixiviación (m^3/d)

E_{LIX} = Evaporación en el módulo de Lixiviación (m^3/d)

Si la diferencia de C-E, es positiva se calcula como HHA, si es negativa como HHV.

Huella Hídrica Azul

La HHA es correspondiente a los flujos de incorporación y salida de Agua Azul en el proceso, corresponden a los flujos **LIX-E-002 Preparación de reactivos**, **LIX-E-003 Solución H_2SO_4** y **LIX-S-004 Evaporación**, siempre y cuando en este último la evaporación sea mayor a la precipitación en el balance diario ($E > P = HHA$), de lo contrario este flujo se deberá considerar en el cálculo de la Huella Hídrica Verde ($P > E = HHV$)

$$HHA_{LIX} = V_{R,n} + (C_{LIX} - E_{LIX}) \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

HHA_{LIX} = Huella Hídrica Azul de módulo Lixiviación (m^3/d)

$V_{R,n}$ = Volumen de agua necesaria para preparación de reactivo n (m^3)

C_{LIX} = Captación en el módulo de Lixiviación (m^3/d)

E_{LIX} = Evaporación en el módulo de Lixiviación (m^3/d)

Si la diferencia de C-E, es positiva se calcula como HHA, si es negativa como HHV.

Huella Hídrica Gris

Debido a que no existen descargas en este módulo dirigidas a un cuerpo de agua, se asume que no hay flujos de Agua Gris. En caso de que existieran pueden calcularse a partir de la Ec. 3.

Huella Hídrica Total

Este cálculo es equivalente a la suma de las Huella Hídrica Verde y Azul, calculadas en este módulo.

$$HH_{LIX} = HHA_{LIX} + HHV_{LIX} \quad Ec. 42$$

Donde:

HH_{LIX} = Huella Hídrica de módulo Lixiviación (m³/d)

HHA_{LIX} = Huella Hídrica Azul de módulo Lixiviación (m³/d)

HHV_{LIX} = Huella Hídrica Verde de módulo Lixiviación (m³/d)

IV.3.5 Módulo Planta de flotación

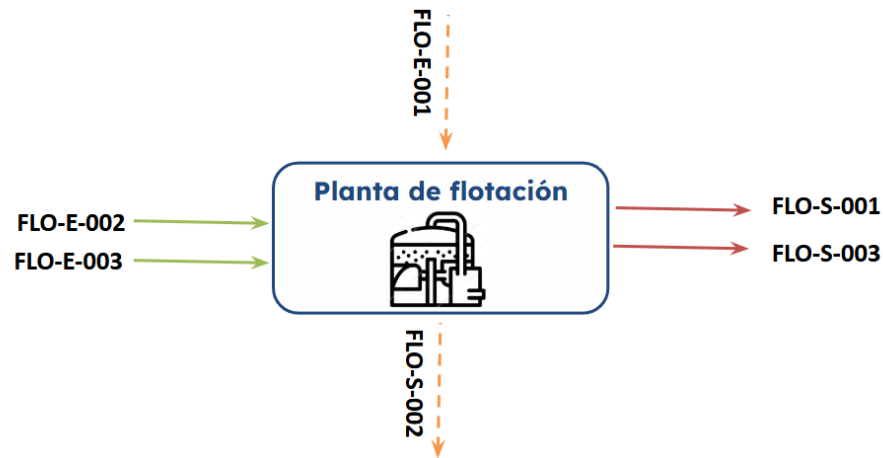


Figura 23. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Planta de flotación (FLO).

Flujos de entrada

FLO-E-001 Solución de alimentación

Flujo de transferencia, equivalente al **LIX-S-002 Solución de alimentación – Flotación** (Ec. 37)

FLO-E-002 Alimentación agua

Flujo correspondiente al volumen de agua que alimenta a las celdas de la Planta de flotación, esto con el fin de diluir la solución de alimentación cuando esta sobrepasa el contenido de sólidos. Esta suele ser una medición directa y suele tomarse mediante totalizadores en unidades de volumen.

$$A_{FLO} = \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

A_{FLO} = Flujo de alimentación de agua en módulo de Planta de flotación (m^3/d)

FLO-E-003 Preparación de reactivos

Flujo correspondiente al volumen de reactivos en solución adicionados a las celdas de flotación, tales como floculantes, colectores, espumantes, entre otros.

$$VF_{R,n} = V_{P,n} \cdot V_{sol,flo} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

$VF_{R,n}$ = Volumen diario de agua necesaria para preparación de reactivo n (m^3/d)

$V_{p,n}$ = Volumen de agua necesario para preparar una masa determinada de reactivo n por cada m³ de solución de alimentación en el módulo de Planta de Flotación (m³/ m³)

$V_{sol, flo}$ = Volumen diario de solución a la que se añadirá reactivo n (m³/d)

Esta ecuación deberá replicarse de acuerdo con el número de reactivos añadidos en este módulo.

Flujos de salida

FLO-S-001 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en este módulo por efecto de la evaporación en superficies como celdas de flotación, entre otras.

$$E_{flo} = ST_{exp} \cdot k \cdot E \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

E_{flo} = Flujo de agua que se evapora en Planta de flotación (m³/d)

ST_{exp} = Superficie de equipos que contienen soluciones y están expuestos a la superficie (m²)

k = Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E = Evaporación diaria (m/d)

FLO-S-002 Humedad de concentrado en la salida

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en el concentrado recuperado a la salida.

$$VC_{s, flo} = \frac{HC_{flo} \cdot MC_{flo}}{100} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

$VC_{s, flo}$ = Flujo de agua contenida en el concentrado a la salida (m³/d)

$HC_{s, flo}$ = Humedad del concentrado a la salida (%)

$MC_{s, flo}$ = Masa del concentrado a la salida (t/d)

FLO-S-003 Colas de flotación

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en colas de flotación en forma de humedad, que se dirige a Disposición de residuos minero-metalúrgicos.

$$C_{flo} = \frac{P_{colas} \cdot H_{colas}}{100 \cdot \rho_{agua}} \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

C_{flo} = Flujo de agua contenida en colas de flotación a la salida (m^3/d)

H_{flo} = Humedad de colas de flotación a la salida (%)

P_{flo} = Masa de colas de flotación a la salida (t/d)

ρ_{agua} = Densidad del agua a 4°C y 1 atm (t/m^3) = 1 t/m^3

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Planta de Flotación

Huella Hídrica Verde

Corresponde al flujo **FLO-S-001 Evaporación** siempre y cuando en este último la evaporación sea menor a la precipitación en el balance diario ($E < P = HHV$), de lo contrario este flujo se deberá considerar en el cálculo de la Huella Hídrica Azul ($P < E = HHA$).

$$HHA_{FLO} = E_{FLO} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

HHA_{FLO} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de flotación (m^3/d)

E_{FLO} = Flujo de agua que se evapora en Planta de flotación (m^3/d)

Huella Hídrica Azul

Los flujos que conforman la HHA del módulo Planta de flotación, corresponden a los siguientes:

- **FLO-E-001 Solución de alimentación**
- **FLO-E-002 Alimentación agua**
- **FLO-E-003 Preparación de reactivos**
- **FLO-S-001 Evaporación**

Siempre y cuando en este último la evaporación sea mayor a la precipitación en el balance diario ($E > P = HHA$), de lo contrario este flujo se deberá considerar en el cálculo de la Huella Hídrica Verde ($P > E = HHV$).

$$HHA_{FLO} = SA_{FLO} + A_{FLO} + VF_{R,n} + E_{FLO} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

HHA_{FLO} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de flotación (m^3/d)

SA_{FLO} = Flujo de agua en solución de alimentación en el módulo Planta de flotación (m^3/d)

A_{FLO} =Flujo de alimentación de agua en módulo de Planta de flotación (m^3/d)

$VF_{R,n}$ = Volumen diario de agua necesaria para preparación de reactivo n (m^3/d)

E_{FLO} = Evaporación en el módulo de Planta de flotación (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no hay descargas a cuerpos de agua, se asume que no existe HHG en este módulo, a menos que las colas de flotación se descarguen de manera incorrecta, en este caso se podría calcular a partir de la fórmula para determinar la HHG (Ec. 3).

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Verde, Azul y Gris, en caso de que esta última existiera en algún caso especial.

$$HH_{FLO} = HHV_{FLO} + HHA_{FLO} + HHG_{FLO} \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

HH_{FLO} = Huella Hídrica de módulo Planta de flotación (m^3/d)

HHV_{FLO} = Huella Hídrica Verde de módulo Planta de flotación (m^3/d)

HHA_{FLO} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de flotación (m^3/d)

HHG_{FLO} = Huella Hídrica Gris de módulo Planta de flotación (m^3/d)

IV.3.6 Módulo Purificación

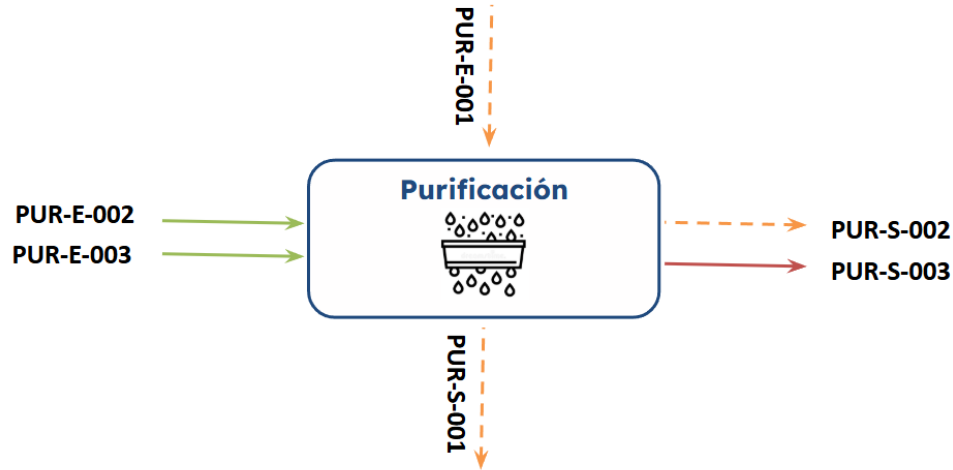


Figura 24. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Purificación (ACI).

Flujos de entrada

PUR-E-001 Solución lixiviada - Purificación

Flujo correspondiente a la solución proveniente del proceso de lixiviación, representa un volumen de agua que entra al módulo, este flujo es equivalente a un flujo de transferencia, debido a que es una salida en el módulo de Lixiviación por lo tanto se puede calcular de la misma forma que el flujo

LIX-S-001 Solución lixiviada.

PUR-E-002 Preparación de reactivos

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizado para la preparación de reactivos adicionados a lo largo del módulo de Purificación.

$$VP_{R,n} = V_{P,n} \cdot V_{sol,pur} \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

$VP_{R,n}$ = Volumen diario de agua necesaria para preparación de reactivo n (m^3/d)

$V_{P,n}$ = Volumen de agua necesario para preparar una masa determinada de reactivo n por cada m^3 de solución purificada (m^3/m^3)

$V_{sol,pur}$ = Volumen diario de solución purificada a la que se añadirá reactivo n (m^3/d)

Esta ecuación deberá replicarse de acuerdo con el número de reactivos añadidos en este módulo.

PUR-E-003 Captación

Flujo correspondiente al volumen de agua que precipita y que se capta por superficies expuestas a la intemperie.

$$C_{PUR} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 52}$$

Donde:

C_{PUR} = Captación en el área de purificación (m³/d)

S_{expT} = Superficie expuesta total (m²)

P = Precipitación pluvial diaria (m/d)

Flujos de salida

PUR-S-001 Solución purificada salida

Flujo correspondiente a la solución proveniente del proceso de purificación, representa un volumen de agua que sale del módulo. Esta suele ser una medición directa principalmente a la salida de este módulo y suele tomarse mediante totalizadores en unidades de volumen.

PUR-S-002 Cemento

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en el cemento proveniente del proceso de purificación, representa un volumen de agua que sale del módulo.

$$C_{ePUR} = \frac{P_{cem} \cdot H_{cem}}{100 \cdot \rho_{agua}} \quad \text{Ec. 53}$$

Donde:

C_{ePUR} = Flujo de agua contenida en cemento (m³/d)

H_{cem} = Humedad de cemento (%)

P_{cem} = Volumen de cemento (t/d)

ρ_{agua} = Densidad del agua a 4°C y 1 atm (t/m³) = 1 t/m³

PUR-S-003 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde de la solución expuesta a la intemperie por efecto de la evaporación.

$$E_{sol} = S_{Texp} \cdot k \cdot E \quad \text{Ec. 54}$$

Donde:

E_{sol} = Flujo de agua que se evapora de la solución (m³/d)

ST_{exp} = Superficie de equipos que contienen solución y están expuestos a la superficie (m²)

k = Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E = Evaporación diaria (m/d)

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Purificación

Huella Hídrica Verde

Corresponde a los flujos **PUR-E-003 Captación** y **PUR-S-003 Evaporación**, siempre y cuando en el balance diario la precipitación sea mayor a la evaporación ($P > E = HHV$), de lo contrario serán clasificado como HHA.

$$HHV_{PUR} = C_{PUR} - E_{sol} \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

HHV_{PUR} = Huella Hídrica Verde de módulo Purificación (m³/d)

C_{PUR} = Captación en el área de purificación (m³/d)

E_{sol} = Flujo de agua que se evapora de la solución purificada (m³/d)

Si la diferencia de C-E, es positiva se calcula como HHA, si es negativa como HHV.

Huella Hídrica Azul

Es equivalente a los flujos **PUR-E-002 Preparación de reactivos** y **PUR-S-003 Evaporación** siempre y cuando en el balance diario la evaporación sea mayor a la precipitación ($E > P = HHA$), de lo contrario será clasificado como HHV.

$$HHA_{PUR} = VP_{R,n} + E_{sol} \quad \text{Ec. 56}$$

Donde:

HHA_{PUR} = Huella Hídrica Azul de módulo Purificación (m³/d)

$VP_{R,n}$ = Volumen diario de agua necesaria para preparación de reactivo n (m³/d)

E_{sol} = Flujo de agua que se evapora de la solución purificada (m³/d)

Huella Hídrica Gris

En este módulo no se calcula HHG, debido a que no hay descargas a cuerpos de agua.

Huella Hídrica Total

Es equivalente a la Huella Hídrica Verde y Azul calculada en este módulo.

$$HH_{PUR} = HHV_{PUR} + HHA_{PUR} \text{ Ec. 57}$$

Donde:

HH_{PUR} = Huella Hídrica de módulo Purificación (m³/d)

HHV_{PUR} = Huella Hídrica Verde de módulo Purificación (m³/d)

HHA_{PUR} = Huella Hídrica Azul de módulo Purificación (m³/d)

IV.3.7 Módulo Planta de concentración

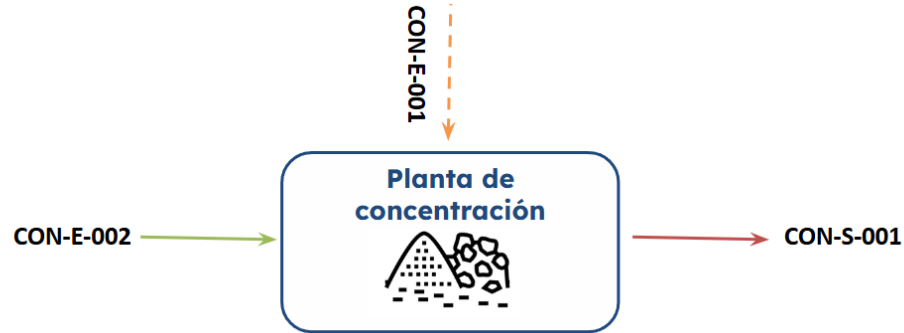


Figura 25. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Planta de concentración (CON).

Flujos de entrada

CON-E-001 Cemento

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en el cemento proveniente del proceso de purificación, representa un flujo de transferencia y un volumen de agua que entra al módulo, equivale al flujo **PUR-S-002 Cemento** (Ec. 53).

CON-E-002 Alimentación de agua

Flujo correspondiente al volumen de agua que alimenta a la Planta de concentración para diversos usos. Esta suele ser una medición directa y suele tomarse mediante totalizadores en unidades de volumen.

$$A_{CON} = \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad \text{Ec. 58}$$

Donde:

A_{CON} =Flujo de alimentación de agua en módulo de Planta de concentración (m^3/d)

Flujos de salida

CON-S-001 Humedad del briquetes en la salida

Flujo correspondiente a la humedad contenida en el concentrado recuperado a la salida en forma de briquetes, representa un volumen de agua que sale del módulo. Debido a que el concentrado pasa por un proceso de fundición a altas temperaturas, se asume que la humedad es casi nula ($\sim 0\%$), por lo tanto y para fines prácticos, se asume que este flujo es equivalente a $0 \text{ m}^3/\text{d}$.

Cálculo de Huella Hídrica en el módulo Planta de Concentración

Huella Hídrica Verde

Debido a que este módulo suele encontrarse totalmente techado, se asume que no se incorpora agua de lluvia al proceso, por lo que no se cuantifica HHV en este módulo.

Huella Hídrica Azul

Corresponde al flujo de alimentación de agua en el módulo **CON-E-002 Alimentación de agua**.

$$HHA_{CON} = A_{CON} \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

HHA_{CON} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de concentración (m^3/d)

A_{CON} = Flujo de alimentación de agua en módulo de Planta de concentración (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no se producen descargas en este módulo, no se cuantifica HHG

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Azul, calculada en este módulo.

$$HH_{CON} = HHA_{CON} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde:

HH_{CON} = Huella Hídrica de módulo Planta de concentración (m^3/d)

HHA_{CON} = Huella Hídrica Azul de módulo Planta de concentración (m^3/d)

IV.3.8 Módulo Electrólisis

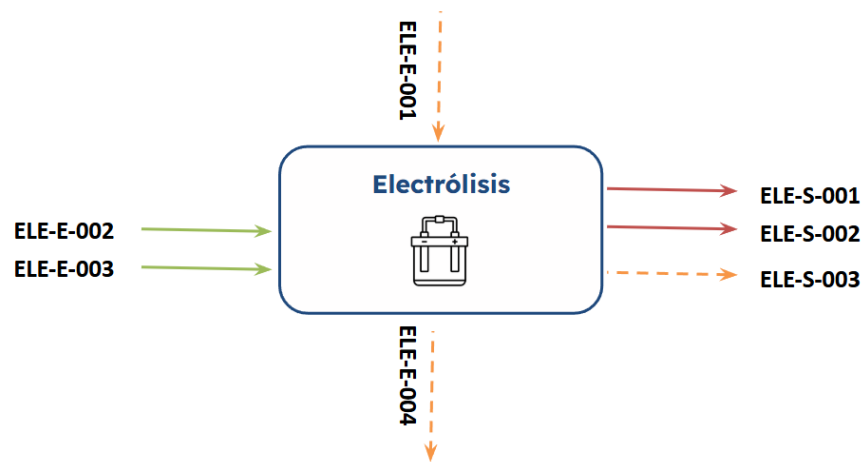


Figura 26. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Electrólisis (ELE).

Flujos de entrada

ELE-E-001 Solución purificada

Flujo correspondiente al volumen de solución proveniente del proceso de purificación, representa un volumen de agua que entra al módulo, así como un flujo de transferencia, equivalente al flujo

PUR-S-001 Solución purificada.

ELE-E-002 Agua para lavado

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizado para el lavado de zinc catódico adherido a los cátodos.

$$A_{lavado} = P_{Zn} \cdot A_{Zn} \quad \text{Ec. 61}$$

Donde:

A_{lavado} = Volumen de agua de lavado (m^3/d)

P_{Zn} = Producción de zinc catódico (t/d)

A_{Zn} = Volumen de agua utilizado por tonelada de zinc catódico(m^3/t)

ELE-E-003 Captación

Flujo correspondiente al volumen de agua que precipita y que se capta por superficies expuestas a la intemperie.

$$C_{ELE} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 62}$$

Donde:

C_{ELE} = Captación en módulo de Electrólisis (m^3/d)

S_{EXP} = Superficie expuesta total (m^2)

P = Precipitación pluvial diaria (m/d)

Flujos de salida

ELE-S-001 Evaporación torres de enfriamiento

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en torres de enfriamiento, debido al intercambio de calor entre la solución caliente, en este caso solución purificada o electrolito agotado, y la corriente de aire que ingresa al dispositivo, de acuerdo con las fuentes consultadas suele evaporarse entre el 1-2% de la solución que entra a las torres (Sleite et al., 2020, MachCooling, 2025).

$$E_{torres} = V_{sol,e} \cdot P_e \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

E_{torres} = Volumen de agua que se evapora en torres de enfriamiento (m^3/d)

$V_{sol,e}$ = Volumen diario de solución que ingresa a torre de enfriamiento (m^3)

P_e = Porcentaje de evaporación de solución enfriada (%)

ELE-S-002 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en el área de Electrólisis por efecto de la evaporación, principalmente en casa de celdas, canaletas, entre otras áreas.

$$E_{ELE} = ST_{exp} \cdot k \cdot E \quad \text{Ec. 64}$$

Donde:

E_{ELE} = Volumen de agua que se evapora en Electrólisis (m^3/d)

ST_{exp} = Superficie de equipos que contienen soluciones y están expuestos a la superficie (m^2)

k = Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E = Evaporación diaria (m/d)

ELE-S-003 Electrolito agotado

Flujo correspondiente al volumen de electrolito agotado proveniente de electrólisis y que se recircula al módulo Lixiviación. Este flujo de transferencia es equivalente a **LIX-E-004 Electrolito agotado**.

