



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**DESARROLLO DE PROTOCOLO PARA PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE  
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE TEST DE CICLO CERRADO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**JOSÉ ALBERTO OJEDA ESPINOZA**

PROFESOR GUÍA

WILLY KRACHT GAJARDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MAGIN TORRES RUBILAR

CLAUDIA RÍOS FIGUEROA

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS  
POR: JOSÉ ALBERTO OJEDA ESPINOZA  
FECHA: SEPTIEMBRE 2018  
PROF. GUÍA: WILLY KRACHT GAJARDO**

**DESARROLLO DE PROTOCOLO PARA PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DE TEST DE CICLO CERRADO**

El presente estudio se lleva a cabo en el laboratorio de procesamiento de minerales en la empresa SGS Minerals, Chile. El principal objetivo de la investigación es evaluar la estrategia actual de procesamiento de resultados de pruebas de laboratorio empleada en la empresa y elaborar un protocolo de procesamiento de resultados experimentales para Test de Ciclo Cerrado, que identifique y dé solución a las problemáticas actuales asociadas al error relativo a la ley de alimentación del metal de interés y a alcanzar con mayor seguridad el estado estacionario. Ambos, criterios necesarios para validar los resultados de un test.

El problema del error relativo de ley de cabeza y su impacto en los resultados de un test se aborda desde la reconciliación de datos experimentales, aplicada a las leyes medidas en los productos finales de 40 pruebas de flotación en ciclo cerrado. Al realizar la reconciliación, el producto que presenta mayor variación relativa en las leyes de cobre, hierro y molibdeno es el relave *rougher*, alcanzando un valor promedio de 20% para leyes de cobre y hierro, mientras que para molibdeno un 77%. Esto que se ve reflejado en un impacto directo a la recuperación proyectada de la etapa *rougher*. Los demás productos presentan promedios de errores relativos menores a 10% para los tres metales y no se observa una relación de impacto significativo con la conservación de masa ni la proyección metalúrgica de recuperación en el circuito *cleaner*. La recuperación global proyectada para cobre, hierro y molibdeno, presenta error absoluto de 2%, 2,5% y 10% cuando el error relativo a la ley de cabeza en cada metal es de 5%, 30% y 20%, respectivamente.

Se estudian las metodologías de cálculo disponibles para el balance de masa (Balance ciclo a ciclo) y para la proyección metalúrgica del test (*N-product*, *SME* y *Concentrate Production*). De ellas, las dos últimas poseen mayor similitud en sus proyecciones y son menos sensibles a la metodología de reconciliación de datos. Aquellas pruebas cuya conservación de masa promedio supera el 98% presentan un error absoluto en sus proyecciones de recuperación global menor a 2% en las tres metodologías. Se estima que es más factible que el test alcance el estado estacionario cuando la variabilidad en la operación es baja, es decir, que el cálculo de la desviación estándar para la recuperación del circuito *cleaner* es menor a 3% para el cobre.

La precisión con que se pueden simular las masas y leyes de metales de un Test de Ciclo experimental se considera lo suficientemente buena como para evaluar condiciones de operación a través de la metodología de Split Factor. Para el cobre, al proyectar los resultados simulados mediante la metodología SME, se obtiene una precisión de 1,85% promedio de la raíz error cuadrático medio en la recuperación global de 8 pruebas realizadas, mientras que para hierro y molibdeno, 1,57% y 8,5%.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN THE  
GRADE OF MINING ENGINEER**

**BY: JOSÉ ALBERTO OJEDA ESPINOZA**

**DATE: NOVEMBER 2018**

**THESIS ADVISOR: WILLY KRACHT GAJARDO**

**DEVELOPMENT OF PROTOCOL FOR PROCESSING AND ANALYSIS OF  
EXPERIMENTAL RESULTS OF LOCKED CICLE TEST**

The present study is carried out in the mineral processing laboratory at SGS Minerals, Chile. The main objective of the research is to evaluate the current strategy of processing laboratory test's results used in the company and to develop a protocol for processing of experimental results for Locked Cycle Test, which identifies and resolves the current problems associated to the relative error of head sample's grade and to reach with greater security the steady state. Both, necessary criteria to validate the results of a test.