ELE-S-004 Humedad contenida en zinc catódico

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en forma de humedad en el zinc catódico (Figura 27).



Figura 27. Láminas de zinc catódico

$$m_{agua,Zn} = \frac{H_{Zn} \cdot M_{Zn}}{100} \quad \text{Ec. 65}$$

Donde:

$m_{agua,Zn}$ = Flujo de agua contenida en el zinc catódico en la salida (m³/d)

H_{Zn} = Humedad del zinc catódico (%)

M_{Zn} = Masa del zinc catódico (t/d)

Se asume que este contenido de agua es casi nulo (~0%) por lo que para fines prácticos este flujo equivale a 0 m³/d.

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Electrólisis

Huella Hídrica Verde

Corresponde al flujo **ELE-E-003 Captación** y **ELE-S-002 Evaporación**, siempre y cuando en el balance diario la precipitación sea mayor a la evaporación ($P > E = HHV$), de lo contrario, este último será cuantificado como HHA ($P < E = HHA$)

$$HHV_{ELE} = (C_{ELE} - E_{ELE}) \quad \text{Ec. 66}$$

Donde:

HHV_{ELE} = Huella Hídrica Verde de módulo Electrólisis (m^3/d)

C_{ELE} = Captación en módulo de Electrólisis (m^3/d)

E_{ELE} = Volumen de agua que se evapora en Electrólisis (m^3/d)

Si la diferencia de C-E, es positiva se calcula como HHA, si es negativa como HHV.

Huella Hídrica Azul

Corresponde a los flujos **ELE-E-002 Agua de lavado**, **ELE-S-001 Evaporación torres de enfriamiento** y **ELE-S-002 Evaporación**, siempre y cuando en el balance diario la precipitación sea menor a la evaporación ($P < E = HHA$), de lo contrario, este último será cuantificado como HHV ($P > E = HHV$)

$$HHA_{ELE} = A_{lavado} + E_{torres} + E_{ELE} \quad \text{Ec. 67}$$

Donde:

HHA_{ELE} = Huella Hídrica Azul de módulo Electrólisis (m^3/d)

A_{lavado} = Volumen de agua de lavado (m^3/d)

E_{torres} = Volumen de agua que se evapora en torres de enfriamiento (m^3/d)

E_{ELE} = Volumen de agua que se evapora en Electrólisis (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no hay descargas en este módulo, no se cuantificó Huella Hídrica Gris.

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Verde y Azul calculada en este módulo.

$$HH_{ELE} = HHV_{ELE} + HHA_{ELE} \quad \text{Ec. 68}$$

Donde:

HH_{ELE} = Huella Hídrica de módulo Electrólisis (m^3/d)

HHV_{ELE} = Huella Hídrica Verde de módulo Electrólisis (m^3/d)

HHA_{ELE} = Huella Hídrica Azul de módulo Electrólisis (m^3/d)

IV.3.9 Módulo Fusión y moldeo

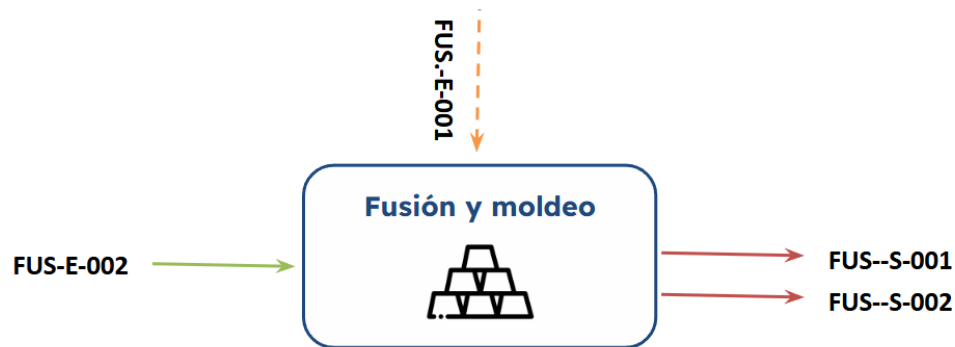


Figura 28. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Fusión y moldeo (FUS).

Flujos de entrada

FUS-E-001 Humedad contenida en zinc catódico

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en zinc catódico proveniente del proceso de Electrólisis, representa un volumen de agua que entra al módulo, es un flujo de transferencia, equivalente al flujo **ELE-S-004 Humedad contenida en zinc catódico** (Ec. 65).

FUS-E-002 Alimentación de agua

Flujo correspondiente al volumen de agua utilizado para uso general en el módulo de Fusión y moldeo, en actividades como enfriamiento y desmolde.

$$A_{FUS} = C_{FUS} \cdot T \cdot P_T \quad \text{Ec. 69}$$

Donde:

A_{FUS} = Flujo de alimentación de agua en módulo Fusión y moldeo (m³/d)

C_{FUS} = Consumo de agua para enfriamiento y desmolde por lote de producción (m³/lotes)

T = Número de lotes por turno (lotes/turno)

P_T = Número de turnos por día (turnos/d)

Flujos de salida

FUS-S-001 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en el área de Fusión y moldeo metálico por efecto de la evaporación.

$$E_{FUS} = ST_{exp} \cdot k \cdot E \quad \text{Ec. 70}$$

Donde:

E_{FUS} = Volumen de agua que se evapora en Fusión y moldeo (m^3/d)

ST_{exp} = Superficie de equipos que contienen soluciones y están expuestos a la superficie (m^2)

k = Factor de corrección de evaporación (adimensional)

E = Evaporación diaria (m/d)

FUS-S-002 Humedad contenida en producto final

Flujo correspondiente al volumen de agua contenido en zinc catódico proveniente del proceso de electrólisis, representa un volumen de agua que sale del módulo, debido a que el zinc catódico se funde a temperaturas muy altas, se asume que la humedad contenida en el producto final es casi nula ($\sim 0\%$), por lo que para fines prácticos se asume que este flujo es igual a $0 m^3/d$.

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Fusión y moldeo

Huella Hídrica Verde

Debido a que este módulo se encuentra en su mayoría techado, se asume que no hay captación de agua de lluvia, por lo tanto, no se cuantifica HHV.

Huella Hídrica Azul

Corresponde a los flujos de incorporación y evaporación de agua **FUS-E-002 Alimentación de agua** y **FUS-S-001 Evaporación**, respectivamente.

$$HHA_{FUS} = A_{FUS} + E_{FUS} \quad \text{Ec. 71}$$

Donde:

HHA_{FUS} = Huella Hídrica Azul de módulo Fusión y moldeo (m^3/d)

A_{FUS} = Flujo de alimentación de agua de módulo Fusión y moldeo (m^3/d)

E_{FUS} = Flujo de agua evaporada de módulo Fusión y moldeo (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no hay descargas en este módulo, no se cuantifica HHG.

Huella Hídrica Total

Corresponde a la Huella Hídrica Azul calculada en este módulo.

$$HH_{FUS} = HHA_{FUS} \quad \text{Ec. 72}$$

Donde:

HH_{FUS} = Huella Hídrica de módulo Fusión y moldeo (m³/d)

HHA_{FUS} = Huella Hídrica Azul de módulo Fusión y moldeo (m³/d)

IV.3.10 Módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos

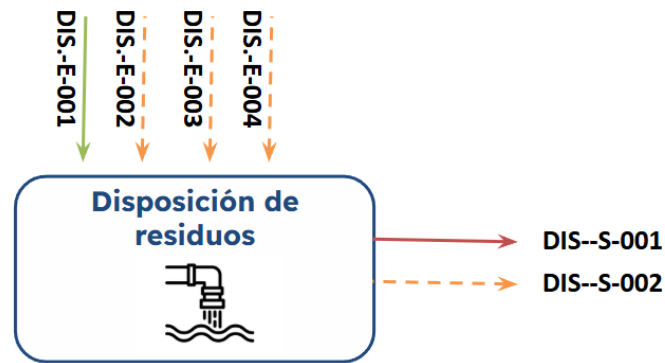


Figura 29. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos (DIS).

Flujos de entrada

DIS-E-001 Captación

Flujo correspondiente al volumen de agua proveniente de la precipitación pluvial, captado por el área de Disposición de residuos minero-metalúrgicos.

$$C_{DIS} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 73}$$

Donde:

C_{DIS} = Captación en el módulo Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos (m^3/d)

S_{ExpT} = Superficie expuesta total (m^2)

P = Precipitación pluvial diaria (m/d)

DIS-E-002 Colas de flotación

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en las colas de flotación provenientes del módulo Planta de flotación, representa un volumen de agua que entra al módulo, flujo de transferencia, equivalente al flujo **FLO-S-003 Colas de flotación** (Ec. 47).

DIS-E-003 Jarosita

Flujo correspondiente al volumen de agua contenida en los lodos de jarosita provenientes de la lixiviación, representa un volumen de agua que entra al módulo, flujo de transferencia, equivalente al flujo **LIX-S-003 Jarosita** (Ec. 38).

DIS-E-004 Solución neutra

Flujo correspondiente a la solución de ácido sulfúrico (conocida como ácido débil) proveniente del módulo Planta de ácido, se envía a Reservorio de soluciones para ser neutralizado e ingresa a presa de jales, este flujo es equivalente **RES-S-001 Solución neutra** (Ec. 80).

Salida

DIS-S-001 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en el área de Disposición de residuos mineros por efecto de la evaporación, debido a que el espejo de agua cambia continuamente, es ideal calcular la superficie del espejo de agua diariamente, esto con el apoyo de los niveles en presas, así como de imágenes satelitales.

$$E_{DIS} = ST_n \cdot E \quad \text{Ec. 74}$$

Donde:

E_{DIS} = Evaporación en el módulo Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos (m³/d)

ST_n = Superficie de espejo de agua en el día n (m²)

E = Evaporación diaria (m/d)

DIS-S-002 Recuperación captación

Flujo equivalente al porcentaje de volumen de agua de lluvia captado en el módulo, que se recircula en el proceso mediante la movilización hacia el módulo Pileta de seguridad.

$$R_{cap} = P_{rec} \cdot C_{DIS} \quad \text{Ec. 75}$$

Donde:

R_{cap} = Flujo de agua de lluvia recuperada (m³/d)

P_{rec} = Porcentaje de agua de lluvia recuperada (%)

C_{DIS} = Captación en el módulo Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos (m³/d)

Cálculo de Huella Hídrica

Huella Hídrica Verde

Corresponde a los flujos **DIS-E-001 Captación** y **DIS-S-001 Evaporación**, siempre y cuando en este último la precipitación sea mayor a la evaporación en el balance diario ($P > E = HHV$), de lo contrario este flujo será calculado como HHA ($P < E = HHA$).

$$HHV_{DIS} = C_{DIS} + E_{DIS} \text{ Ec. 76}$$

Donde:

HHV_{DIS}= Huella Hídrica Verde del módulo de Disposición de Residuos Mineros (m³/d)

C_{DIS}= Captación en el módulo de Disposición de Residuos Mineros (m³/d)

E_{DIS}= Evaporación en el módulo de Disposición de Residuos Mineros (m³/d)

Huella Hídrica Azul

Corresponde a los flujos de incorporación:

- **DIS-E-002 Colas de flotación**
- **DIS-E-003 Jarosita**
- **DIS-E-004 Solución neutra**

Así como el flujo **DIS-S-001 Evaporación**, siempre y cuando en este ultimo la precipitación sea menor a la evaporación en el balance diario ($P < E = HHA$), de lo contrario este flujo será calculado como HHV ($P > E = HHV$).

$$HHA_{DIS} = C_{FLO} + m_{Jar} + S_{neu} + E_{DIS} \text{ Ec. 77}$$

Donde:

HHA_{DIS}= Huella Hídrica Azul del módulo de Disposición de Residuos Mineros (m³/d)

C_{FLO}= Flujo de agua contenida en colas de flotación a la salida (m³/d)

m_{Jar}= Masa de agua contenido en jarosita (t/d)

S_{neu}= Flujo de agua contenida en solución neutra (m³/d)

E_{DIS}= Evaporación en el módulo de Disposición de Residuos Mineros (m³/d)

Huella Hídrica Gris

En el caso de estudio analizado no se realizan descargas a cuerpos de agua susceptibles a ser contaminados, pero en el caso de que existieran puede calcularse la HHG correspondiente con la ecuación 3.

Huella Hídrica Total

Corresponde a las Huellas Verde y Azul calculadas en este módulo, además de la HHG en caso de que sea cuantificada.

$$HH_{DIS} = HHV_{DIS} + HHA_{DIS} + HHG_{DIS} \text{ Ec. 78}$$

Donde:

HH_{DIS} = Huella Hídrica de módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos (m^3/d)

HHV_{DIS} = Huella Hídrica Verde de módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos (m^3/d)

$HH_{A_{DIS}}$ = Huella Hídrica Azul de módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos (m^3/d)

HHG_{DIS} = Huella Hídrica Gris de módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos (m^3/d)

IV.3.11 Módulo Reservorio de soluciones acuosas



Figura 30. Flujos de entrada, salida y transferencia de modulo Reservorio de Soluciones Acuosas (RES).

Flujos de entrada

RES-E-001 Purga de ácido débil

Flujo correspondiente a la solución de ácido sulfúrico, conocida como purga de ácido débil, proveniente de la Planta de ácido, flujo de transferencia equivalente a **ACI-S-001 Purga de ácido débil** (Ec. 43-46).

RES-E-002 Captación

Flujo correspondiente al volumen de agua proveniente de la precipitación pluvial, captado por el área de Reservorio de soluciones acuosas.

$$C_{RES} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 79}$$

Donde:

C_{Dis} = Captación en el módulo Reservorio de soluciones acuosas (m³/d)

S_{ExpT} = Superficie expuesta total (m²)

P = Precipitación pluvial diaria (m)

Flujos de salida

RES-E-001 Solución neutra

Este flujo es equivalente a la purga de ácido débil neutralizado con una solución alcalina, es decir se adiciona agua a este flujo con el fin de lograr un pH menos ácido y poder transportar esta solución al módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos.

$$S_N = V_{sol,purga} + S_{alcalina} \quad \text{Ec. 80}$$

Donde:

S_N =Flujo de agua contenido en solución neutralizada (m³/d)

$V_{sol,purga}$ =Volumen de agua contenido en solución de purga (m³/d)

$S_{alcalina}$ =Volumen de solución alcalina añadida (m³/d)

RES-S-002 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en el área de Reservorio de soluciones acuosas por efecto de la evaporación

$$E_{RES} = ST_{exp} \cdot E \quad \text{Ec. 81}$$

Donde:

E_{Dis} = Evaporación en el módulo Reservorio de soluciones acuosas (m³/d)

ST = Superficie expuesta total en el módulo(m²)

E = Evaporación diaria (m/d)

Cálculo de Huella Hídrica del módulo Reservorio de soluciones acuosas

Huella Hídrica Verde

Corresponde a los flujos de captación de agua de lluvia **RES-E-002 Captación** y evaporación **RES-S-002 Evaporación**, siempre y cuando en este último la precipitación sea mayor a la evaporación en el balance diario ($P > E = HHV$), de lo contrario se cuantificara como HHA ($P < E = HHA$).

$$HHV_{RES} = C_{RES} + E_{RES} \quad \text{Ec. 82}$$

Donde:

HHV_{RES} = Huella Hídrica Verde del módulo de Reservorio de soluciones acuosas (m³/d)

C_{RES} = Captación en el módulo de Reservorio de soluciones acuosas (m³/d)

E_{RES} = Evaporación en el módulo de Reservorio de soluciones acuosas (m³/d)

Huella Hídrica Azul

Corresponde a los flujos **ACI-S-001 Purga de ácido débil** y **RES-S-002 Evaporación**, siempre y cuando en ese último la precipitación sea menor a la evaporación en el balance diario ($P < E = HHA$), de lo contrario se cuantificara como HHV ($P > E = HHV$).

$$HHA_{RES} = V_{solv,purga} + E_{RES} \quad \text{Ec. 83}$$

Donde:

HHA_{RES} = Huella Hídrica Azul del módulo Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

$V_{solv,purga}$ =Volumen de agua contenido en solución de purga (m^3/d)

E_{RES} = Evaporación en el módulo de Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no hay descargas en este módulo, no se cuantifica HHG. En caso de que existieran en otro sitio de estudio, deberán calcularse con la ecuación para determinar la HHG (Ec. 3).

Huella Hídrica Total

Corresponde a las Huellas Verde y Azul calculadas en este módulo, además de la HHG en caso de que sea cuantificada.

$$HH_{RES} = HHV_{RES} + HHA_{RES} + HHG_{RES} \quad \text{Ec. 84}$$

Donde:

HH_{RES} = Huella Hídrica de módulo Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

HHV_{RES} = Huella Hídrica Verde de módulo Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

HHA_{RES} = Huella Hídrica Azul de módulo Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

HHG_{RES} = Huella Hídrica Gris de módulo Reservoirio de soluciones acuosas (m^3/d)

IV.3.12 Módulo Pileta de seguridad

El objetivo de este módulo es la captación de agua de lluvia en un módulo especializado para esta función con la finalidad de recircular el agua captada en el proceso. En el caso en que no se capte agua de lluvia individualmente en cada uno de los módulos, podrá utilizarse este módulo.



Figura 31. Flujos de entrada, salida y transferencia de módulo Pileta de seguridad (PIL).

Flujos de entrada

PIL-E-001 Captación de módulos

Flujo correspondiente al volumen de agua de lluvia captado directamente de todas las superficies del proceso, con excepción de las consideradas anteriormente en otros módulos.

$$C_{PIL} = S_{expT} \cdot P \quad \text{Ec. 85}$$

Donde:

C_{PIL} = Captación en módulo de Pileta de Seguridad (m^3/d)

S_{expT} = Superficie expuesta total (m^2)

P = Precipitación pluvial diaria (m/d)

PIL-E-001 Recuperación captación

Flujo correspondiente al volumen de agua de lluvia captado indirectamente de todas las superficies del proceso, con excepción de las consideradas anteriormente en otros módulos. Equivalente al flujo de transferencia **DIS-S-002 Recuperación captación** (Ec. 85).

Flujos de salida

PIL-S-001 Evaporación

Flujo correspondiente al volumen de agua que se pierde en las superficies del módulo, por efecto de la evaporación.

$$E_{PIL} = ST_{exp} \cdot E \quad \text{Ec. 86}$$

Donde:

E_{PIL} = Flujo de agua que se pierde en Pileta de Seguridad por efecto de la evaporación (m^3/d)

S_{Texp} = Superficie de equipos que contienen soluciones y están expuestos a la superficie (m^2)

E = Evaporación diaria (m/d)

Cálculo de Huella Hídrica en el módulo Pileta de seguridad (PIL)

Huella Hídrica Verde

Corresponde a los flujos **PIL-E-001 Captación de módulos**, **PIL-E-001 Recuperación captación** y **PIL-S-001 Evaporación**, siempre y cuando en este ultimo la precipitación sea mayor a la evaporación en el balance diario ($P > E = HHV$), de lo contrario se cuantificara como HHA ($P < E = HHA$).

$$HHV_{PIL} = R_{cap} + C_{PIL} + E_{PIL} \text{ Ec. 87}$$

Donde:

HHV_{PIL} = Huella Hídrica Verde del módulo de Pileta de seguridad (m^3/d)

R_{cap} = Flujo de agua de lluvia recuperada (m^3/d)

C_{PIL} = Captación en el módulo de Pileta de seguridad (m^3/d)

E_{PIL} = Evaporación en el módulo de Pileta de seguridad (m^3/d)

Huella Hídrica Azul

Corresponde al flujo de evaporación **PIL-S-001 Evaporación**, siempre y cuando en este ultimo la precipitación sea menor a la evaporación en el balance diario ($P < E = HHA$), de lo contrario se cuantificara como HHV ($P > E = HHV$).

$$HHA_{PIL} = E_{PIL} \text{ Ec. 88}$$

Donde:

HHA_{PIL} = Huella Hídrica Azul del módulo de Pileta de seguridad (m^3/d)

E_{PIL} = Evaporación en el módulo de Pileta de seguridad (m^3/d)

Huella Hídrica Gris

Debido a que no hay descargas en este módulo, no se cuantifica HHG, en caso de que existieran en otro caso de estudio, se deberán calcular con la Ecuación 3.

Huella Hídrica Total

Corresponde a las Huellas Verde y Azul calculadas en este módulo, además de la HHG en caso de que sea cuantificada.

$$HH_{PIL} = HHV_{PIL} + HHA_{PIL} + HHG_{PIL} \quad \text{Ec. 89}$$

Donde:

HH_{PIL} = Huella Hídrica de módulo Pileta de seguridad (m³/d)

HHV_{PIL} = Huella Hídrica Verde de módulo Pileta de seguridad (m³/d)

HHA_{PIL} = Huella Hídrica Azul de módulo Pileta de seguridad (m³/d)

HHG_{PIL} = Huella Hídrica Gris de módulo Pileta de seguridad (m³/d)

IV.4 Caso de estudio

A partir de la determinación de los flujos de entrada, salida y transferencia descritos anteriormente se llevaron a cabo visitas al sitio de estudio que corresponde a una planta de refinación de zinc, en donde se verificó la información con la que se contaba al momento.

La planta se encuentra en la zona centro del estado de San Luis Potosí, y cuenta con un clima de tipo BS₀kw seco templado con lluvias en verano, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (INEGI 2002, CONAGUA 2024).

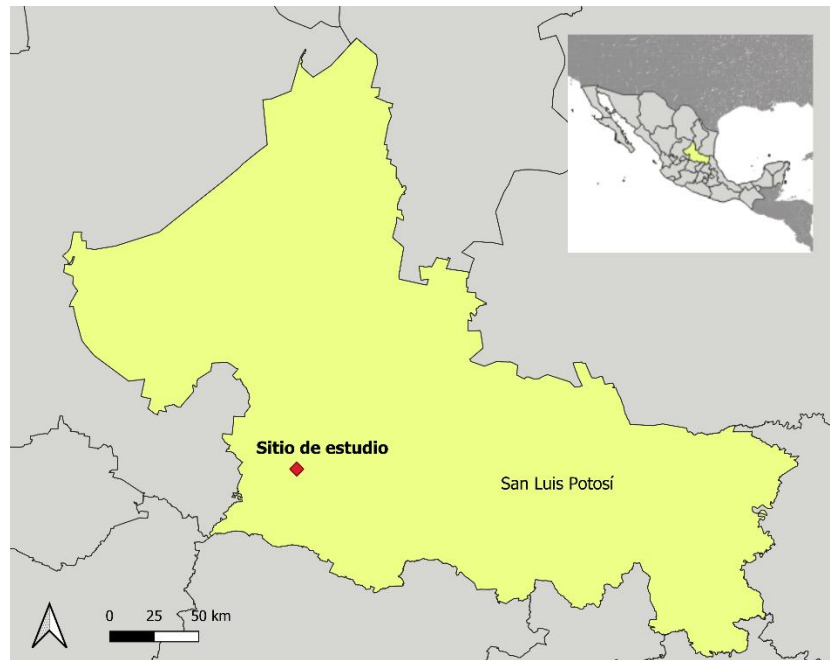


Figura 32. Ubicación de sitio de estudio (Elaboración propia).

Considerando los flujos anteriormente descritos y el análisis de estos se determinaron los datos necesarios para calcularlos (Tabla 7) y proceder a construir el modelo numérico, a su vez estos datos están clasificados como básicos o estimables, es decir que son imprescindibles para el cálculo de los flujos (básicos) o que se pueden calcular a partir de los datos básicos (estimables).

Tabla 7. Lista de verificación de datos requeridos para modelo numérico.

Símbolo	Descripción	Unidades	Básica	Estimable
$HC_{e,REC}$	Humedad del concentrado a la entrada	%	x	
$MC_{e,REC}$	Masa de concentrado a la entrada	t/d	x	
G	Flujo de agua utilizado para riego de polvos	m ³ /d		x
t_{riego}	Tiempo de riego para supresión de polvos	min/d ⁻¹	x	
A_{bandas}	Volumen de agua adicionado en bandas - REC	m ³ /d		x
A_{camas}	Volumen de agua adicionado en camas - REC	m ³ /d		x
$HC_{s,REC}$	Humedad en el concentrado a la salida - REC	%	x	
$MC_{s,REC}$	Masa de concentrado a la salida - REC	t/d	x	
S_{REC}	Superficie de riego de polvos	m ²	x	
$HCa_{s,TOS}$	Humedad en la calcina a la salida	%	x	
$MCa_{s,TOS}$	Masa de calcina a la salida	t/d	x	
$AT_{bandas,}$	Volumen de agua adicionado en bandas - TOS	m ³ /d		x
V_{gases}	Volumen de gases producidos por día - TOS	m ³ /d	x	
$Ef_{reactor}$	Eficiencia de reacción en tostador	%	x	
Ef_{rxn}	Eficiencia de reacción de formación de H ₂ SO ₄	%	x	
A_{ACI}	Flujo de alimentación de agua - ACI	m ³ /d		x
P_{ACI}	Producción de H ₂ SO ₄	m ³ /d	x	
$P_{ACI,venta}$	Producción de H ₂ SO ₄ destinada a venta	m ³ /d	x	
Con_{Ac}	Concentración H ₂ SO ₄	%	x	
V_{purga}	Volumen de producción de purga ácido débil	m ³ /d		x
$V_{R,n}$	Volumen de soluciones de reactivos- LIX	m ³ /d	x	
$V_{P,n}$	Masa o volumen de reactivos adicionados - LIX	m ³ /d o t/d	x	
Con_{Ac}	Concentración de H ₂ SO ₄ añadido	%	x	
V_{sol}	Volumen de H ₂ SO ₄ que entra a módulo	m ³ /d		x
$V_{sol,lix}$	Volumen de solución lixiviada producida	m ³ /d		x
P_{jar}	Volumen de lodos de jarosita producidos	m ³ /d o t/d	x	
H_{jar}	Humedad contenida en lodos de jarosita	%	x	
S_{expT}	Dimensiones de equipos/maquinaria expuesta a la intemperie - LIX	m ²	x	
SA_{FLO}	Flujo de alimentación - FLO	m ³ /d		x
S_{expT}	Dimensiones de equipos/maquinaria expuesta a la intemperie - FLO	m ²	x	
$VF_{P,n}$	Masa o volumen de reactivos adicionados - FLO	m ³ /d o t/d	x	

Tabla 7. Lista de verificación de datos requeridos para modelo numérico (Continuación).

Símbolo	Descripción	Unidades	Básica	Estimable
$VC_{s,FLO}$	Humedad en el concentrado a la salida - FLO	%	x	
MC_{FLO}	Masa de concentrado producido - FLO	t/d	x	
P_{colas}	Volumen de colas de flotación producidas	m ³ /d		x
H_{colas}	Humedad contenida en colas de flotación	%	x	
$VP_{p,n}$	Masa o volumen de reactivos añadidos - PUR	m ³ /d o t/d	x	
$V_{sol,pur}$	Volumen de producción de solución purificada	m ³ /d		x
CE_{PUR}	Humedad en el cemento a la salida	%	x	
H_{cem}	Masa de cemento producida	t/d	x	
ST_{exp}	Dimensiones de equipos/maquinaria expuestos a la intemperie - PUR	m ²		x
H_{CON}	Humedad en concentrado metálico a la salida	%	x	
P_{CON}	Masa de concentrado producido - CON	t/d	x	
ST_{exp}	Dimensiones de equipos/maquinaria expuestos a la intemperie - ELE	m ²	x	
V_{EA}	Volumen de electrolito agotado que sale del sistema	m ³ /d		x
H_{Zn}	Humedad en zinc catódico a la salida	%	x	
P_{Zn}	Masa de zinc catódico producido	t/d	x	
A_{lavado}	Flujo de agua destinada a lavado	m ³ /d		x
A_{FUS}	Flujo de alimentación en el módulo - FUS	m ³ /d		x
P_{FUS}	Producción de productos finales de zinc	t/d	x	
H_{FUS}	Humedad en productos finales de zinc a la salida	%	x	
ST_{EXP}	Dimensiones de presas de jales - DIS	m ²	x	
R_{cap}	Volumen de agua recuperado de presa de jales	m ³ /d		x
ST_{EXP}	Dimensiones de equipos que contienen soluciones acuosas - RES	m ²	x	
E	Evaporación/Evapotranspiración	mm/d	x	
P	Precipitación pluvial	mm/d	x	
T_{PROM}	Temperatura promedio	mm/d	x	
Ef_{EQU}	Eficiencia de reacción y/o de equipos	%	x	

Con los datos recopilados se construyó el modelo numérico en el software Goldsim que, permite modelar sistemas complejos como es el caso de un proceso minero-metalúrgico, ya que existe un gran dinamismo dentro de sus operaciones.

Para el uso de este software se utilizó la versión 12.1 y una licencia independiente de escritorio. Para ejecutar GoldSim se debe contar con los siguientes requerimientos en el equipo: Windows 10 (Versión 1903 o más reciente) y un mínimo de 500 MB de espacio en disco.

La propuesta del modelo numérico realizado se muestra a continuación (Figura 34), en donde las flechas indican los flujos de entrada, salida y transferencia, los módulos se muestran como cajas amarillas, llamadas contenedores, dentro de cada uno de ellos, se encuentran las ecuaciones descritas con anterioridad para determinar los flujos desconocidos y posteriormente realizar los respectivos cálculos de HH del proceso hidro-electrometalúrgico para la refinación de zinc, adicionalmente se añadió un contenedor denominado climatología en donde se incluyen datos climatológicos del sitio de estudio y de interés para el cálculo de la HH.

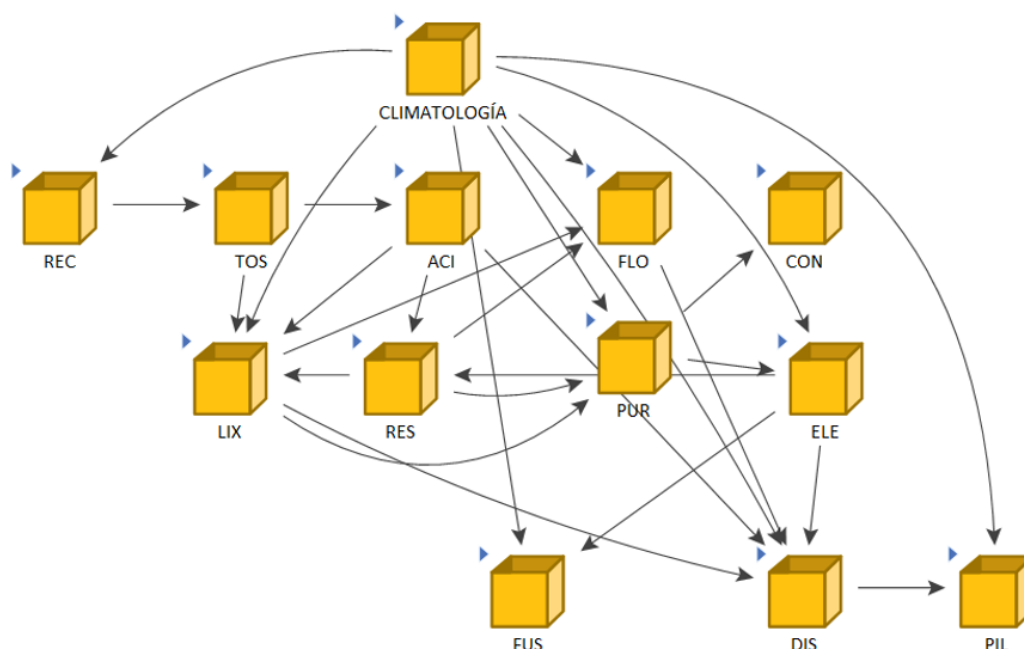


Figura 33. Modelo numérico de proceso RLE en software Goldsim (Elaboración propia).

Uno de los objetivos del desarrollo de la metodología es que sea flexible y adaptable a cualquier proceso minero-metalúrgico de este tipo, por lo que, si es el caso, pueden removerse, duplicarse o agregarse módulos de acuerdo con la configuración específica del proceso que se esté analizando, sin embargo, en este trabajo se muestra la estructura más general del proceso RLE, intentando adaptar el modelo conceptual de la mejor manera posible al proceso.

V. Discusión de resultados de la implementación de la metodología en un caso de estudio para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos hidro-electrometalúrgicos para la refinación de zinc

La metodología propuesta consta de cuatro etapas: 1) Delimitación y reconocimiento del sistema a evaluar, 2) Definición de un modelo conceptual que incluya los módulos (etapas) del sistema a evaluar, así como los flujos de agua que se cuantificarán, 3) Generación de un modelo numérico para el cálculo de la Huella Hídrica y 4) Análisis e interpretación de los resultados de la aplicación de la metodología en un caso de estudio. La metodología fue implementada en el estudio del proceso para la refinación de zinc, denominado RLE (Tostación - Lixiviación y Electro-obtención, por sus siglas en inglés), siendo el proceso más utilizado y rentable para la obtención de zinc refinado de alta pureza (Ballester et al., 2000; Kania y Saternus, 2023; Habashi, 1997).

El sitio de estudio analizado es una empresa donde se lleva a cabo la refinación electrolítica del zinc, esta se encuentra en la capital del estado de San Luis Potosí, México. El clima correspondiente a la zona de estudio es de tipo BSkw seco templado con lluvias en verano, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por Enriqueta García, caracterizado principalmente, por una tasa de evapotranspiración mayor a la de precipitación (INEGI, 2002; CONAGUA 2024).

La metodología propuesta, así como el análisis del caso de estudio se llevó de manera simultánea, esto con el fin de conocer el proceso detalladamente, adquirir la mayor cantidad de información posible para la alimentación y la modelación del sistema, tratando de adaptar de la mejor manera la metodología al proceso, complementado tanto el trabajo de gabinete como el de campo.

El periodo de tiempo analizado y modelado fue el año 2022, esta modelación se llevó a cabo en el software GoldSim versión 12.1, debido a que se propone una alimentación de datos diaria, para modelar de manera representativa al sistema, el software utilizado emplea la simulación Montecarlo (SMC), en la cual se propaga la incertidumbre de los datos de entrada en los resultados de salida, por lo tanto permite la alimentación de datos determinísticos y probabilísticos, esto resulta de gran importancia debido a que una de las principales limitaciones en la industria minera es el acceso a bases de datos o inventarios de información diaria (Northey et al., 2016, Castro y Gambini, 2014). Por lo tanto, este software permite modelar con la alimentación de datos de probabilidad cuando no es posible tener datos determinísticos (en este caso, datos diarios).

Para una mejor comprensión y cuantificación de la Huella Hídrica del proceso RLE, fue necesario establecer módulos que integran las diferentes etapas del proceso, a partir de la definición del modelo conceptual, así como de los flujos de entrada, salida y transferencia de cada módulo, se establecieron las ecuaciones, cálculos correspondientes y variables para alimentar al modelo y resolver los flujos desconocidos, en campo se recopiló la información necesaria y se construyó el modelo numérico del proceso estudiado.

No obstante que el modelo conceptual construido abarca todas las etapas del proceso RLE, en la implementación de la metodología en el caso de estudio se cuenta con un análisis de 11 módulos, con excepción del módulo Pileta de Seguridad, debido a que este módulo se construyó con el objetivo de facilitar la cuantificación de la captación de precipitación en el sistema en los casos en que se contenga en infraestructura diseñada específicamente para este fin, en el caso de estudio no se cuenta con este tipo de infraestructura, por lo tanto se mide la captación de precipitación en cada uno de los módulos siempre y cuando cuenten con infraestructura que sea susceptible a captación de agua de lluvia que se incorpora al proceso.

Una de las particularidades del indicador Huella Hídrica es que permite cuantificar el recurso hídrico a partir de su origen o tipo de agua: Agua Azul, Agua Verde y Agua Gris (Hoekstra et al., 2011), cada uno de los flujos se ha clasificado de acuerdo con su origen, debido a las características cero descargas del proceso evaluado, no se presentan flujos de Agua Gris, por lo que no se cuantificó una Huella Hídrica Gris en los módulos analizados, por lo tanto, los flujos utilizados para cuantificar la Huella Hídrica están asociados a Agua Azul y Agua Verde.

Análisis de variables meteorológicas

Debido a la interacción de las variables meteorológicas con los procesos minero-metalúrgicos, el modelo fue alimentado con información climática relevante para el sitio de estudio. Para ello, se identificaron las diez estaciones climatológicas más cercanas utilizando las bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional y el software Google Earth para verificar su cercanía con el sitio de estudio (Figura 34).



Figura 34. Ubicación de estaciones climatológicas cercanas a sitio de estudio (Google Earth).

Posteriormente, a los registros obtenidos se les aplicaron pruebas de control de calidad, análisis de homogeneidad (prueba de Helmert) y pruebas de independencia de datos. Como resultado de estos análisis, se determinó que dos de las estaciones evaluadas cumplieron con ambos criterios de calidad establecidos.

En consecuencia, el modelo fue alimentado con información proveniente de las estaciones San Luis Potosí (OBS) y San Luis Potosí (SMN), con claves 24070 y 24111, respectivamente (Tabla 8). A partir de estas estaciones se obtuvieron datos diarios correspondientes al año de estudio (2022), incluyendo precipitación (mm), evaporación (mm), temperatura máxima, mínima y temperatura promedio (°C).

Tabla 8. Pruebas de calidad realizadas para estaciones climatológicas seleccionadas

	Estación	ID	Pruebas de calidad	
			Helmet	Independencia
1	San Luis Potosí (OBS)	24070	✓	✓
2	San Luis Potosí (SMN)	24111	✓	✓

La figura 35 muestra el comportamiento climático mensual de San Luis Potosí, S.L.P., caracterizado por un clima BSkw, clasificado como seco templado con lluvias en verano. Se observa que la precipitación presenta un incremento significativo durante la época húmeda, que comprende de junio a septiembre, alcanzando sus valores máximos en estos meses. Sin embargo, la evaporación mensual supera a la precipitación durante todo el año, lo que evidencia un balance hídrico deficitario característico de regiones con condiciones secas.

En cuanto a la temperatura media mensual, esta muestra una variación estacional moderada, con un incremento progresivo desde el invierno hasta alcanzar valores máximos durante los meses de primavera y verano, seguido de un descenso hacia finales del año. En términos generales, la temperatura media anual es de aproximadamente 21 °C, lo que confirma el carácter templado del clima de la región. Estas condiciones climáticas corresponden con la clasificación reportada por el INEGI (2022) y CONAGUA (2024).

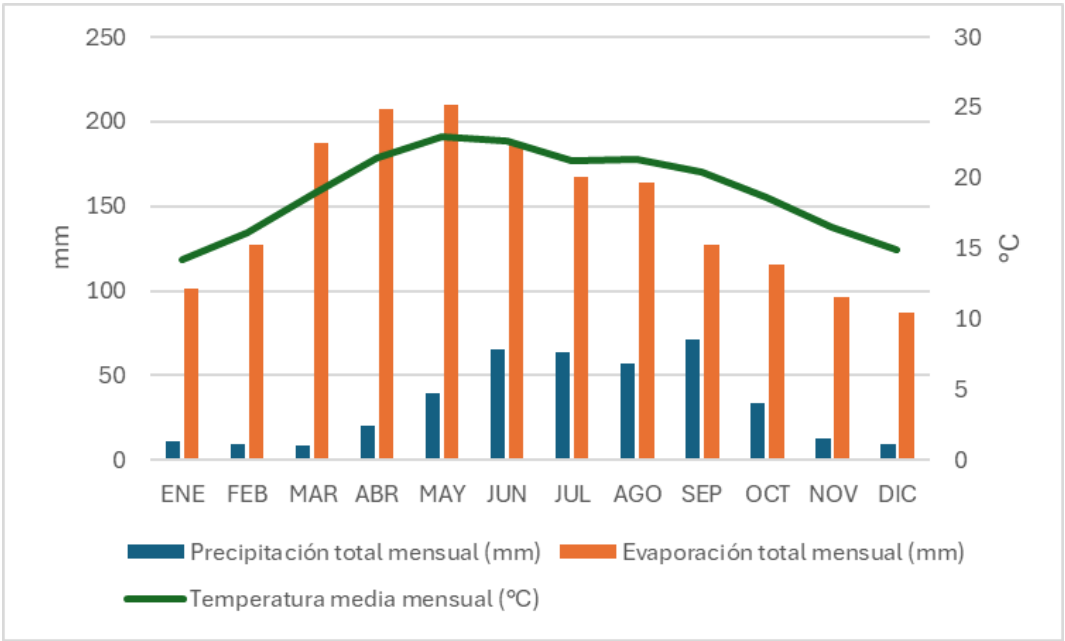


Figura 35. Climograma de sitio de estudio.

De acuerdo con el criterio de Gaussen aplicable para la construcción de climogramas, el cual relaciona la precipitación con la temperatura para determinar si un mes es árido o no es árido, dependiendo de la relación $P(mm) < 2T(^{\circ}C)$, la cual nos indica que un mes es árido, caso contrario ocurre cuando $P > 2T$, es posible visualizar estas relaciones en la Figura 35 y 36, en donde de acuerdo con la escala del eje de la Temperatura ($^{\circ}C$) es fácilmente visualizar cuando un mes es árido y cuando no lo es. En este caso los meses áridos comprenden los periodos enero-mayo y octubre-diciembre, por otro lado, es posible identificar aquellos meses no áridos, correspondientes a la época húmeda del sitio de estudio que comprenden el periodo junio-septiembre.