The relative error of head sample's grade and its impact in test's results is approached from the data reconciliation of experimental results, applied to the measured grades in the final products of 40 locked cycle flotation tests. When making the reconciliation, the product that presents greater relative variation in copper, iron and molybdenum grades is rougher tailings, reaching an average value of 20% for copper and iron grades, while for molybdenum 77%. This is reflected in a direct impact of the projected recovery of the rougher stage. The other products have averages of relative errors of less than 10% for the three metals and there is no significant impact relationship with the conservation of mass or the metallurgical recovery projection in the cleaner circuit. The global recovery projected for copper, iron and molybdenum, presents absolute error of 2%, 2.5% and 10% when the error relative to the head's grade in each metal is 5%, 30% and 20%, respectively.

The calculation methodologies available for the mass balance (Cycle-by-cycle balance) and for the metallurgical projection of the test (N-product, SME and Concentrate Production) are studied. Of these, the last two have greater similarity in their projections and are less sensitive to the methodology of data reconciliation. Those tests whose average mass's conservation exceeds 98% present an absolute error in their projections of global recovery less than 2% in the three methodologies. It is estimated that it is more feasible for the test to reach the steady state when the variability in the operation is low, that is, the calculation of the standard deviation for the recovery of the cleaner circuit is less than 3% for copper.

The precision with which the masses and metal grades of an experimental Cycle Test can be simulated is considered good enough to evaluate operating conditions through the Split Factor methodology. For copper, when projecting the simulated results using the SME procedure, an accuracy of 1,85% average of the root mean square error in global recovery is obtained in 8 tests performed, while for iron and molybdenum, 1,57% and 8,5%.

## Agradecimientos

El trabajo de tesis o memoria de título ha sido un extenso, adverso y particular camino que puso a prueba los conocimientos, capacidades y habilidades desarrolladas durante mi formación como estudiante de la carrera Ingeniería Civil de Minas en la Universidad de Chile. Respecto a ello, quisiera agradecer a todo aquél que ha brindado su apoyo a esta búsqueda del conocimiento en mis estudios superiores.

En primer lugar a mi familia, Mónica, Hernán y Diego, sin ellos nada de esto sería posible. Fuerza, entrega, dedicación, constancia y perseverancia han sido esenciales durante estos años de estudio, en particular, durante el desarrollo de este trabajo y son ellos quienes me lo han inculcado. Gracias por darme la posibilidad de estudiar, de ser profesional y por todo el amor brindado.

A mis compañeros de carrera, en especial a Valeria González y a Ada Dalidet por ser un apoyo fundamental durante los años de estudio. También agradecer a Daniel Zanelli, Valentina Contreras, Giselle Sepúlveda, M<sup>a</sup> José Bahamondez, Esteban Neira y Diego Chávez. Gracias a todos por su amistad y por los momentos compartidos.

A los profesores y docentes que nos instruyen y educan sobre las prácticas actuales de la ingeniería y de la minería vista como ciencia. En particular, agradecer enormemente al Profesor Willy Kracht por la oportunidad de ser su alumno. Gracias por las directrices, por la disposición y por el tiempo entregado a hacer de éste un mejor trabajo.

A Claudia Ríos y a su equipo de trabajo en SGS Minerals por la oportunidad de poder realizar la investigación en las dependencias de la empresa. Gracias por la disposición, por las enseñanzas, por la cooperación y por el apoyo entregado durante mi paso como miembro del equipo. Agradecer en particular al Profesor Magín Torres, por ser un referente dentro de la empresa. Gracias por las dudas resueltas y el tiempo destinado a ello.

Finalmente, a Fundación Emanuel por la oportunidad de vivir en la Residencia Universitaria Cardenal Caro durante mis años de estudio y a Pamela Cordero por permitir mi estadía en ella hasta el día de mi titulación.

# Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
1.1	Descripción del Problema	3
1.2	Objetivo	4
1.2.1	Objetivos Específicos	4
1.3	Alcances	4
<b>2</b>	<b>Revisión Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Flotación	5
2.2	Condiciones de operación	5
2.3	Etapas en un circuito de flotación	6
2.4	Pruebas de flotación <i>batch</i> en laboratorio	8
2.4.1	Test de Ciclo	9
2.5	Balance de masa ciclo a ciclo	11
2.6	Reconciliación de datos experimentales	12
2.7	Proyección metalúrgica – Métodos de cálculo	13
2.7.1	<i>N-product</i>	14
2.7.2	<i>SME</i>	14
2.7.3	<i>Concentrate Production</i>	14
2.8	Estado Estacionario: Estabilidad y Conservación de masa	14
2.9	Split Factors: Simulación de resultados de TCC	17
<b>3</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>18</b>
3.1	Caracterización de muestras	18
3.2	Procesamiento de resultados	18
3.3	Criterios de validación	21
3.3.1	Error ley cabeza	21
3.3.2	Estado Estacionario: Estabilidad y conservación de masa	21
3.3.3	Pérdida de masa	21
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>22</b>
4.1	Balance de masa	22
4.2	Reconciliación de datos	22