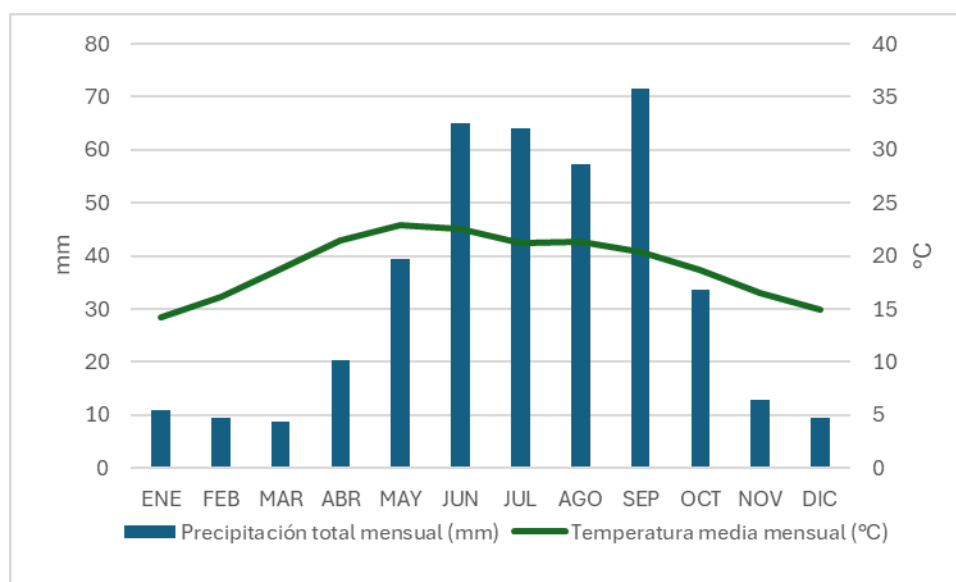


Figura 36 Climograma modificado por criterio de Gaussen de sitio de estudio.

Resultados de la aplicación de la metodología en un caso de estudio

Por lo tanto, se ha determinado la Huella Hídrica Azul de 11 módulos (con excepción del módulo Pileta de Seguridad), y la Huella Hídrica Verde para 4 módulos (Reservorio de Soluciones Acuosas, Lixiviación, Electrólisis y Disposición de Residuos minero-metalúrgicos). Los resultados de HH pueden expresarse en metros cúbicos de agua por año ($\text{m}^3/\text{año}$) o en litros de agua por tonelada de material procesado (L/t), en este caso el material de interés es el zinc refinado, cuya producción total para el año 2022 fue de 100,076 t.

Los resultados de Huella Hídrica por módulo se muestran a continuación.

Huella Hídrica calculada por módulos

Módulo Recepción de materiales

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul por lo tanto únicamente se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de $1,733 \text{ m}^3$ al año, relacionado con la incorporación de Agua Azul al sistema (Figura 37).

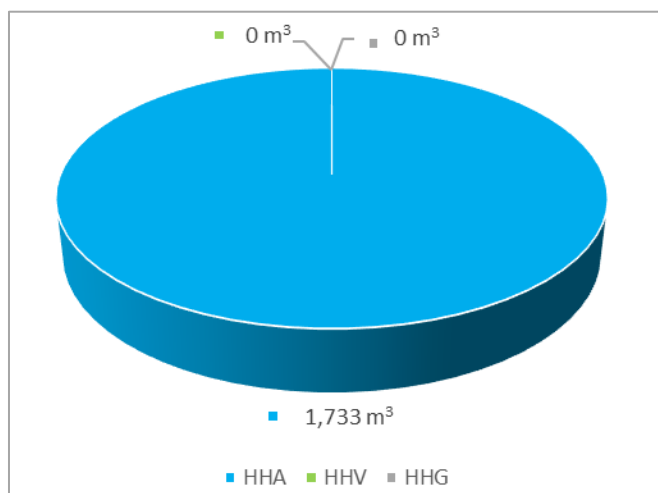


Figura 37. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Recepción de materiales en $\text{m}^3/\text{año}$.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 17 L/t de zinc refinado, en este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Verde ni Gris, debido a que no hubo incorporación de agua de lluvia ni descargas a cuerpos de agua (Figura 38).

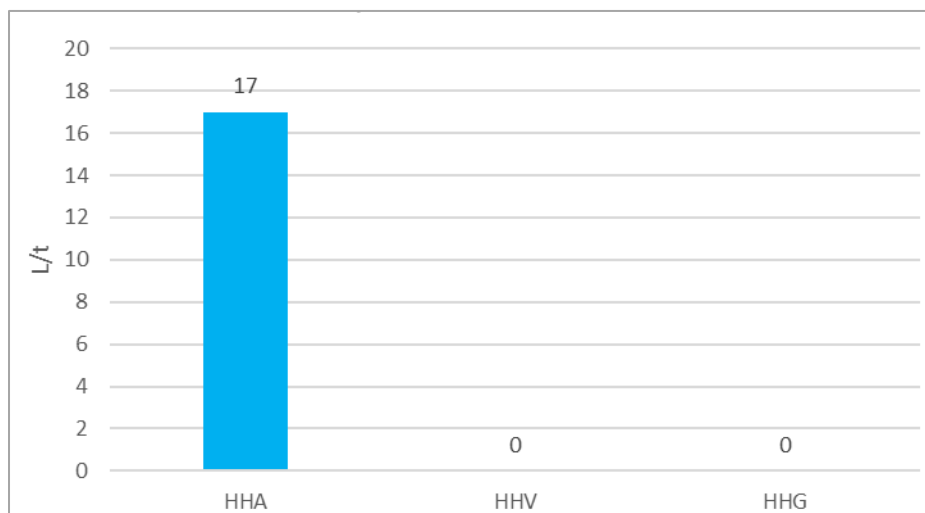


Figura 38. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Recepción de materiales en L/t.

Módulo Tostación

En este módulo, el agua empleada proviene exclusivamente de fuentes superficiales o subterráneas, por lo que, de acuerdo con su origen, se clasifica como Agua Azul. En consecuencia, únicamente se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación estimada de 22,491 m³ al año, asociada a la incorporación de este recurso al sistema (Figura 39). Cabe señalar que, al tratarse de un módulo operativamente cerrado, no se consideran contribuciones adicionales de otras categorías de huella hídrica.

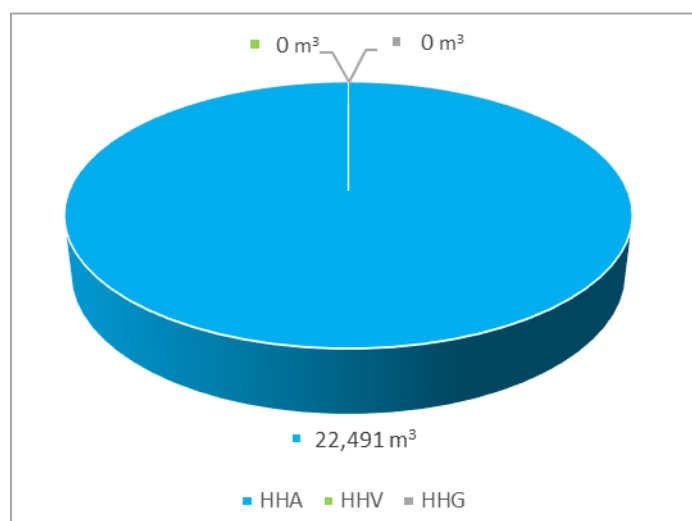


Figura 39. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Tostación en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 225 litros por tonelada de zinc refinado, en este módulo no se cuantifico Huella Hídrica Verde ni Gris, debido a que este módulo se encuentra techado y no cuenta con descargas (Figura 40).

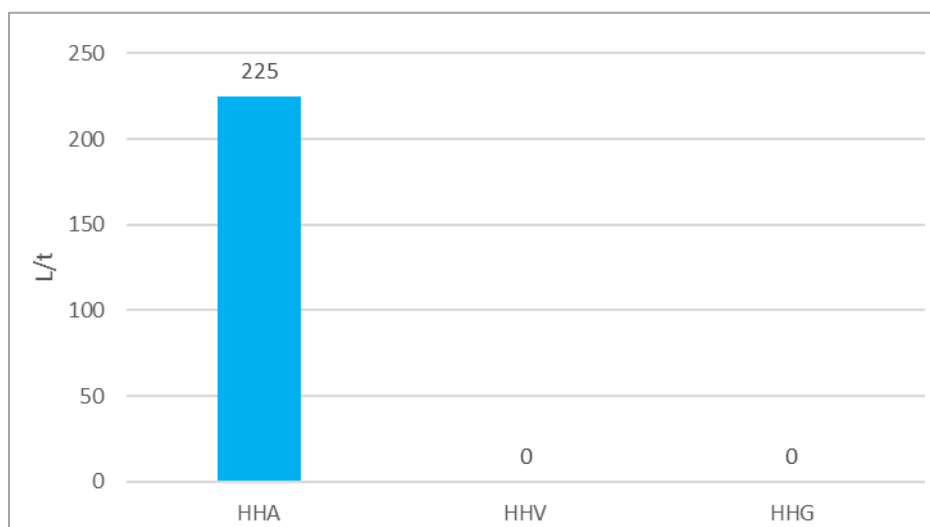


Figura 40. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Tostación en L/t.

Módulo Planta de ácido

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul por lo tanto únicamente se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de 45, 817 m³ al año, relacionado con la incorporación de Agua Azul al sistema (Figura 41) y debido a que este módulo se encuentra cerrado.

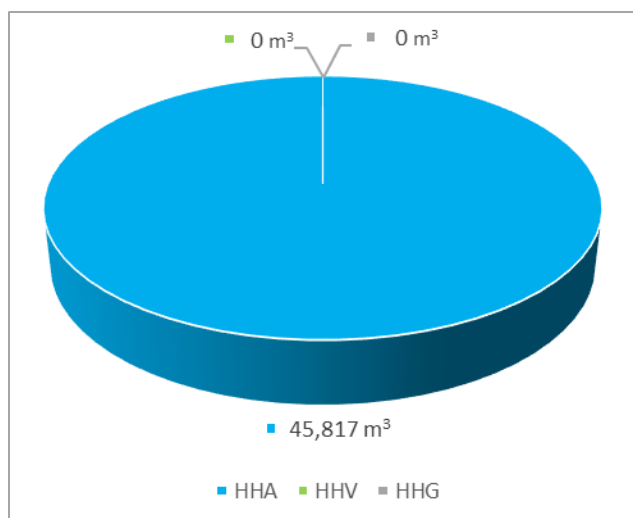


Figura 41. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de ácido en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 458 L/t de zinc refinado, en este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Verde ni Gris, debido a que no hay incorporación de agua de lluvia al proceso ni descargas. (Figura 42).

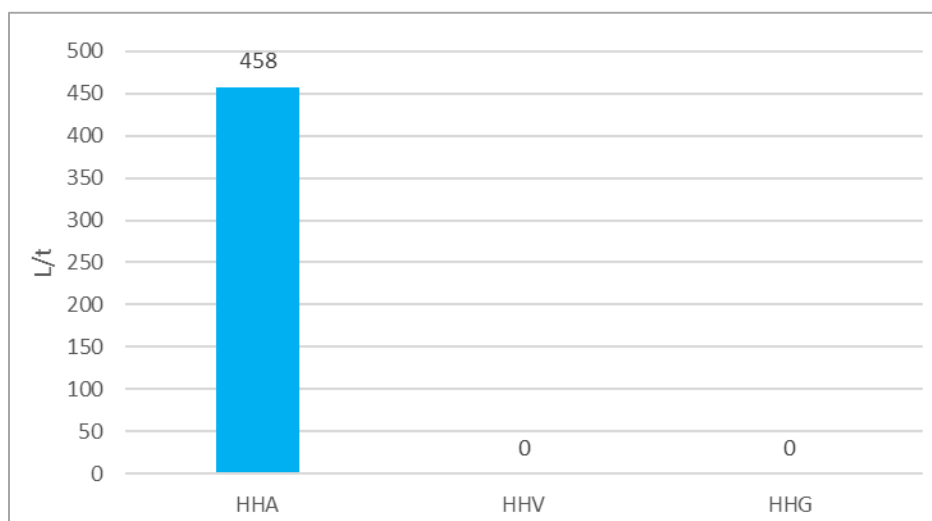


Figura 42. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de ácido en L/t.

Módulo Lixiviación

En este módulo se incorpora al sistema Agua Azul y Agua verde, por lo tanto, se cuantificó una Huella Hídrica Azul y Verde equivalente a 63,719 y 2,948 m³ de agua al año, respectivamente (Figura 43). Esto debido a la incorporación de agua en el módulo, así como en las áreas expuestas a la intemperie que son susceptibles a la captación de agua de lluvia y/o a la evaporación de Agua Verde o Azul.

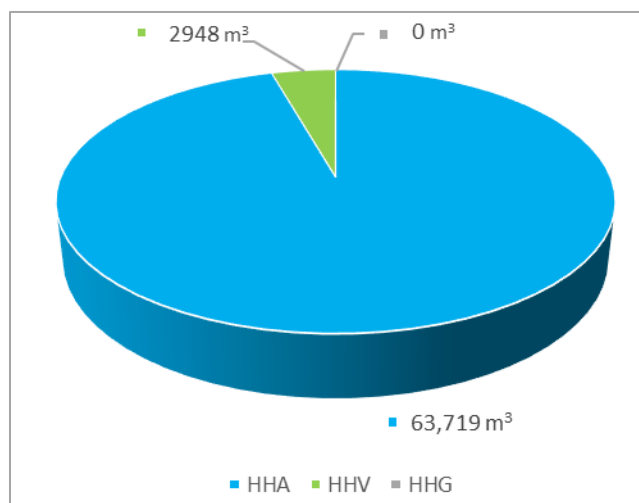


Figura 43. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Lixiviación en m³/año.

Por otro lado, se estimó una Huella Hídrica Azul (HHA) de 637 L y una Huella Hídrica Verde (HHV) de 29 L por tonelada de zinc refinado. La marcada diferencia entre ambas categorías se explica por el origen del recurso hídrico empleado en el proceso: la mayor parte del consumo proviene de fuentes superficiales o subterráneas (agua azul), directamente incorporadas al sistema productivo, mientras que la contribución de agua verde, asociada principalmente a la precipitación, vinculada de forma indirecta al proceso, es considerablemente menor en este módulo.

En cuanto a la Huella Hídrica Gris, no fue cuantificada para este módulo debido a que no se generan descargas de aguas residuales hacia cuerpos receptores; cualquier corriente residual es gestionada dentro del sistema o transferida al módulo de Disposición de Residuos minero-metalúrgicos (Figura 44).

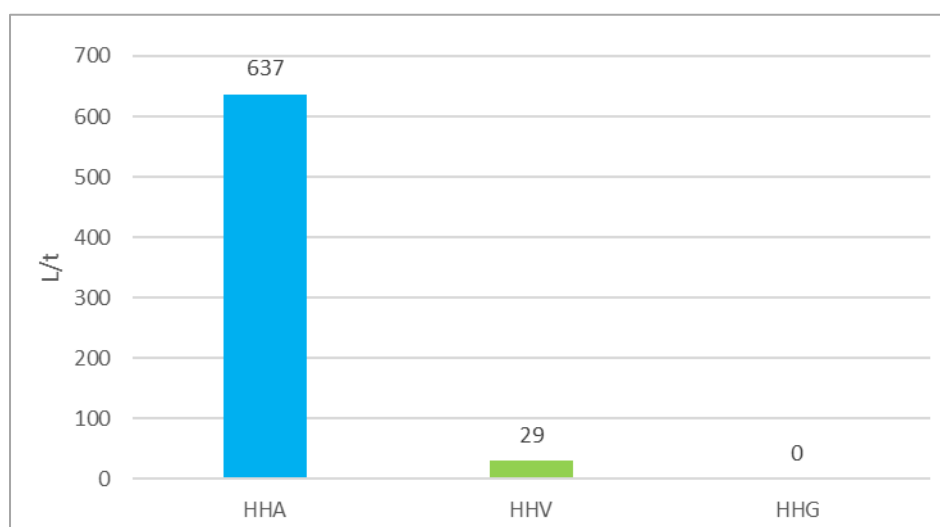


Figura 44. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Lixiviación en L/t.

Módulo Planta de flotación

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul, por lo tanto, únicamente se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de 4,653 m³ al año, relacionado con la incorporación de Agua Azul al sistema (Figura 45) y debido a que este módulo se encuentra cerrado, por lo tanto, no se incorpora ni evapora agua de lluvia ni se producen descargas.

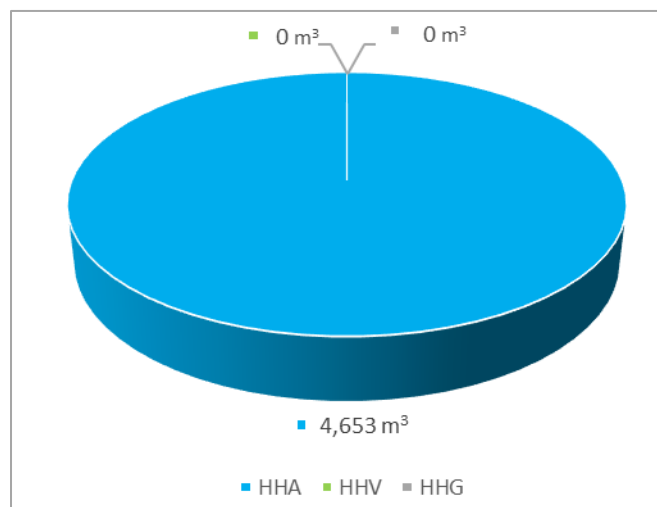


Figura 45. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de flotación en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 46 L/t de zinc refinado. En este módulo no se cuantifico Huella Hídrica Gris ni Verde, debido a las condiciones e infraestructura de este (Figura 46).

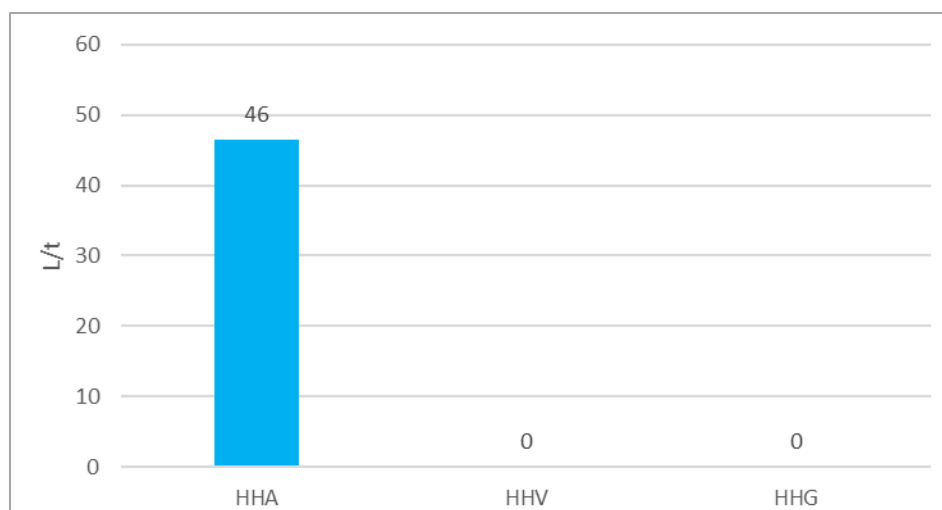


Figura 46. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de flotación en L/t.

Módulo Purificación

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul, por lo tanto, únicamente se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de 21,222 m³ al año, relacionado con la incorporación y evaporación de Agua Azul al sistema (Figura 47) y debido a que este módulo se encuentra cerrado, por lo tanto, no se incorpora ni evapora agua de lluvia (Agua Verde).

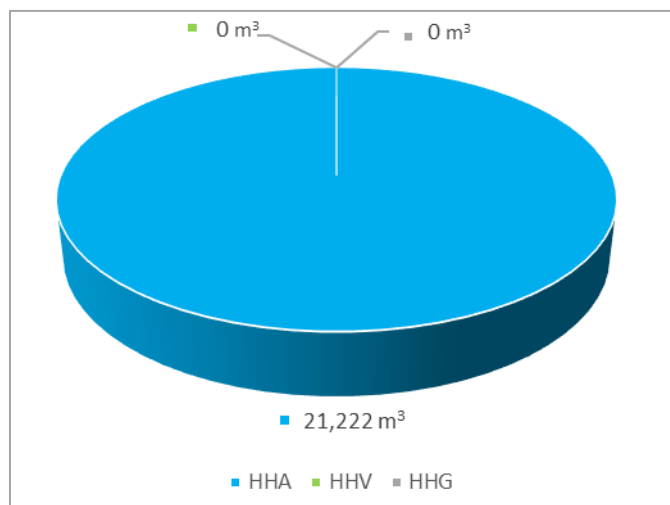


Figura 47. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Purificación en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 212 litros de agua por tonelada de zinc refinado. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris ni Verde, debido a las condiciones e infraestructura que lo conforman (Figura 48).