4.2.1	Modelo de error .....	22
4.3	Proyección metalúrgica .....	23
4.4	Simulación de Test de Ciclo Cerrado .....	24
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis .....</b>	<b>25</b>
5.1	Balance de masa .....	25
5.2	Reconciliación de datos experimentales .....	27
5.2.1	Impacto en las leyes .....	28
5.3	Proyección metalúrgica de resultados.....	37
5.3.1	Conservación de masa .....	37
5.3.2	Proyección metalúrgica .....	40
5.3.3	Conservación de masa para resultados reconciliados .....	53
5.3.4	Proyección metalúrgica de resultados reconciliados .....	58
5.4	Predicción de resultados a partir de TCA .....	63
5.4.1	Masa .....	63
5.4.2	Leyes .....	63
5.4.3	Proyección metalúrgica .....	65
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Anexo.....</b>	<b>71</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Estabilidad y Conservación de masa. Convergencia del Test de Ciclo Cerrado. (Ounpuu, 2001-15). .....	16
Tabla 2. Técnicas de análisis utilizadas para medición de leyes. ....	18
Tabla 3. Cantidad de muestras por producto obtenidas en un Test de Ciclo Cerrado.....	19
Tabla 4. Porcentaje de pruebas con valores negativos en el balance de masa por metal. ....	25
Tabla 5. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de cobre medida y reconciliada para cada producto del proceso. ....	30
Tabla 6. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de hierro medida y reconciliada para cada producto del proceso. ....	33
Tabla 7. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de molibdeno medida y reconciliada para cada producto del proceso. ....	36
Tabla 8. Conservación de masa. Promedio de últimos 3 ciclos en masa de mineral y por metal, para cada prueba. ....	37

Tabla 9. Conservación de masa y desviación estándar de recuperación de cada metal en circuito cleaner para cada prueba. ....	50
Tabla 10. Error relativo promedio y RMSE promedio entre masa medida en TCC experimental y masa simulada, para cada producto en el test. ....	63
Tabla 11. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de cobre medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test. ....	63
Tabla 12. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de hierro medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test. ....	64
Tabla 13. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de molibdeno medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test. ....	64
Tabla 14. Proyección metalúrgica de recuperación de cobre. TCC simulado y TCC experimental. ....	65
Tabla 15. Proyección metalúrgica de recuperación de hierro. TCC simulado y TCC experimental. ....	65
Tabla 16. Proyección metalúrgica de recuperación de molibdeno. TCC simulado y TCC experimental. ....	66

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujos de circuito de flotación convencional. ....	7
Figura 2. Aproximación a la conservación de masa para resultados de Test de Ciclo Cerrado. Adaptado de (Agar, 2000) ....	15
Figura 3. Corriente recirculada en test de ciclo cerrado que no alcanza el estado estacionario. Adaptado de (Agar, 2000) ....	15
Figura 4. Diagrama del circuito de flotación utilizado en Test de Ciclo Cerrado. ....	19
Figura 5. Error relativo entre ley de cabeza de cobre medida y calculada en las 40 pruebas analizadas. ....	26
Figura 6. Error relativo entre ley de cabeza de hierro medida y calculada en las 40 pruebas analizadas. ....	26
Figura 7. Error relativo entre ley de cabeza de molibdeno medida y calculada en las 40 pruebas analizadas. ....	27
Figura 8. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	28
Figura 9. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	28
Figura 10. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	29
Figura 11. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	29
Figura 12. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	30
Figura 13. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	31

Figura 14. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	31
Figura 15. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	32
Figura 16. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	32
Figura 17. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	33
Figura 18. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	34
Figura 19. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	34
Figura 20. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	35
Figura 21. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	35
Figura 22. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba. ....	36
Figura 23. Histograma de conservación de masa de cobre promedio de los 3 últimos ciclos de cada test. ....	38
Figura 24. Histograma de conservación de masa de hierro promedio de los 3 últimos ciclos de cada test. ....	39
Figura 25. Histograma de conservación de masa de molibdeno promedio de los 3 últimos ciclos de cada test. ....	39
Figura 26. Recuperación de cobre proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	40
Figura 27. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	41
Figura 28. Recuperación de cobre proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	41
Figura 29. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	42
Figura 30. Recuperación de cobre proyectada del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	42
Figura 31. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	43
Figura 32. Recuperación de hierro proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	43