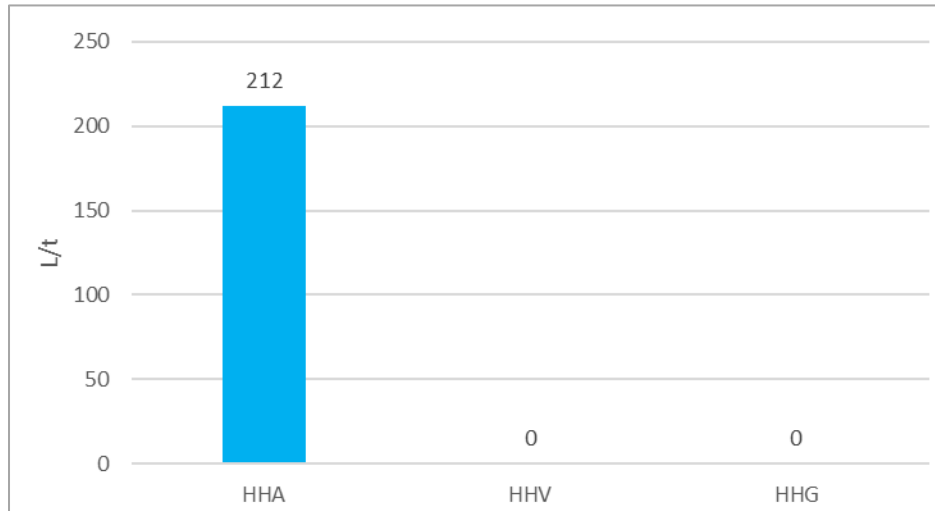


Figura 48. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Purificación en L/t.

Módulo Planta de concentración

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul por lo tanto solo se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de 4,251 m³ al año, relacionado con la incorporación de Agua Azul al sistema (Figura 49) y debido a que este módulo se encuentra en su mayoría cerrado, por lo tanto, no se incorpora ni evapora agua de lluvia (Agua Verde).

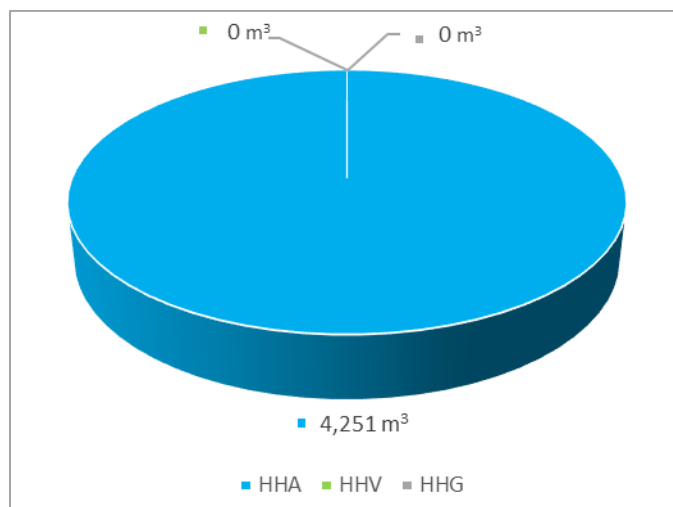


Figura 49. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de concentración en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 42 litros de agua por tonelada de zinc refinado. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris ni Verde, debido a las condiciones e infraestructura que lo conforman (Figura 50).

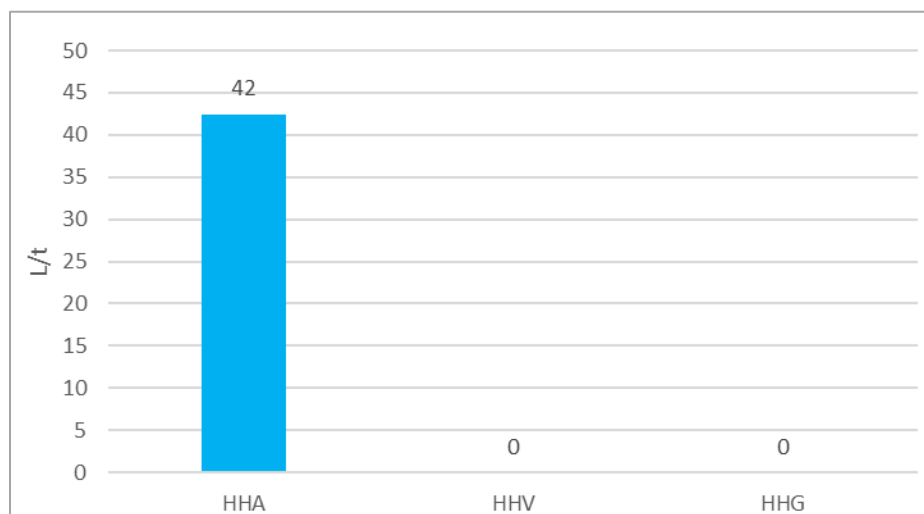


Figura 50. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Planta de concentración en L/t.

Módulo Electrólisis

En este módulo se incorpora al sistema Agua Azul y Agua Verde por lo tanto se cuantifica una Huella Hídrica Azul y Verde equivalente a 104,910 y 843 m³ de agua al año, respectivamente (Figura 51). Esto debido a la incorporación de agua al sistema en el módulo, así como en las áreas expuestas a la intemperie que son susceptibles a la captación de agua de lluvia y a la evaporación de Agua Verde y Azul.

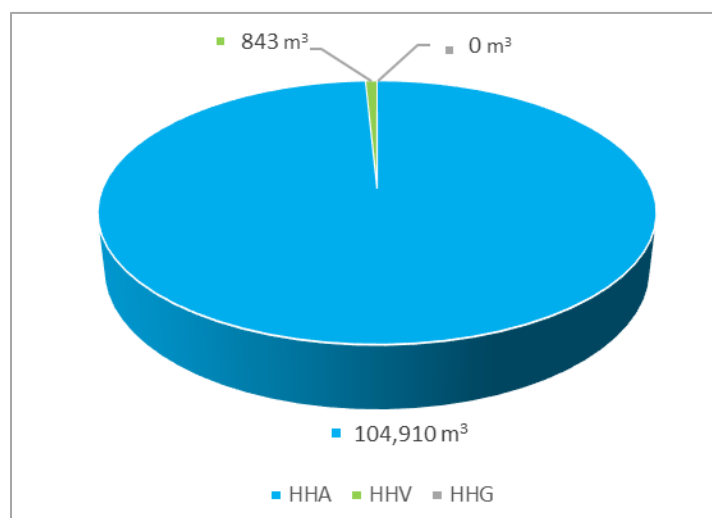


Figura 51. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Electrólisis en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA y HHV de 1,048 y 8 litros de agua por tonelada de zinc refinado, respectivamente. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris (Figura 52).

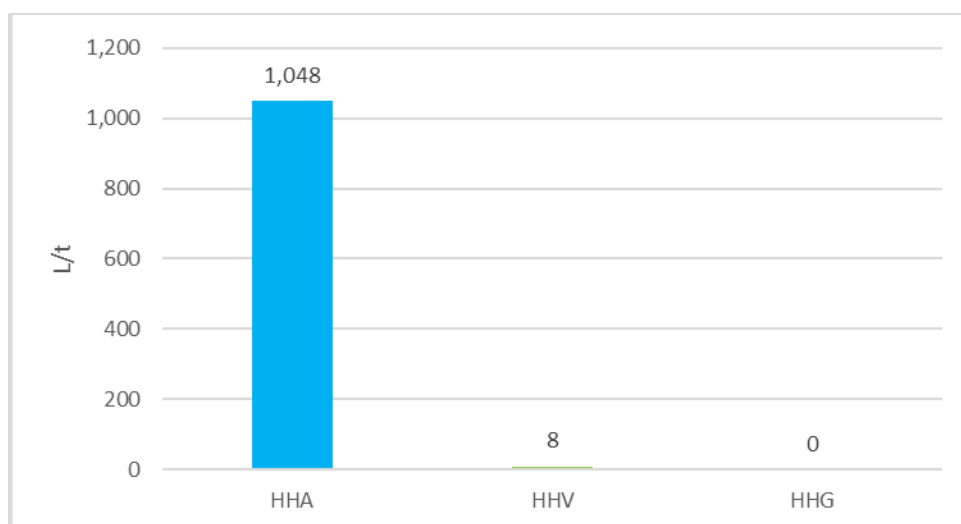


Figura 52. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Electrólisis en L/t.

Módulo Fusión y moldeo

En este módulo únicamente se hace uso de Agua Azul, por lo tanto, solo se cuantifica Huella Hídrica Azul (HHA), con una aportación de 456 m³ de agua al año, relacionado mayoritariamente con la incorporación de Agua Azul al sistema (Figura 53) y debido a que este módulo se encuentra cerrado, por lo tanto, no se incorpora ni evapora agua de lluvia (Agua Verde) ni se producen descargas (Agua Gris).

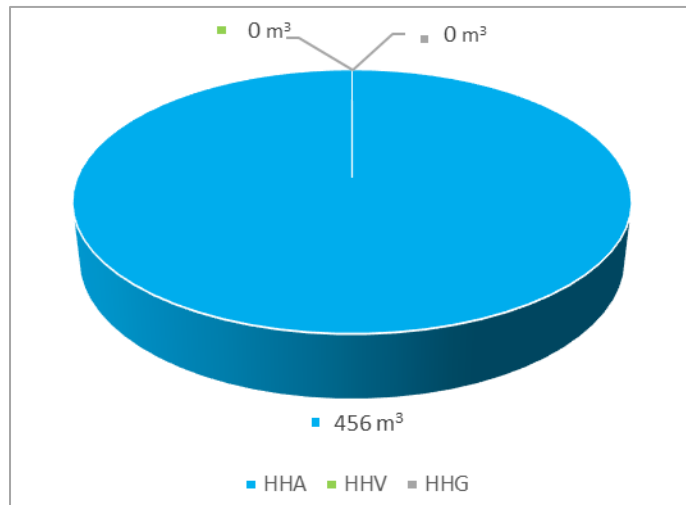


Figura 53. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Fusión y moldeo en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA de 5 litros de agua por tonelada de zinc refinado. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris ni Verde, debido a las condiciones e infraestructura que lo conforman (Figura 54).

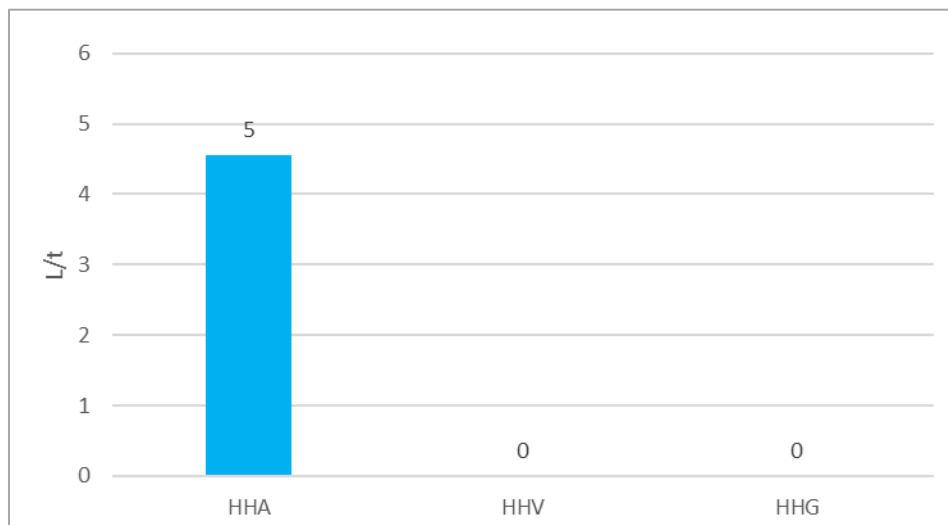


Figura 54. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Fusión y moldeo en L/t.

Módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos

En este módulo se incorpora al sistema Agua Azul y Agua verde por lo tanto se cuantifica una Huella Hídrica Azul y Verde equivalente a 148,873 y 40,771 m³ de agua al año, respectivamente (Figura 55). Esto debido a la incorporación de agua al sistema en el módulo, así como a las áreas expuestas a la

superficie que son susceptibles a la captación de agua de lluvia y a la evaporación de Agua Verde o Azul.

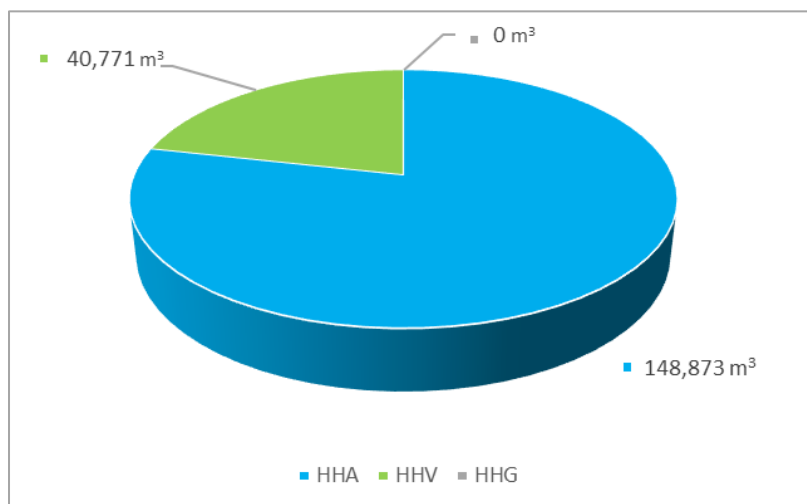


Figura 55. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA y HHV de 1,488 y 407 litros de agua por tonelada de zinc refinado, respectivamente. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris (Figura 56).

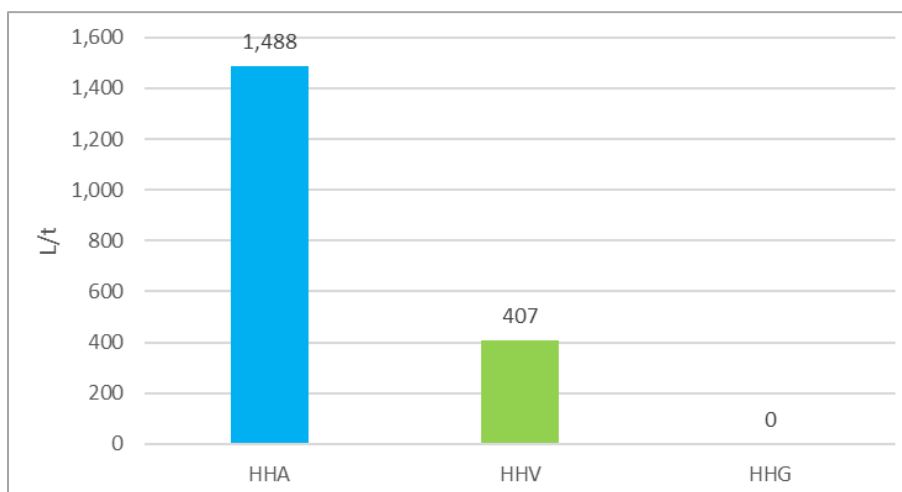


Figura 56. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos en L/t.

Módulo Reservorio de soluciones acuosas

En este módulo se incorpora al sistema Agua Azul y Agua Verde por lo tanto se cuantifica una Huella Hídrica Azul y Verde equivalente a 46,906 y 37 m³ de agua al año, respectivamente (Figura 57). Esto

debido a la incorporación de agua al sistema en el módulo, así como a las áreas expuestas a la superficie que son susceptibles a la captación de agua de lluvia y evaporación de Agua Verde y Azul.

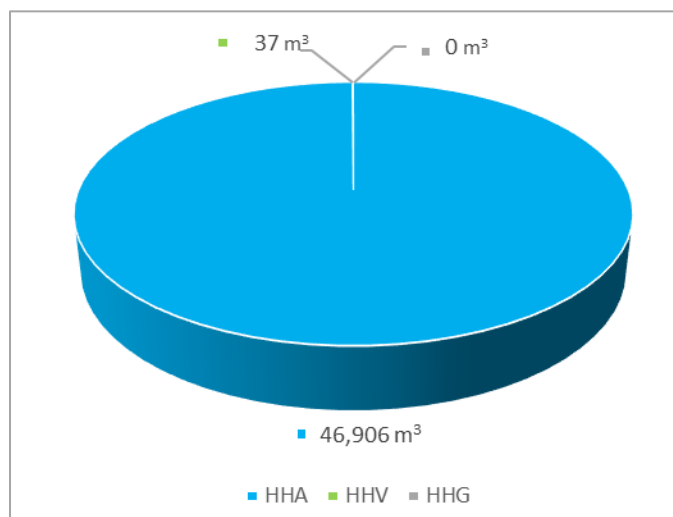


Figura 57. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Reservoirio de soluciones acuosas en m³/año.

Por otro lado, se cuantificó una HHA y HHV de 469 y 0.4 litros de agua por tonelada de zinc refinado, respectivamente. En este módulo no se cuantificó Huella Hídrica Gris (Figura 58).

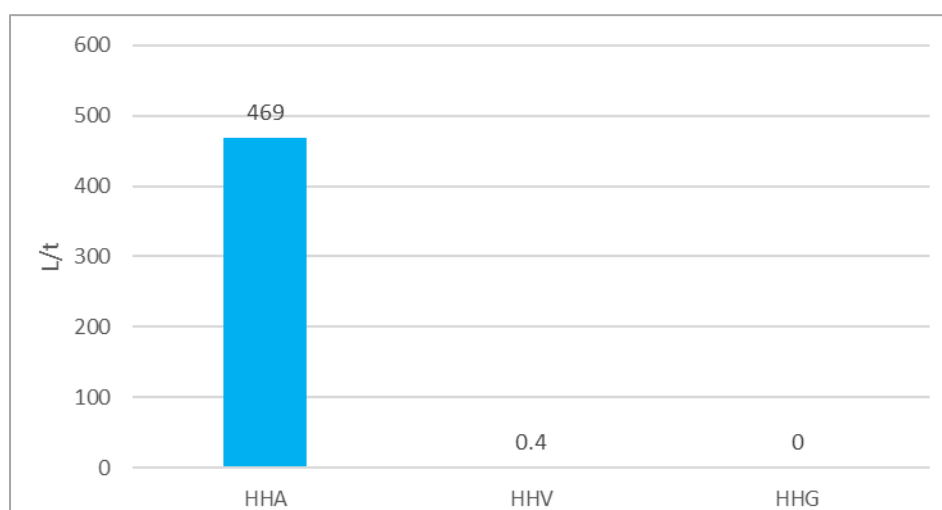


Figura 58. Huella Hídrica por tipo de agua del módulo Reservoirio de soluciones acuosas en L/t.

Huella Hídrica por tipo de agua

Se determinó la Huella Hídrica Azul (HHA) del año 2022, de 11 módulos correspondientes a Recepción de materiales, Tostación, Planta de ácido, Lixiviación, Flotación, Purificación, Planta de concentración, Electrólisis, Fusión y moldeo, Disposición de residuos minero-metalúrgicos y

Reservorio de soluciones acuosas. En los cuales se incorpora Agua Azul al sistema, como se visualiza en la Figura 59, con huellas que van desde 456 m³/año para el módulo Fusión y moldeo, huellas que sobrepasan los 100,000 m³/año (módulo Electrólisis), hasta una huella cercana a 150, 000 m³/ año para el módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos.

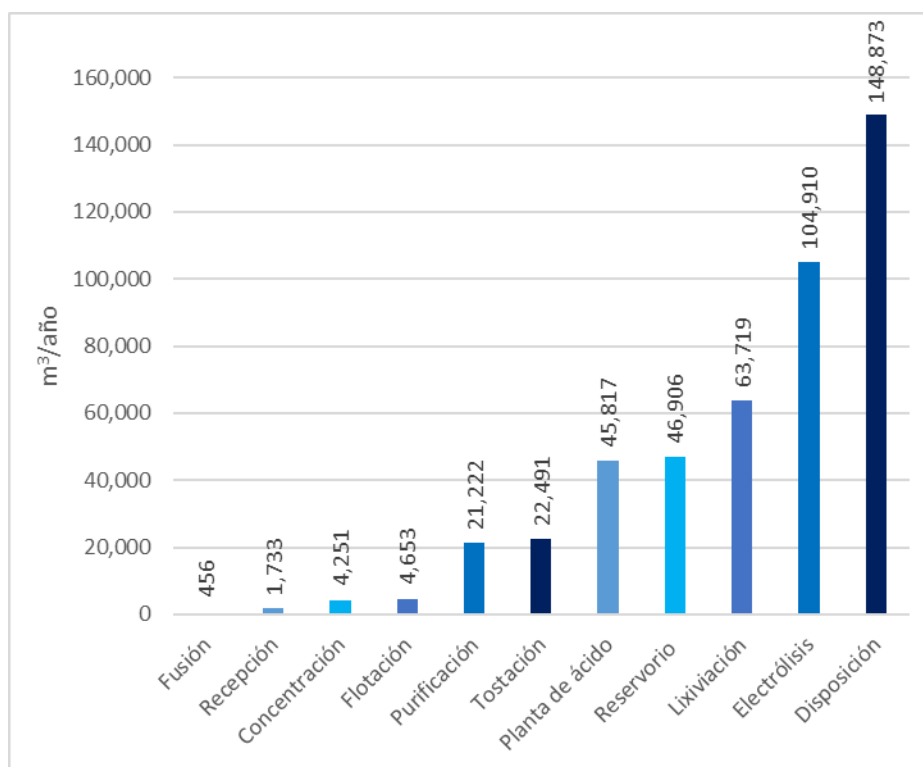


Figura 59. Huella Hídrica Azul de cada módulo en m³/año.

Por otro lado, también se determinó la Huella Hídrica Azul, del año 2022, en litros por tonelada de zinc refinado (L/t). En este caso las Huellas van desde 5 L/t para el módulo Fusión y moldeo, hasta superiores a 1,000 L/t para el módulo Electrólisis y una huella cercana a 1,500 L/t para el módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos, como se muestra en la Figura 60.