Figura 33. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	44
Figura 34. Recuperación de hierro proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	44
Figura 35. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	45
Figura 36. Recuperación de hierro proyectada del circuito global en función de la estabilidad promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	45
Figura 37. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	46
Figura 38. Recuperación de molibdeno proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	46
Figura 39. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.....	47
Figura 40. Recuperación de molibdeno proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	47
Figura 41. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.....	48
Figura 42. Recuperación de molibdeno proyectada del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test. ....	48
Figura 43. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.....	49
Figura 44. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de cobre en etapa cleaner. ....	51
Figura 45. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de hierro en etapa cleaner. ....	52
Figura 46. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de molibdeno en etapa cleaner.....	52
Figura 47. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de cobre medidas y reconciliadas. ....	53
Figura 48. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de cobre en cada test.....	54
Figura 49. Error absoluto en conservación de masa de cobre promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza. ....	54
Figura 50. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de hierro medidas y reconciliadas.....	55

Figura 51. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de hierro en cada test. ....	55
Figura 52. Error absoluto en conservación de masa de hierro promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza. ....	56
Figura 53. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de molibdeno medidas y reconciliadas. ....	56
Figura 54. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de molibdeno en cada test. ....	57
Figura 55. Error absoluto en conservación de masa de molibdeno promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza. ....	57
Figura 56. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre rougher para cada metodología. ....	58
Figura 57. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre del circuito cleaner para cada metodología. ....	59
Figura 58. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre global para cada metodología. ....	59
Figura 59. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro rougher para cada metodología. ....	60
Figura 60. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro en circuito cleaner para cada metodología. ....	60
Figura 61. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro global para cada metodología. ....	61
Figura 62. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno rougher para cada metodología. ....	61
Figura 63. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno en circuito cleaner para cada metodología. ....	62
Figura 64. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno global para cada metodología. ....	62
Anexo 1. Modelo de error para análisis de leyes de cobre menores a 5%. ....	71
Anexo 2. Modelo de error para análisis de leyes de cobre entre 5% y 15%. ....	71
Anexo 3. Modelo de error para análisis de leyes de cobre mayores a 15%. ....	72
Anexo 4. Modelo de error para análisis de leyes de hierro. ....	72
Anexo 5. Modelo de error para análisis de leyes de molibdeno. ....	73

# 1 Introducción

En la actualidad, desde hace ya varias décadas, la actividad minera constituye un pilar fundamental en la economía de Chile y desde sus inicios, ha sorteado gran cantidad de obstáculos para mantener la calidad de sus productos según los requisitos del mercado de metales.

Ante la evidente disminución de las leyes en los yacimientos de cobre, la industria potencia el desarrollo de investigaciones con el objeto de adquirir nuevas tecnologías y formar profesionales con mejores competencias, capaces de mitigar el impacto que este evento tiene sobre el inevitable aumento de recursos requeridos por el proceso para mantener los estándares de calidad.

Recursos naturales, insumos y capital humano son necesarios para lograr extraer de manera segura los minerales desde los yacimientos, generando con ello impactos considerables en ecosistemas y comunidades cercanas. No basta sólo con extraer las masas de rocas, además éstas deben ser sometidas a procesos físicoquímicos a gran escala para que la producción de concentrados de cobre satisfaga la demanda de los principales compradores. Junto a ello y en mayor proporción, se producen cantidades significativas de residuos que dañan directamente al medioambiente, lo que preocupa fuertemente a las empresas mineras. Con esto en mente y en pos de una producción de calidad, los modelos de procesamiento de minerales utilizados en plantas industriales han de ser definidos con particular dedicación, de forma que el negocio pueda explotar de manera segura, eficaz y eficiente el potencial de su materia prima.

El proceso de concentración de minerales está definido por las condiciones operacionales a las que se lleva a cabo, evaluadas de manera preliminar a través de campañas metalúrgicas en un laboratorio de procesamiento de minerales. Diversas pruebas han sido desarrolladas para obtener información sobre las condiciones operacionales que permitan procesar de manera estable los minerales de interés económico encontrados en un yacimiento. Los resultados obtenidos en ellas entregan información sobre el potencial comportamiento que éstos podrían presentar al ser procesados en una planta industrial.