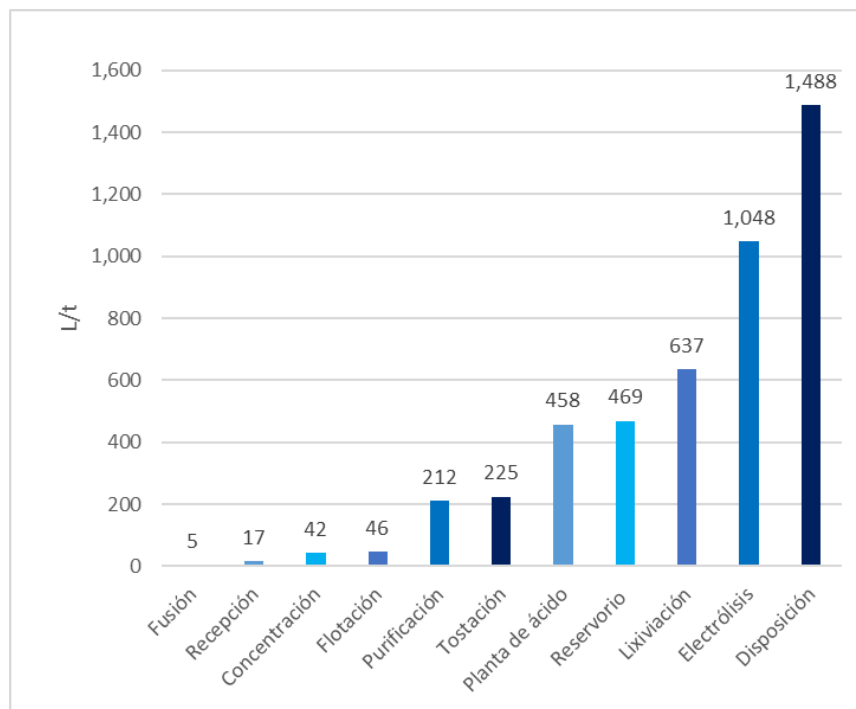


Figura 60. Huella Hídrica Azul de cada módulo en L/t.

Proporcionalmente los módulos que tiene una mayor aportación de la HHA cuantificada,, son el módulo de Disposición de residuos minero-metalúrgicos con una aportación del 32% de la Huella Hídrica Azul total cuantificada, así como el módulo Electrólisis con una aportación del 22%.,Por otro lado, los módulos que tienen una menor aportación a la HHA calculada son el módulo de Fusión y moldeo, así como Recepción de materiales con una aportación menor al 1%, respectivamente, como se muestra en la Figura 61.

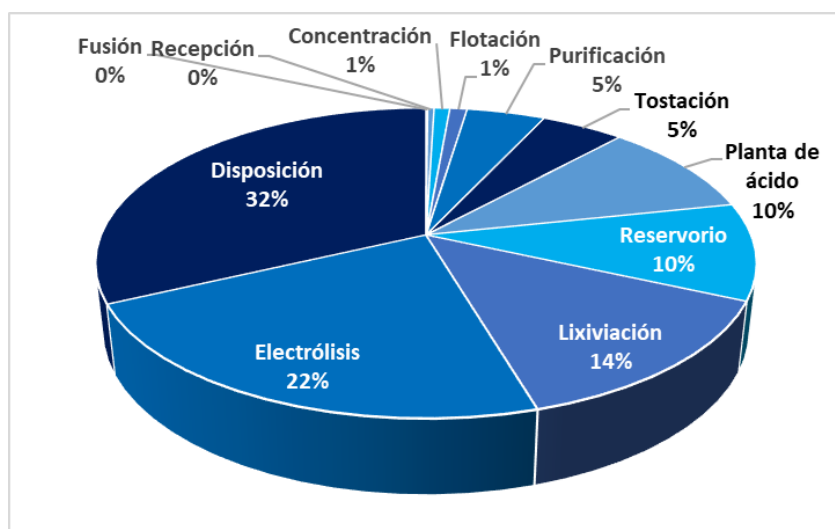


Figura 61. Proporción de Huella Hídrica Azul correspondiente a cada módulo.

Se cuantificó la Huella Hídrica Verde para 4 módulos: Reservorio de soluciones acuosas, Electrólisis, Lixiviación y Disposición de residuos minero-metalúrgicos con valores de 37 m³/año para el módulo Reservorio, 843 m³/año para el módulo Electrólisis, 2,948 m³/año para el módulo de Lixiviación y 40,771 m³/año para el módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos, destacando este último por tener el mayor valor de HHV.

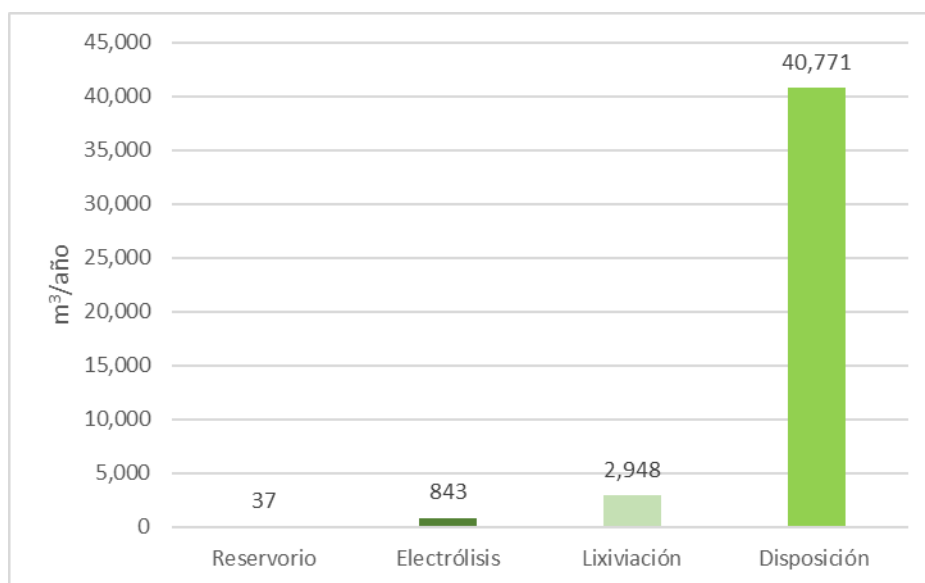


Figura 62. Huella Hídrica Azul de cada módulo en m³/año.

De igual manera se calcularon los valores de HHV en litros de Agua Verde por tonelada de zinc refinado (L/t), con valores de 0.4, 8, 29 y 407 L/t para los módulos Reservorio de soluciones acuosas, Electrólisis, Lixiviación y Disposición de residuos minero-metalúrgicos, respectivamente, como se muestra en la Figura 63.

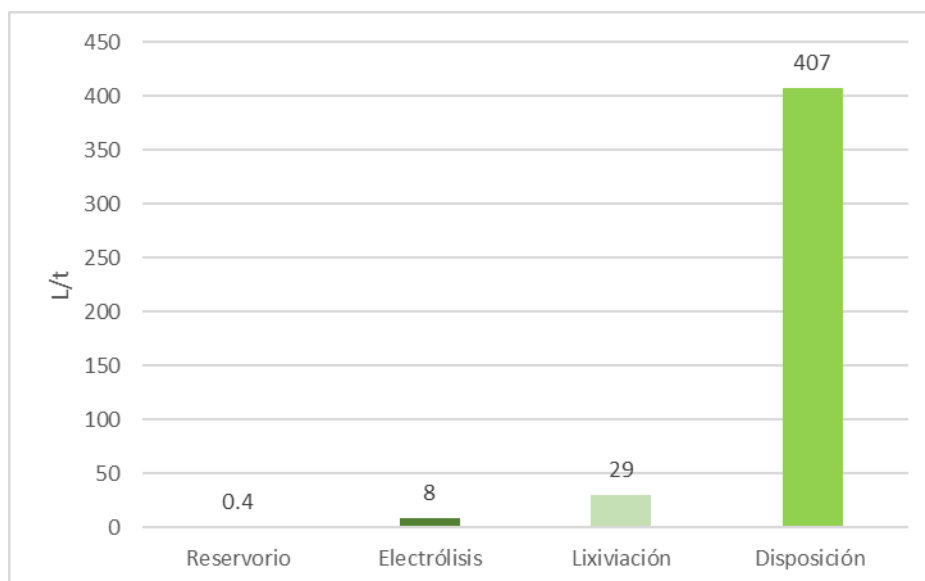


Figura 63. Huella Hídrica Verde de cada módulo en L/t.

Proporcionalmente, el módulo con mayor aportación a la Huella Hídrica Verde total cuantificada corresponde al módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos con una aportación de más del 90% de la HHV calculada para el sistema, por el contrario, el módulo con menor aportación fue el de Reservorio de soluciones acuosas con una aportación menor al 1% de la HHV calculada (Figura 64).

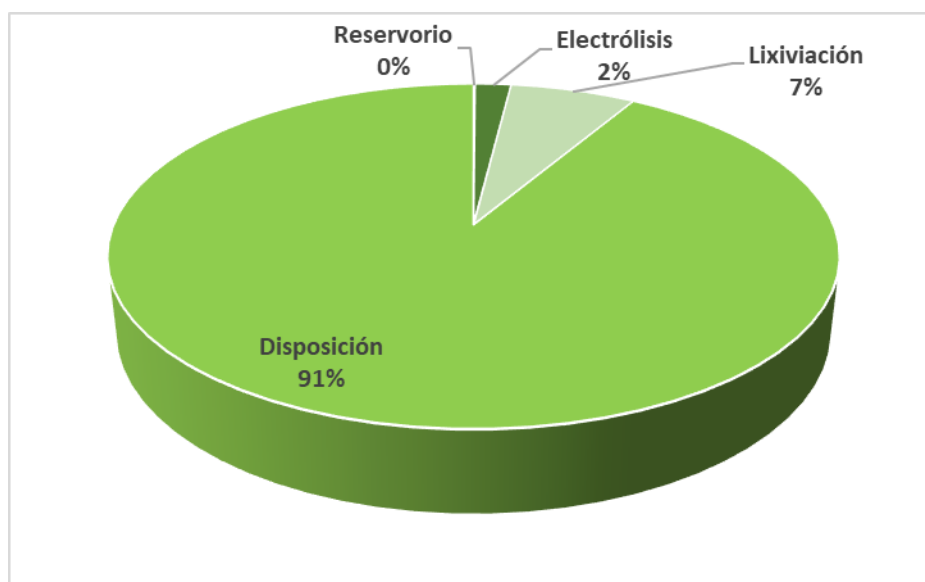


Figura 64. Proporción de Huella Hídrica Verde correspondiente a cada módulo.

Como se ha mencionado anteriormente, dentro de este sistema no se identificaron descargas de Agua Gris con el potencial de contaminar algún cuerpo de agua, por lo tanto, no se cuantificó Huella Hídrica Gris en este caso de estudio, únicamente se cuantificó Huella Hídrica Verde y Azul para el sistema, con un valor total de 446 y 4,647 L/t, respectivamente, valor equivalente a una Huella Hídrica total del proceso RLE analizado de 5,093 L/t (Figura 65).

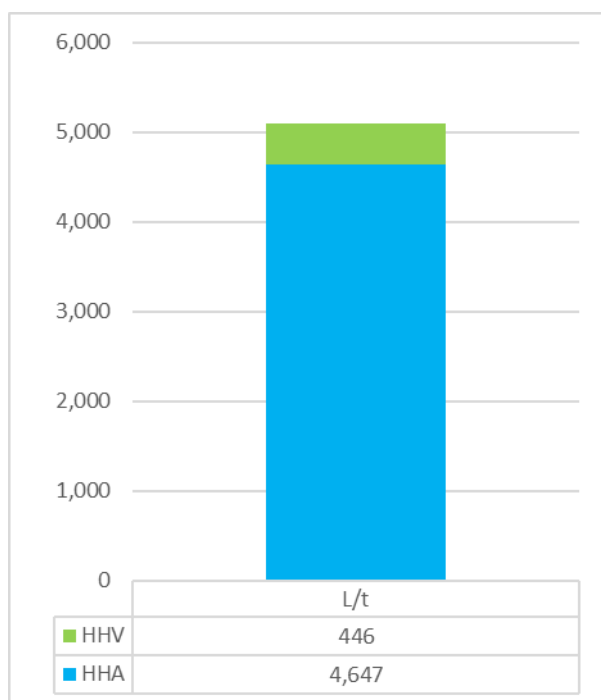


Figura 65. Huella Hídrica Verde y Azul Total del proceso RLE en L/t.

De manera similar se determinó la HHV y HHA con un valor total de 44,599 y 465,032 m³/año, respectivamente, valor equivalente a una Huella Hídrica total del proceso RLE analizado de 509,631 m³/año (Figura 66).

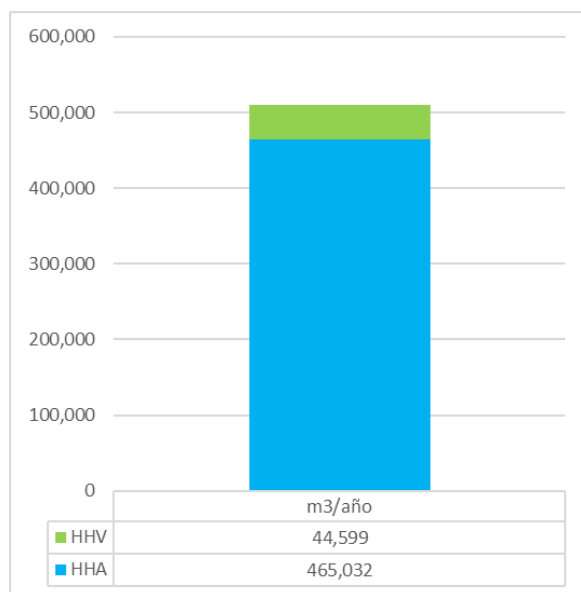


Figura 66. Huella Hídrica Verde y Azul Total del proceso RLE en m³/año.

Proporcionalmente, estos valores equivalen al 91% y 9% de la Huella Hídrica calculada para la HHA y HHV, respectivamente, en el sistema estudiado.

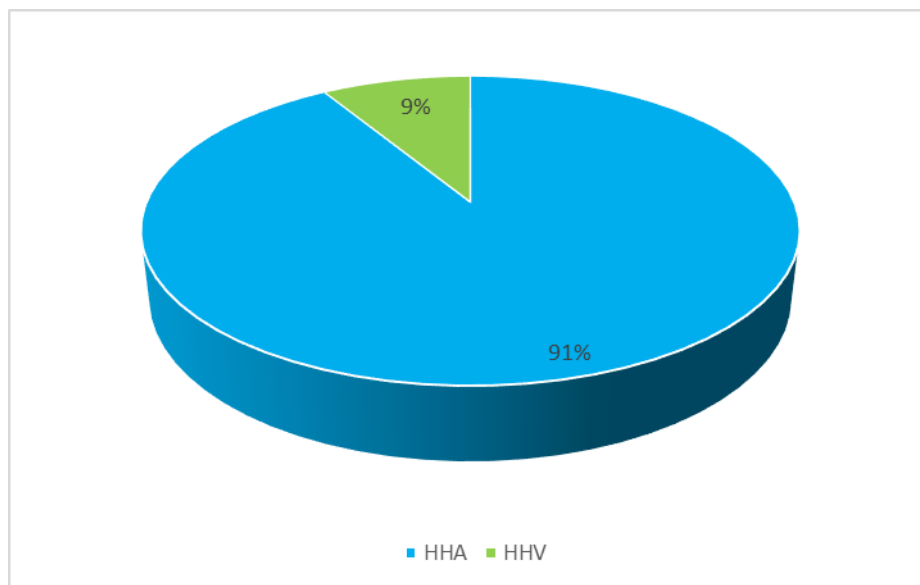


Figura 67. Proporción de Huella Hídrica correspondiente a cada tipo de agua (Verde, Azul, Gris).

Po lo tanto, es posible identificar una mayoritaria HHA asociada con el volumen de HHA incorporada al proceso y a la evaporación de Agua Azul en superficies expuestas a la intemperie que contienen soluciones acuosas. De acuerdo con diversos estudios que han determinado la Huella Hídrica de procesos minero-metalúrgicos, se ha calculado una mayoritaria HHA en comparación con los otros

tipos de HH (Verde y Gris) (Zhang et al., 2022; Islam y Murakami, 2020; Castro y Montenegro-Gambini, 2014).

Zhang et al. (2022) determinaron la Huella Hídrica resultante de la producción de cátodos de cobre, determinando una HHA aproximada de 70% de la HH total calculada.

Por otro lado, Islam y Murakami (2020) calcularon la Huella Hídrica de concentrados y subproductos en una mina de cobre a cielo abierto, obtuvieron los flujos de entrada y salida de agua a partir de inventarios de uso de agua y determinaron la HHA, HHV y HHG con valores de 52, 989 y 70 m³ por tonelada de concentrado de cobre, respectivamente, la incertidumbre de los resultados oscila entre el 8 y 11%, demostrando solidez en el análisis, utilizando la simulación Montecarlo con 1,000 iteraciones. En este estudio la HHA fue responsable del 89% de la HH total calculada, por otro lado, la HHV y HHG, fueron responsables únicamente del 5 y 6% respectivamente.

Castro y Gambini (2014) determinaron la Huella Hídrica del cobre con un valor de 116 m³/t, la HHA, HHG y HHV fueron equivalentes a 81, 33 y 2 m³/t, equivalentes al 70, 28 y 3%, respectivamente.

También se reporta que en los procesos minero-metalúrgicos se demanda un mayor volumen de Agua Azul debido a que las operaciones utilizan en su mayoría agua proveniente de cuerpos superficiales o de origen subterráneo, como en la mayoría de los procesos productivos, por lo tanto, en la mayoría de los casos se podría esperar un valor de HHA superior a los valores de HHV y HHG.

Modelo numérico

Incertidumbre del modelo

Uno de los principales problemas al estudiar los procesos minero-metalúrgicos es que son sistemas muy dinámicos y su configuración es compleja y variable de un sitio a otro, aun cuando se estudie el mismo tipo de proceso, ya que además se encuentran en constante interacción con variables climatológicas, lo que se ha convertido en un tema de interés en los últimos años debido a que es una industria imprescindible para el desarrollo tecnológico y para cubrir las necesidades humanas, por lo tanto el estudio de la Huella Hídrica es indudablemente necesario en este tipo de sistemas, ya que el recurso hídrico es esencial para determinar la viabilidad de las operaciones minero-metalúrgicas (Northey et al., 2016).

La complejidad de cuantificar la Huella Hídrica en la industria minero-metalúrgica se ve reflejada en la limitada cantidad de estudios específicos para este tipo de procesos, aunado a restricciones como el acceso a bases de datos y a inventarios detallados de consumo de agua. No obstante, para representar adecuadamente estos sistemas resulta necesario emplear datos con resolución diaria, debido a que los flujos hídricos presentan variaciones continuas asociadas a cambios operativos (paros, arranques, mantenimiento, variaciones en la ley del mineral, recirculaciones internas) y a factores externos como temperatura, precipitación y evaporación. El uso de promedios mensuales o anuales puede ocultar picos de consumo, pérdidas por evaporación o descargas eventuales que influyen de manera significativa en la Huella Hídrica, particularmente en su componente azul y gris. Por ello, el empleo de datos diarios permite capturar la dinámica real del sistema y reducir la incertidumbre en la estimación de los flujos y de los impactos asociados. (Rodríguez et al, 2023; Hoekstra et al, 2005, Northey et al., 2016).

Todos los modelos de predicción numérica son una representación idealizada de la realidad, por lo tanto, son incapaces de representar perfectamente el verdadero compartimiento del sistema (Simoen et al., 2015), debido a esto, todos los modelos tendrán cierto grado de incertidumbre y en la determinación de la Huella Hídrica no es la excepción (Islam y Murakami, 2014), es por esta razón que se recurre a la simulación Montecarlo (SMC), cuya particularidad es la propagación de incertidumbre de los datos de entrada en los resultados de salida, obteniendo datos representativos del sistema simulado (GoldSim, 2026).

Debido a las limitaciones en cuanto a inventarios de datos diarios o de bases de datos suele ser más factible y práctico la estimación de datos, aumentando la incertidumbre del modelo, medir parámetros disminuye la incertidumbre, pero suele requerir de una gran inversión de tiempo. La utilidad y gran ventaja del software utilizado es que permite la alimentación de datos estocásticos y determinísticos, en la Figura 68 se visualizan los tipos de distribuciones utilizadas en el modelo. Uno de los principales objetivos de este trabajo es realizar una modelación diaria para disminuir este tipo de incertidumbre y tener resultados con la mayor representatividad posible del sistema estudiado. De esta manera es imprescindible contar con la mayor cantidad de datos para la modelación de un sistema tan complejo y dinámico, como lo es el de un proceso minero-metalúrgico.

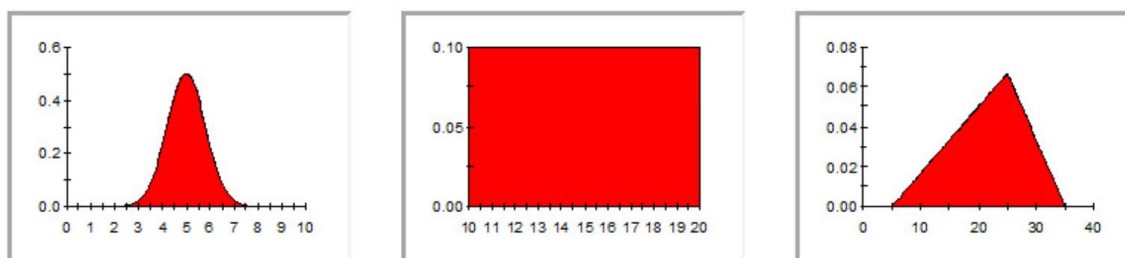


Figura 68. Tipos de distribuciones utilizadas en el modelo: normal, uniforme, triangular (Tomada de GoldSim, 2025).

Iteraciones

Una iteración se refiere a la capacidad de repetir cálculos o simulaciones en un modelo, el número necesario de iteraciones para una simulación no está bien definido y depende del objetivo de la simulación, debido a la subjetividad de esto, existen algunas herramientas que permiten encontrar un número aproximado de iteraciones para determinar que un modelo este bien ajustado, en GoldSim a las iteraciones se les denomina realizaciones. Algunas de estas herramientas son:

Límites de confianza

Para un determinado intervalo de confianza, en este caso 95%, los resultados esperados se encuentran dentro de los límites de confianza, con un 95% de confianza, como se muestran en las Figuras 69 y 70.

El siguiente gráfico (Figura 71) muestra los resultados de la simulación con 100 iteraciones, los valores son dispersos y, por lo tanto, existe una mayor área en donde se pueden encontrar dentro de los límites de confianza.

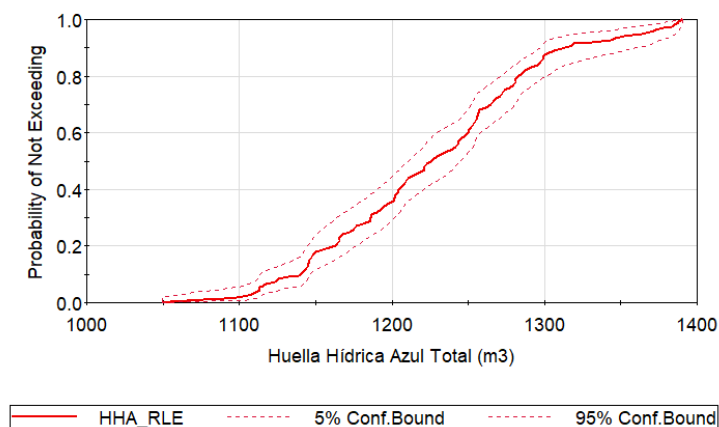


Figura 69. Gráfico de distribución de resultados con 100 iteraciones

Para un mayor número de iteraciones, en este caso 500 es posible visualizar como el área donde se pueden encontrar los resultados, se ve drásticamente reducida, y la tendencia de los datos se ve más suavizada.

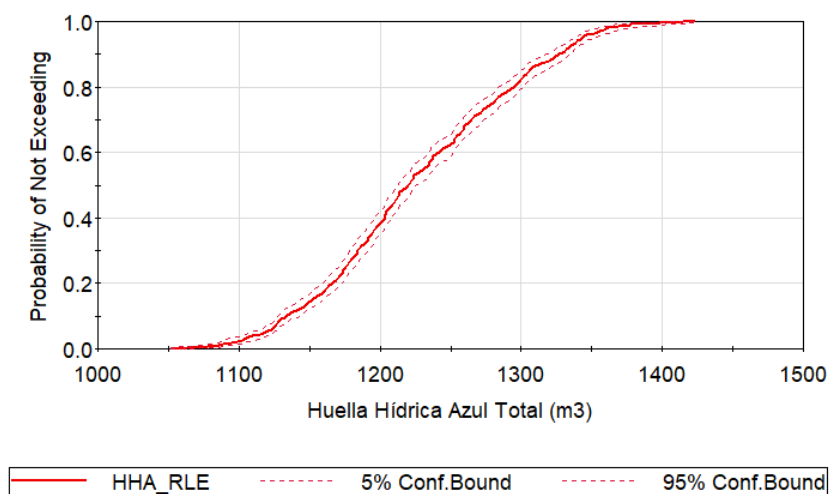


Figura 70. Gráfico de distribución de resultados con 500 iteraciones

Por lo tanto, un mayor número de iteraciones para el caso de estudio genera que los valores de los resultados se encuentren dentro de un área más reducida dentro del intervalo de confianza (95%).

Distribuciones de probabilidad

Dentro del software GoldSim se pueden visualizar los resultados de diferentes maneras, una de ellas es a partir de gráficos de probabilidad, estos gráficos muestran rangos de probabilidad en diferentes colores, de esta manera se puede identificar el rango donde es más probable que se encuentren los resultados de las iteraciones realizadas.

El siguiente gráfico (Figura 71) permite visualizar los valores de la Huella Hídrica Total diaria en metros cúbicos (m^3), los valores promedio se encuentran en color negro formando una línea, los valores más cercanos a los valores promedios se encuentran en tonos rojos más oscuros y los valores más lejanos en tonos rojos más claros.

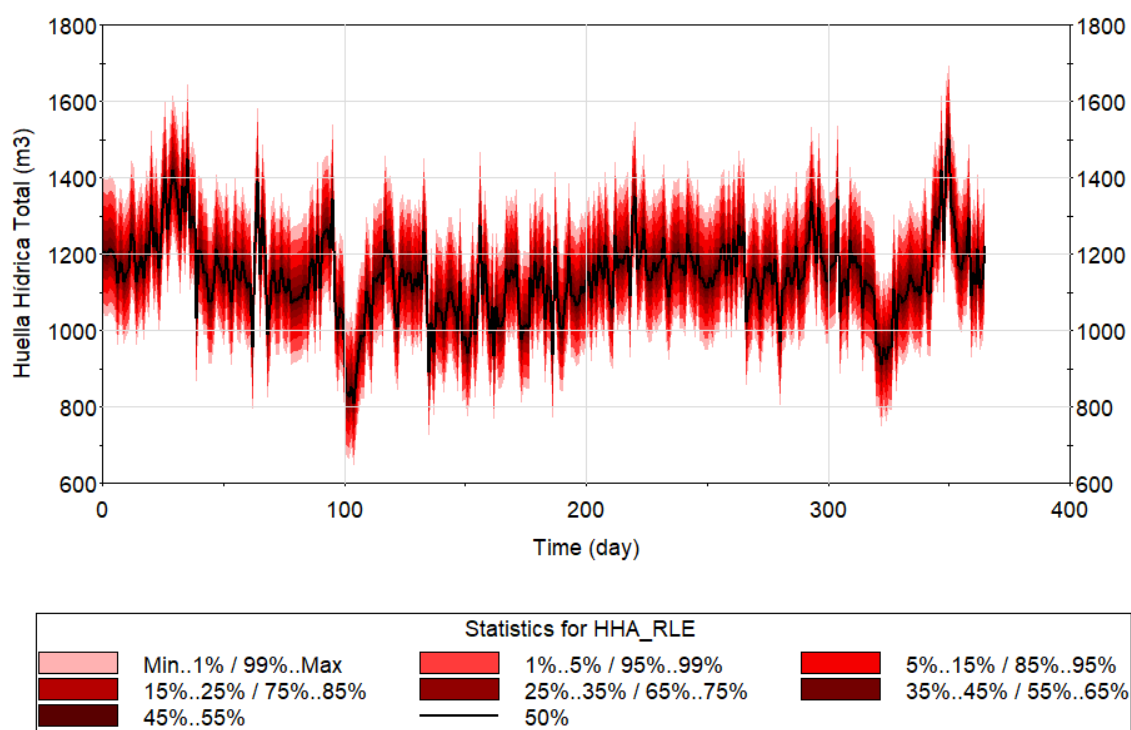


Figura 71. Gráfico de distribución probabilística de resultados de Huella Hídrica Total Diaria (m^3).

El valor promedio de la HHA total diaria es de $\sim 1,200 m^3$, con una incertidumbre absoluta de $224 m^3$, es decir el valor de la Huella Hídrica Total diaria puede variar entre $876 m^3$ a $1,424 m^3$

diariamente ($1,200 \text{ m}^3 \pm 224 \text{ m}^3$), con una incertidumbre relativa aproximada del 20%, de acuerdo con otros modelos numéricos descritos, este valor nos indica que el modelo tiene una incertidumbre aceptable, otorgando un buen nivel de confiabilidad (EPA, 2009).

La mayor dispersión ocurre en algunos picos del año, indicando eventos con alta incertidumbre o cambios operativos importantes. La variación diaria y los picos pueden explicarse por factores operativos de la planta, que pueden incrementar la HH en ciertos días o condiciones ambientales como cambios de temperatura, precipitación o evaporación, que afectan la demanda de agua y las pérdidas, influyendo en la HH azul y verde. Los periodos con evaporación alta pueden generar picos de HH.

La simulación Monte Carlo refleja cómo la incertidumbre en los datos de entrada, se traducen en variabilidad en la HH diaria. Esto permite capturar fenómenos extremos, que podrían perderse si solo se usaran promedios mensuales o anuales, que no reflejan ampliamente la dinámica real del sistema. El análisis diario permite identificar información útil para la gestión hídrica y la reducción de impactos ambientales.

Análisis de sensibilidad

Permite visualizar el grado de influencia de una o más variables estocásticas en un resultado específico. Este tipo de análisis permite identificar los parámetros que más contribuyen en la incertidumbre de los resultados, de esta manera es posible identificar cuales parámetros probabilísticos están generando ruido en el modelo y reducir la incertidumbre de los resultados generando más información acerca de estos.

Existen diversos tipos de gráficos y herramientas que permiten realizar análisis de sensibilidad, como los gráficos multivariados que permiten visualizar el comportamiento de dos variables estocásticas vs un resultado, en este caso Huella Hídrica Azul (resultado) vs tiempo de riego y volumen de riego (variables estocásticas) (Figura 72).

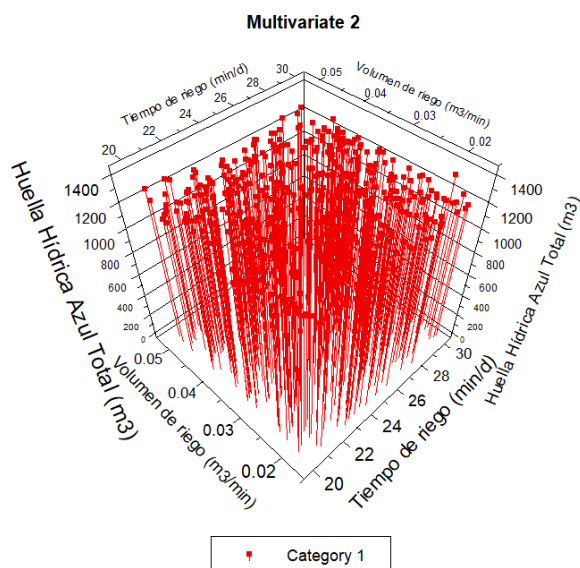


Figura 72. Análisis de sensibilidad de datos de entrada (volumen de riego y tiempo de riego) vs datos de salida (Huella Hídrica Azul Total).

Este tipo de análisis pueden realizarse para los datos estocásticos más relevantes que influyen en los resultados de la salida, en este caso la Huella Hídrica Total cuantificada, en la Figura 74 se muestra que las variables Número de Purgas (Num_Purgas) y Volumen de Purga (Purga), son 2 de las variables que mayor influencia tienen en la cuantificación total de HH.

HHA_RLE: Sensitivity analysis (based on values). Coefficient of determination = 0.997728

	Result	Importance Measure	Correlation Coefficient	Regression Coefficient	Partial Coefficient
1	T_Riego	0.000	-0.010	0.002	0.046
2	Vol_Riego	0.032	0.101	-0.002	-0.044
3	Pur_ácido	0.013	0.015	-0.000	-0.001
4	Num_camione	0.000	0.026	0.044	0.675
5	Cap_Pipas	0.020	-0.043	0.012	0.242
6	Num_Purgas	0.387	0.619	0.618	0.997
7	Purga	0.602	0.785	0.785	0.998
8	Ad_FLO	0.000	-0.043	0.028	0.501

Figura 73. Análisis de sensibilidad de datos estocásticos de entrada.

En este sentido, esta información es relevante debido a que permite visualizar en que variables es necesario poner atención tanto para la aplicación de oportunidades de mejora que permitan un

consumo eficiente del recurso hídrico, tanto para la generación de datos e inventarios de consumo de estas variables, ya que son las que mayor aportación tienen para el indicador.

Otra manera de visualizar un análisis de sensibilidad es a través de una gráfico de función normalizado X-Y, en este tipo de gráficos se visualiza un resultado (en este caso Huella Hídrica Total diaria, m^3) en el eje Y, y las variables estocásticas normalizadas en el eje X, en este caso Pureza de ácido (Pur_Ácido), Purga de ácido (Purga), Num de camiones (Num_camiones), Tiempo de riego (T_Riego), Capacidad de pipas (Cap_Pipas), Volumen de riego (Vol_riego), Número de Purgas (Núm_Purgas), Adición de agua en módulo flotación (Ad_FLO), estas variables se encuentran formando líneas de diferentes colores, como se muestra en el gráfico, aquellas que están más cerca del valor promedio de Huella Hídrica Total diaria indican que a pesar de que su valor aumente o disminuya, no tendrán influencia significativa en los resultados de Huella Hídrica Total Diaria (HHTD), por el contrario, aquellas que se alejan más del valor promedio cerca de los valores normalizados 0 y 1, indican que tienen una mayor influencia en los resultados de HHTD, tal es el caso de las variables Número de purgas (Num_Purgas) y Volumen de Purga (Purga).

Esta información es de gran importancia porque a partir de la determinación de las variables que tienen mayor influencia en los resultados, es posible identificar las variables o parámetros que tienen mayor contribución en el cálculo de la Huella Hídrica dentro del proceso, especialmente en las variables estocásticas, así es posible proponer oportunidades de mejora para un consumo más eficiente del recurso hídrico y, además, generar datos e inventarios de consumo para estos parámetros.

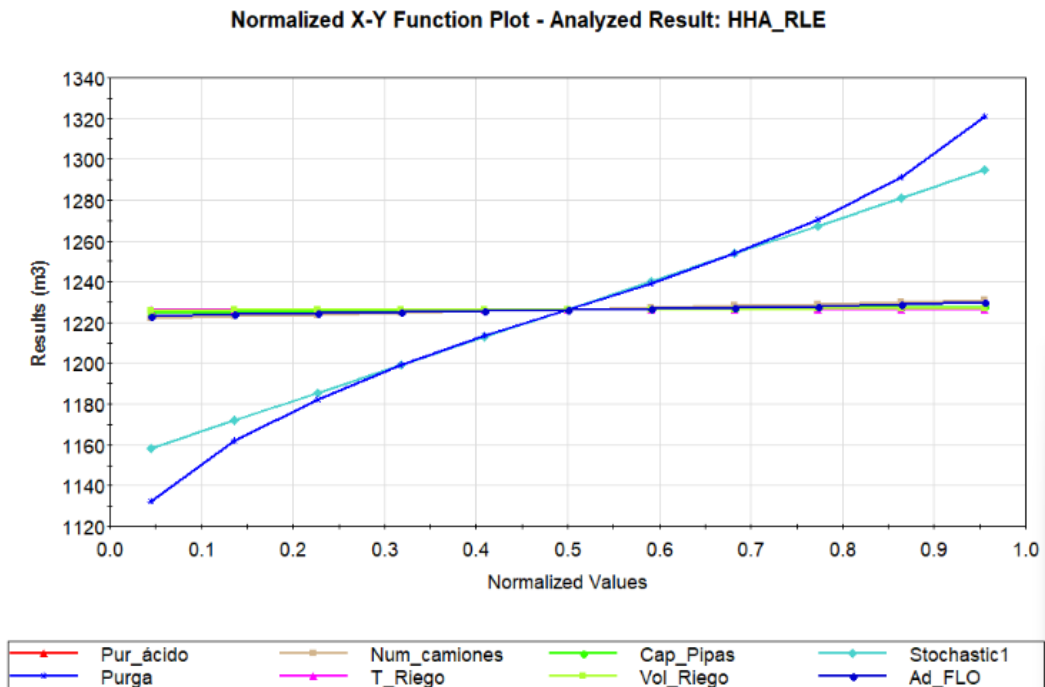


Figura 74. Análisis de sensibilidad X-Y normalizadas de datos estocásticos de entrada

De la misma manera, es posible visualizar las variables con mayor influencia en gráficos de sensibilidad tipo tornado en donde las variables Número de purgas (Num_Purgas) y Volumen de Purga (Purga) son las que muestran mayor influencia en los valores de HHA del proceso RLE analizado.

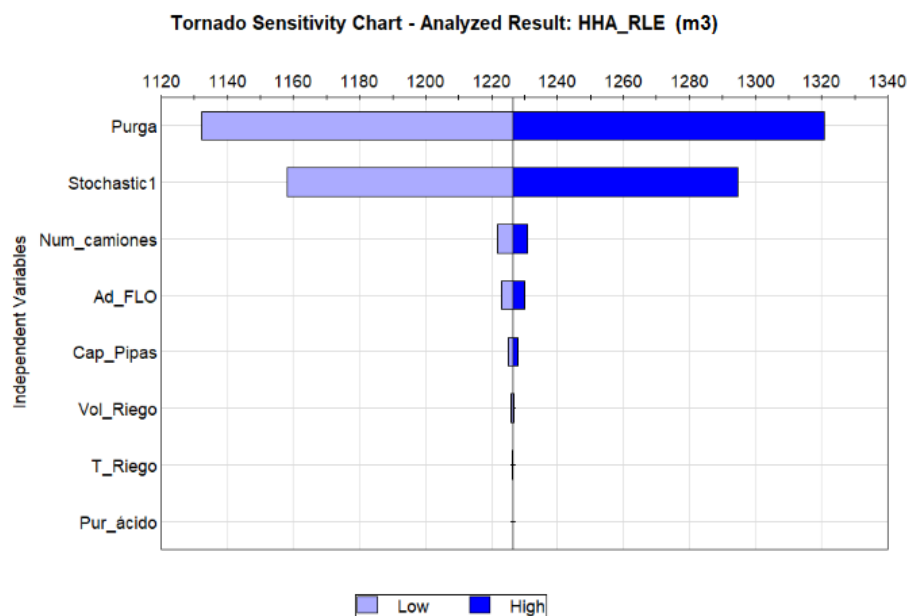


Figura 75. Análisis de sensibilidad tornado de datos estocásticos de entrada.

Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente es posible visualizar que en cuanto a la Huella Hídrica Verde y Azul, el módulo con una mayor aportación es el módulo Disposición de residuos minero-metalúrgicos, cabe señalar que este es el módulo con mayor extensión, con la mayor captación de agua de lluvia, así como incorporación de agua azul, debido a ello es también el módulo en donde mayor evaporación existe.

Las variables con mayor influencia en los resultados de Huella Hídrica Total diaria corresponden a variables relacionadas con la adición de volúmenes de agua del módulo de Planta de ácido, correspondientes al volumen y número de purgas (Purga, Num_Purgas respectivamente), es decir que además de que son las variables que tienen una mayor influencia en los resultados de la determinación de Huella Hídrica, además son variables estocásticas, es decir que no se tienen datos diarios de estas variables, por lo tanto es imprescindible, generar información acerca de estas variables, ya que un valor más bajo o alto en cuanto a los volúmenes de purga así como en el número de purgas pueden afectar significativamente el valor de Huella Hídrica Total diaria, de esta manera es posible establecer que un menor consumo de agua en los procesos de purga así como un menor número de purgas podrían disminuir drásticamente el valor de Huella Hídrica Total diaria.

Variaciones de Huella Hídrica

Algunos estudios (Castro y Gambini, 2014) han reportado un gran número de variables que pueden tener influencia en la determinación de la Huella Hídrica de los proceso minero-metalúrgicos tales como:

- Ley del mineral:** Existe una relación entre la ley del mineral y el consumo de agua, se han reportado mayores tasas de consumo del recurso hídrico, cuando las leyes de corte son bajas.
- Tamaño de empresa:** Este factor es importante de considerar por razones relacionadas con la escala de operaciones, eficiencia y disponibilidad de recursos
- Ubicación:** La ubicación es determinante para una operación minero-metalúrgica, ya que de ella dependerá la disponibilidad y acceso a el recurso hídrico, así como las condiciones climáticas del sitio.
- Otros:** Tipo de proceso que se lleva a cabo, productos secundarios, mineral del que se extrae metal de interés.

El análisis de estos factores permite tener un mejor contexto del sitio de estudio en donde se lleva a cabo un proceso minero-metalúrgico, así como conocer las problemáticas o tendencias futuras que se pueden presentar para aplicar y definir estrategias relacionadas con el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en la industria.

Disminución de la Huella Hídrica Azul

La mayor parte de la Huella Hídrica calculada en el estudio de caso corresponde a la Huella Hídrica Azul, de acuerdo con la definición del Manual de Evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011), el concepto de HHA está asociado con el volumen de agua de origen subterráneo o superficial.