Dada la importancia de definir con precisión los modelos metalúrgicos y la necesidad de encontrar alternativas de procesamiento más económicas y menos dañinas con el medio ambiente, el presente estudio entrega un análisis del procesamiento e interpretación de resultados de Test de Flotación en Ciclo Cerrado, siendo esta la prueba batch de laboratorio que más se aproxima al procesamiento de minerales de manera continua.

## 1.1 Descripción del Problema

La investigación nace desde la incertidumbre existente sobre el protocolo de procesamiento de datos experimentales utilizado actualmente en SGS, los criterios de validación de resultados solicitados por los clientes y la gran cantidad de tiempo e insumos requeridos, desde la ejecución de un Test de Ciclo Cerrado hasta el reporte de los respectivos resultados validados.

Un criterio de validación utilizado en pruebas de laboratorio es el error relativo en la ley de cabeza o ley de alimentación al proceso. Cuando la cantidad de masa de mineral y del metal de interés que se alimenta difiere de manera significativa de la cantidad reportada en los productos de un test, éste es considerado como poco representativo y en consecuencia es invalidado, situación en la que es necesario repetir y corregir mediciones o, en algunos casos incluso, ejecutar nuevamente la prueba. Actualmente, se atribuye dicha diferencia al error de medición de las técnicas de análisis químico empleadas en el laboratorio de caracterización de muestras de SGS con las que se determinan las leyes de metales en los productos. Se desconoce si este escenario puede ser solucionado a través de alguna metodología de procesamiento de datos que incorpore los modelos de error del laboratorio químico. Se estudia una alternativa de mejora al aplicar la metodología de reconciliación de datos experimentales a las leyes medidas en un test de ciclo.

Un Test de Ciclo Cerrado puede presentar dificultades en alcanzar la estabilidad y la conservación de masa, mejor conocido como el estado estacionario. Al buscar una aproximación al proceso en continuo, éste corresponde a un criterio de validación de resultados fundamental, mas se desconocen las razones de por qué una prueba puede o no alcanzar dicha condición. Se espera encontrar soluciones a partir del análisis de resultados relacionados al desempeño del proceso.

También, puede presentar dificultades en la operación si es ejecutado bajo condiciones poco favorables para la mineralogía de la muestra ensayada. Se utilizan pruebas preliminares de flotación para evaluar la posibilidad de estimar aquellas condiciones que optimizarían el desempeño de la operación. Se desea conocer si existe alguna técnica de procesamiento de datos que permita simular un test de ciclo cerrado y, a través de él, determinar si las condiciones definidas para su ejecución experimental dificultan o favorecen su desempeño. Se espera determinar una metodología con buen nivel de precisión capaz de predecir resultados de test de ciclo cerrado a través de simulación numérica.

Ante las problemáticas encontradas en procesamiento y análisis de resultados de pruebas de laboratorio, se espera poder desarrollar una metodología alternativa de procesamiento de datos que permita identificar sus principales causas y facilite la interpretación de resultados para futuras investigaciones, en busca de condiciones de operación alternativas capaces de contrarrestar los problemas que enfrenta actualmente la industria minera.

## **1.2 Objetivo**

Desarrollar un protocolo para el procesamiento y análisis de resultados experimentales de Test de Ciclo Cerrado basado en reconciliación de datos.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Evaluar metodología actual de cálculo de balance de masa y proyección de resultados.
- Evaluar los criterios de validación de resultados del test.
- Determinar posibles causas que dificulten a un test a alcanzar el estado estacionario.
- Aplicar la metodología de reconciliación de datos experimentales a resultados de Test de Ciclo Cerrado y evaluar su impacto en los resultados.
- Determinar una manera de predecir con buen nivel de precisión resultados de Test de Ciclo Cerrado.
- Generar una herramienta que facilite la interpretación de resultados de TCC.
- Establecer criterio de control de calidad de la metodología propuesta.

## **1.3 Alcances**

- Se buscan soluciones desde el análisis y procesamiento de datos. No se considera el error asociado a la manipulación de muestras previa ni durante la ejecución del test.
- Sólo se evalúa la representatividad de los resultados. No se analiza el desempeño del proceso respecto a las condiciones de operación y la composición mineral.
- Quedan fuera del estudio el escalamiento de resultados a planta piloto y evaluaciones económicas respecto al producto final.