En el caso de estudio, se determinó como Agua Azul a la mayor parte de agua que se incorpora en el proceso, debido a que parte del volumen de agua proviene de agua de pozo, es decir de origen subterráneo, como lo es en la mayor parte del estado de San Luis Potosí (CONAGUA, 2025).

Por otro lado, parte del Agua Azul calculada en el proceso proviene de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) instalada en la empresa, por ser infraestructura que no es una infraestructura convencional del proceso RLE, no se consideró como un módulo (Figura 76).



Figura 76. Origen de Agua Azul del proceso

De acuerdo con el MEHH, el agua proveniente de la reutilización y reciclaje de aguas residuales puede ser contabilizada como Agua Azul (Figura 77) de esta manera fue que se contabilizó en el presente trabajo.

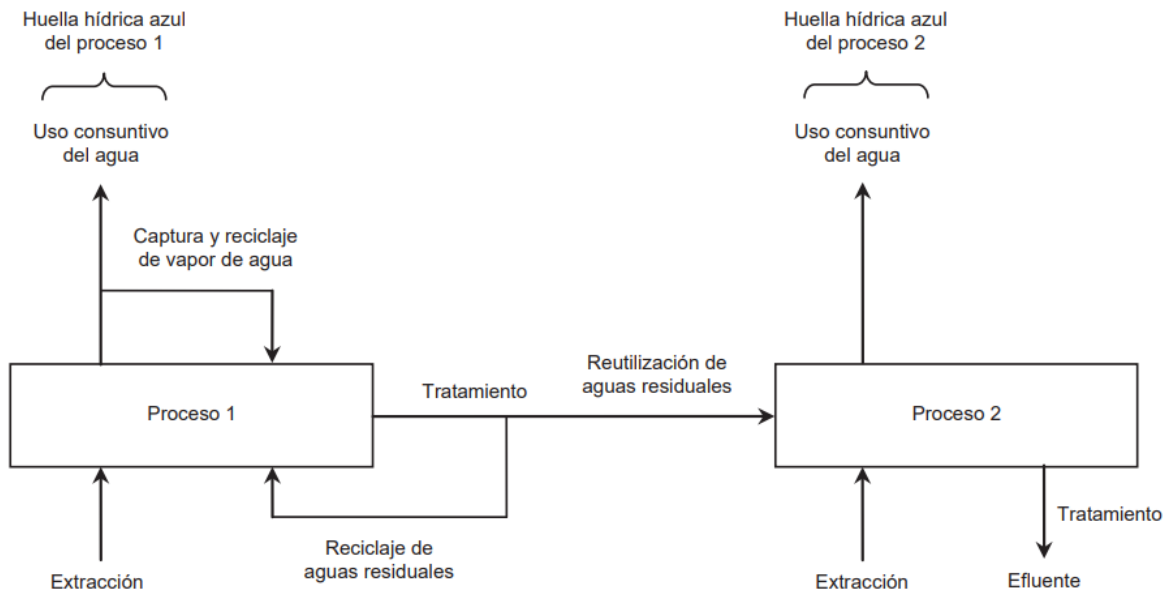


Figura 77. La contabilidad de la Huella Hídrica Azul en el caso del reciclaje y reutilización del agua
(Tomado de Hoekstra et al., 2011)

Por otro lado, investigaciones como las de Morera et al. (2016) y Gómez-Llanos et al. (2020) han calculado la Huella Hídrica de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, determinando una mayoritaria HHA relacionada con la evaporación que existe en las grandes infraestructuras de este tipo de plantas y que además se encuentran expuestas a la intemperie, la HHA también se encuentra asociada a la preparación de reactivos para el tratamiento del influente. Minoritariamente han determinado HHG, asociado con las descargas que ocurren en este tipo de plantas.

Por otra parte, si bien, es complicado establecer el origen del agua proveniente de una PTAR, estas investigaciones han demostrado que, en sí, no se están generando descargas de Agua Gris, el tratamiento de aguas residuales entonces podría disminuir el volumen de HHG, debido a la remoción de contaminantes, debido al procesamiento que se llevaría a cabo (Morera et al, 2016; Gómez-Llanos, 2020).

El cálculo de HHG se realiza de manera que permita una comparación entre dos escenarios: el escenario del tratamiento y el escenario en donde no se da un tratamiento a las aguas residuales y se descargan. Esta comparación permitirá determinar la HHG que se está evitando al realizar el tratamiento y una disminución entonces de la HHA, puesto que se está disminuyendo la extracción directa de agua subterránea y/o superficial.

De acuerdo con el concepto de HHG del MEHH, este se refiere al volumen de agua necesario que se necesita para diluir los contaminantes hasta que se encuentren debajo de los límites que establece la legislación vigente (Hoekstra et al., 2011).

Debido a esta información, fue entonces que se decidió determinar el volumen de Agua Gris que se está evitando y también cuantificar el volumen de Agua Azul que se está disminuyendo.

De este modo el agua proveniente de la PTAR se puede considerar como el Agua Gris que se está evitando, aun considerando que el origen del Agua tratada es externo al sistema estudiado, por lo tanto, el Agua Azul total que se incorpora al proceso es igual a la suma del agua de la PTAR más el agua de pozo, por lo tanto, el Agua Azul que se contabiliza para la HHA es igual al Agua Azul total que se incorpora al proceso menos el agua que proviene de la PTAR (Figura 78).

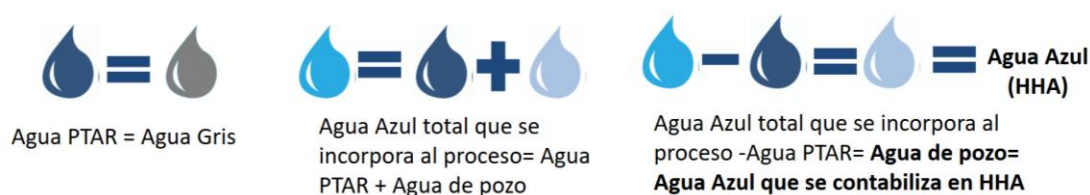


Figura 78. Agua Azul que se contabiliza para determinar la Huella Hídrica Azul.

De acuerdo con los datos recopilados en el sitio de estudio, para el año 2022 el volumen de agua tratada en la PTAR de la empresa corresponde a un valor total promedio de 351,313 m³, comparado con la HHA total calculada para el mismo año con un valor de 465,032 m³, lo que nos da un valor de Agua Azul equivalente a 113,720 m³.

Este valor, por lo tanto, representa la disminución de la HHA en un 76% aproximadamente, a través del tratamiento de un efluente para uso industrial, de acuerdo con Malla et al. (2024) la disminución del uso y por lo tanto de la HH de un proceso se puede llevar a cabo mediante acciones como la reutilización y reciclaje de agua, ya que solamente se podrá llegar al uso sostenible del recurso reduciendo la huella hídrica de los procesos productivos.

La reducción de la HH no solo tiene impactos en el recurso hídrico y en el ambiente, también en la economía y en la sociedad, debido a que se disminuyen los costos operativos de la extracción o abastecimiento, además de que los usuarios tendrán acceso al recurso (Northey et al, 2016).

Resulta de gran relevancia, ya que se ha documentado que gran parte de los procesos minero-metalúrgicos se encuentran en zonas con climas secos, generalmente con problemas relacionados con el recurso como estrés hídrico, escasez o conflictos entre usuarios (Meibner, 2021).

La Huella Hídrica (HH), por lo tanto, funciona como herramienta para evaluar la sostenibilidad del recurso y solo se podrá hacer uso sustentable del recurso hídrico, cuando se conozca cuánto y cómo se consume, la HH entonces puede ayudar a la determinación de diversos aspectos para posteriormente sugerir oportunidades de mejora.

VI. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La flexibilidad de la metodología propuesta ha permitido su aplicación en un caso de estudio, así como la representación de los 12 módulos que integran el modelo conceptual del proceso hidro-electrometalúrgico para la refinación de zinc, denominado RLE.

Se identificaron claramente los límites del sistema y las principales etapas del proceso RLE. Este reconocimiento fue fundamental para establecer los puntos clave de ingreso, consumo y salida de agua en el sistema. Se desarrolló un modelo conceptual estructurado en módulos, que representan tanto los procesos unitarios como los flujos de agua involucrados. Esta estructura facilitó la comprensión del proceso y permitió una asignación precisa de los componentes de la Huella Hídrica (Azul, Verde y Gris) a cada módulo.

Se construyó un modelo numérico en el software GoldSim, el cual permitió calcular los flujos desconocidos mediante simulación dinámica. El modelo incorporó datos determinísticos y estocásticos, alcanzando una incertidumbre promedio del 20%.

El análisis de la Huella Hídrica en el proceso de refinación de zinc muestra que la mayor parte de la huella cuantificada está asociada con el Agua Azul, especialmente en el módulo de Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos con más del 30%. El módulo de Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos, también representa más del 90% de la Huella Hídrica Verde, para la determinación global no se cuantificó Agua Gris debido a la ausencia de descargas en el proceso.

Además, fue posible determinar la disminución de la HHA, debido a la cuantificación de agua de proceso proveniente de una PTAR, lo cual redujo la HHA en un 76% representando una reducción drástica en el indicador.

La metodología propuesta constituye una herramienta robusta y replicable para la evaluación de la Huella Hídrica, con potencial para ser aplicada en otros procesos minero-metalúrgicos. Los resultados obtenidos brindan una base sólida para el desarrollo de estrategias que promuevan una gestión más eficiente y sostenible del agua en la industria minera-metalúrgica.

Recomendaciones

De acuerdo con las tendencias se espera que la Huella Hídrica en los procesos minero-metalúrgicos aumente debido a factores como leyes de corte cada vez más bajas, por lo tanto, es imprescindible mejorar la gestión del recurso en este sector esencial.

De acuerdo con los resultados, los valores indican que los módulos que tienen mayor aportación o mayor influencia en el indicador son el módulo de Disposición de Residuos Minero-Metalúrgicos, por lo tanto, es en donde se deben de enfocar los esfuerzos por disminuir la HH, principalmente y debido a la gran extensión que tiene este módulo y a la potencial evaporación que existe, debido a las condiciones climáticas del sitio de estudio, sin embargo como se revisó con la HHA, la manera más eficiente de reducirla es mediante la disminución del consumo, así como la implementación de acciones de reutilización y reciclaje de agua, tales como la incorporación de PTAR para uso de agua en el proceso.

Contrario a la HHA, en el caso de la HHV se debe de poner especial atención en la captación y aprovechamiento de agua de lluvia y evitar la evaporación en el módulo. Por otro lado, es imprescindible la generación de datos diarios, para tener un mejor conocimiento de cómo oscila la HH a través del tiempo, sobre todo de aquellas variables que tienen gran influencia en el indicador

En resumen, en los módulos con mayor HHA se deben de enfocar esfuerzos en la reducción del consumo y en los módulos con mayor HHV se deben enfocar esfuerzos en la captación de agua de lluvia, así como evitar la evaporación.

De aquí la importancia de analizar la HH de acuerdo con su origen (Azul, Verde o Gris), ya que de esta manera es posible identificar las oportunidades de mejora específicas de acuerdo con la infraestructura o procesos relacionados a cada tipo de agua, de igual manera es importante el desarrollo del modelo conceptual, ya que es posible identificar en que módulos hay una mayor HH y encontrar los factores que más influyen en este valor.

De igual manera, es imprescindible compartir la información derivada de este tipo de análisis con los departamentos de Ecología o Sostenibilidad de los sitios estudiados, a fin de comprender el

funcionamiento del indicador y orientar los esfuerzos hacia las oportunidades de mejora identificadas.

Referencias

- Asociación Latinoamericana de Zinc (LATIZA). (2024). Uso y aplicaciones. <https://latiza.zinc.org/zinc/uso-y-aplicaciones/>
- Atakhanova, Z. (2023). Water Impacts and Effluent Quality Regulations of Canadian Mining. *Sustainability*, 15(16086). <https://doi.org/10.3390/su152216086>
- Balarini, J. C., Polli, L. de O., Miranda, T. L. S., Castro, R. M. Z. de, & Salum, A. (2008). Importance of roasted sulphide concentrates characterization in the hydrometallurgical extraction of zinc. *Minerals Engineering*, 21(1), 100–110. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2007.10.002>
- Ballester A., Verdeja L. F., Sancho J. 2000. *Metalurgia extractiva*. Editorial Síntesis, Madrid, 507.
- Cámara Minera de México. (2022). Agua. Informe de sostenibilidad 2022. <https://camimex.org.mx/sostenibilidad2022/agua.html>
- Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: Time for change. *Food and Energy Security*, 6(2), 61–77. <https://doi.org/10.1002/FES3.109>
- Castro L., y Montenegro-Gambini J. (2014). Huella Hídrica Extendida del Mineral de Cobre en el Perú. 11 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280446105_Huella_Hidrica_Extendida_del_Mineral_de_Cobre_en_el_Peru
- Clay, A. N., Joubert, S., y Moeketsi, N. N. (2022). Mine-impacted water: From waste to resource. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122. <https://doi.org/10.17159/2411>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), estado de San Luis Potosí. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas
- De Lima, J. P. M., Amaral, M. C. S., & Borges de Lima, S. C. R. (2025). Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future. *Journal of Water Process Engineering*, 71, 107239. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107239>

- Ekman Nilsson, A., Macias Aragonés, M., Arroyo Torralvo, F., Dunon, V., Angel, H., Komnitsas, K., & Willquist, K. (2017). A Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. *Minerals*, 7(9), 168. <https://doi.org/10.3390/min7090168>
- European Commission. 2020. *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. https://singlemarket-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areaspecificinterest/critical-raw-materials_en
- Ghooli, A., & Patel, V. K. (2023). Mining wastewater use: Challenges, opportunities, and sustainable approaches. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 5(5), 1193–1203. <https://doi.org/10.35629/5252-050511931203>
- GoldSim Technology Group. (2025). Monte Carlo simulation and methods introduction. GoldSim. <https://www.goldsim.com/Web/Introduction/MonteCarlo/>
- Gómez-Llanos, E., Matías-Sánchez, A., & Durán-Barroso, P. (2020). Wastewater Treatment Plant Assessment by Quantifying the Carbon and Water Footprint. *Water*, 12(11), 3204. <https://doi.org/10.3390/w12113204>
- Gonzalez Valencia, J.E., Montoya, L.J., Botero, A., Arévalo, D., Valencia, V., 2012. Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia). *Rev. Int. sostenibilidad, Tecnol. y humanismo* 7, 27–44.
- Grant, 2001. Grant, R.M.. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* || Zinc Production., 9891–9894. doi:10.1016/b0-08-043152-6/01790-3
- Grupo México. (2022). Informe Anual - 2022. Grupo México. Retrieved 2024, from https://www.gmexico.com/GMDocs/ReportesFinancieros/Esp/2022/RF_ES_2022_IFN.pdf
- Grupo México. (2024). Manual general de purificación (Rev. 1). Departamento de Purificación.
- Gutiérrez Ortega, G. de J. (2019). Determinación del efecto de agentes orgánicos e inorgánicos en el proceso de electrodeposición de zinc, su morfología y la generación de óxido de zinc [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].

- Habashi, F. (1997). Handbook of extractive metallurgy (Vol. 2: Primary metals, secondary metals, light metals). Wiley-VCH.
- Hellgren, S., Engström, F., & Sundqvist Öqvist, L. (2024). The Characterization of Residues Related to the Roasting– Leaching–Electrowinning Zinc Production Route for Further Metal Extraction. *Metals* 2024, Vol. 14, Page 73, 14(1), 73. <https://doi.org/10.3390/MET14010073>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *Manual de evaluación de la huella hídrica* (AENOR, Ed.). Water Footprint Network.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019). Huella hídrica. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/huella-hidrica>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2024). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Huella Hídrica de La Explotación de Los Principales Metales En El País. <https://aguaymineria.imta.mx/mineria/huella>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2002). Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí: Climas. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240_5.pdf
- International Lead and Zinc Study Group. (2023). What is zinc. <https://www.ilzsg.org/what-is-zinc/>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046:2014. Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/43263.html>
- Internacional Zinc Association (IZA), 2023. Internacional Zinc Association (IZA). Actualizada: 2023. [Fecha de consulta: Diciembre 2023] Disponible en: <https://www.zinc.org/>
- Islam, K., & Murakami, S. (2020). Accounting for water footprint of an open-pit copper mine. Sustainability (Switzerland), 12(22), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12229660>

- Kania, H., & Saternus, M. (2023). Evaluation and Current State of Primary and Secondary Zinc Production—A Review. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 2003, 13(3), 2003. <https://doi.org/10.3390/APP13032003>
- Lide, D. R. (Ed.). (2007). CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data (88th ed.). CRC Press.
- Lozano, M. L. 2021. SUPLEMENTO. Diario Financiero. Actualizada: 2021. [Fecha de consulta: Diciembre 2023]. Disponible en: https://www.df.cl/noticias/site/docs/20210302/20210302180129/suplemento_20210303.pdf
- Luckeneder, S., Giljum, S., Schaffartzik, A., Maus, V., y Tost, M. (2021). Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. *Global Environmental Change*, 69(102303). <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2021.102303>
- MachCooling. (2025). How to calculate evaporation rate in cooling tower. Recuperado de <https://www.machcooling.com/How-To-Calculate-Evaporation-Rate-in-Cooling-Tower-id42652675.html>
- Malla, F. A., Tamana, M., Rahman, F., Malla, A. A., Bandh, S. A., Sofi, N. A., Ahmed, M., & Rashid, S. (2024). Strategies for the reduction of water footprints. En *Current Directions in Water Scarcity Research* (Vol. 8, pp. 187–201). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23631-0.00013-3>
- Mardonova, M., y Han, Y. S. (2023). Environmental, hydrological, and social impacts of coal and nonmetal minerals mining operations. *Journal of Environmental Management*, 332 (117387). <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.117387>
- Martínez Pedraza, E. (2022). Notas del Departamento de Electrólisis. Grupo México. Documento interno.
- Martínez Pedraza, E. (2023). Notas del Departamento de Lixiviación. Departamento de Lixiviación, Grupo México. Documento interno
- Meißner, S. (2021). The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities - A Gis-Based Water Impact Assessment. *Resources*, 10(120). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources10120120>

- Monhemius, A. J. (2017). The iron elephant: A brief history of hydrometallurgists' struggles with element no. 26. *CIM Journal*, 8(4). <https://doi.org/10.15834/cimj.2017.21>
- Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. M., & Comas, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112(5), 4741–4748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.102>
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., & Haque, N. (2016). Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*, 135, 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.024>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.pdf>
- Peñoles. (2021). Metales. Peñoles. Retrieved 2024, from <https://www.penoles.com.mx/IA20/metales.html>
- Rodríguez García, J. E. (2016). *Desarrollo de una metodología para la evaluación de la huella hídrica de sistemas de minado a tajo abierto y procesos de lixiviación en montones para la obtención de oro y plata* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rodríguez, J. E., Razo, I., & Lázaro, I. (2023). Water footprint for mining process: A proposed method to improve water management in mining operations. *Cleaner and Responsible Consumption*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100094>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Beneficio y transformación de minerales. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html

- Servicio Meteorológico Nacional. (2024). Información estadística climatológica. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Sinclair, R. (2005). The Extractive Metallurgy of Zinc (Spectrum Series Vol. 13). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Disponible en: <https://www.ausimm.com/globalassets/rio---pubs-not-on-onemine/spectrum/extractive-metallurgy-of-zinc.pdf>
- Simoen, E., De Roeck, G., & Lombaert, G. (2015). Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 56–57, 123–149. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.001>
- Sleiti, A., Salehi, M., & Idem, S. (2020). Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115418>
- Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M., Knights P., Mousavi A. 2021. A novel cut-off grade method for increasing the sustainability of underground metalliferous mining operations. *Minerals Engineering*. 172.
- Treviño Rodríguez, V. D., Carrillo Pedroza, F. R., Soria Aguilar, M. de J., & Aguilera-González, E. N. (2025). Extracción de zinc: procesos para obtener este metal esencial. *EPISTEMUS*, 19(38), e3813409. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.409>
- Uceda Herrera, D. A. (2016). Hidrometalurgia-Química e Ingeniería. In *HIDROMETALURGIA-QUÍMICA E INGENIERÍA HIDROMETALURGIA QUÍMICA E INGENIERÍA* (1a ed.). Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- World Mining Data, 2023. World Mining Data. Actualizada: 2023. [Fecha de consulta: Diciembre 2023] Disponible en: https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data___Data_Section
- Zhang, J., Zhang, J., Deng, Y., Wu, C., Li, H., Qing, Z., Li, J., y Zhang, W. (2023). Quantitative evaluation of ecological and environmental impacts caused by future mining. *Ore Geology* <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2023.105672> Sustainable Reviews, 162.
- Zhang L., Luan X., Chen., X., Zhang S., Liang Y., Cui Z. (2022). Water Footprint Inventory Construction of Cathode Copper Products in a Chinese Eco-Industry. *Sustainability* 2022. 14(10).

Zhang, X., Gao, L., Barrett, D., y Chen, Y. (2014). Evaluating Water Management Practice for Mining. <https://doi.org/10.3390/w6020414> *Water (Switzerland)*, 6(2), 414–433. Zhou, Q., Yang, N., Li, Y., Ren, B., Ding, X., Bian, H., y Yao, X. (2020). Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 22(e00925 <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2020.E00925>