## **2 Revisión Bibliográfica**

### **2.1 Flotación**

La flotación es un proceso fisicoquímico que hace uso de la diferencia en las propiedades superficiales de los minerales para separar aquéllos que presentan valor económico de aquéllos que no. La teoría del proceso es compleja, pues para lograr la separación es necesario contar con un sistema heterogéneo, es decir, compuesto por tres fases: dos de ellas, sólido (mineral) y líquido (agua), componen la pulpa mineral a procesar, mientras que la fase de gas, en forma de burbujas, conforma el medio principal para el transporte de minerales que presenten carácter hidrófobo en su superficie (Kracht G., 2011).

### **2.2 Condiciones de operación**

En procesamiento de minerales la concentración por flotación juega un rol importante en la recuperación de especies valiosas desde sus respectivas menas. El número de variables que inciden sobre los resultados metalúrgicos obtenidos a través de la aplicación de este proceso a una mena en particular, es muy extenso. Así, el conjunto de variables definirá las condiciones de operación a las cuales se llevará a cabo el proceso y dará sentido al comportamiento mineral observado durante la operación. Más aun, permitirá dar explicación a los eventuales resultados obtenidos una vez finalizada la prueba, siendo la base de un potencial análisis.

Se distinguen, dentro de los factores que inciden en el rendimiento de la operación, perturbaciones y variables. Serán perturbaciones aquellas características del mineral o del proceso que influyen significativamente en él, pero que no pueden ser modificadas ni controladas. Predominan las características granulométricas, densidad y forma de las partículas del material a flotar, además del grado de oxidación de la mena, naturaleza de las especies valiosas (grado de diseminación y tamaño de liberación), pH natural, características químicas y mineralógicas de la mena a tratar, entre otras. En general, todas aquellas propiedades inherentes al mineral y aquellas características resultantes de las etapas previas de conminución aplicadas al material a procesar (Kracht G., 2011).

Por otro lado, se identifican como variables operacionales aquéllas que sí pueden ser modificadas, dentro de ciertos rangos, ya sea manual o automáticamente. Según si son variables sobre las que se actúa para modificar el proceso o si son variables de salida que se miden para conocer el estado del proceso o sus productos, se clasifican en variables manipuladas o controladas. En el segundo caso, se incluyen también parámetros del proceso, que son determinados por cálculo a partir de otras variables.

En general, un circuito de flotación se ve afectado por diferentes variables y perturbaciones que pueden ser agrupadas según el siguiente criterio (Teorías modernas de flotación, 1986).

- I. Material de alimentación
  - a. Naturaleza de las especies valiosas (principales y secundarias)
  - b. Ganga asociada
  - c. Constituyentes solubles de la mena
  - d. Grado de oxidación de la mena
  - e. Grado de alcalinidad o acidez del agua
  - f. pH natural de la pulpa
  - g. Grado de diseminación y tamaño de liberación de las especies valiosas

- II. Molienda/Clasificación
  - a. Fineza granulométrica
  - b. Dureza del mineral y la ganga
  - c. Tiempo relativo de las especies minerales en el circuito de molienda
  - d. Tipo de medio de molienda
  - e. Grado de oxidación durante la molienda
  - f. Reactivos agregados a la molienda
  - g. Densidad de pulpa y tiempo de molienda
  
- III. Etapa de acondicionamiento
  - a. Densidad de la pulpa
  - b. Reactivos químicos agregados
  - c. Secuencia de adición de reactivos
  - d. Temperatura de la pulpa
  - e. Tiempo medio de acondicionamiento
  - f. pH de acondicionamiento
  - g. Intensidad de la agitación (RPM)
  
- IV. Flotación
  - a. Densidad, forma y tamaño de las partículas
  - b. Densidad de pulpa
  - c. pH y temperatura de la pulpa
  - d. Carga circulante
  - e. Tiempo de flotación
  - f. Geometría de la celda: RPM de agitación, grado y tipo de aireación
  - g. Altura de la espuma
  - h. Tipo y clasificación de reactivos químicos

Al tratarse de un sistema complejo de variables interconectadas, existe un número limitado de combinaciones que hacen que la concentración mineral sea efectiva. Por esta razón, es necesario identificar aquellas variables que poseen un impacto significativo en el rendimiento de la operación, y con ello, determinar la condición que asegura una alta recuperación del metal de interés y alta calidad (ley) del concentrado final.

### **2.3 Etapas en un circuito de flotación**

Dado que no es posible recuperar el mineral valioso y eliminar la ganga en forma simultánea en un solo paso, un circuito de flotación generalmente está constituido de varias etapas (Kracht G., 2011) (Finch & Wills, 2015).

#### **Molienda**

Corresponde al proceso de conminución que se realiza mediante la combinación de los mecanismos de impacto y abrasión en tubos cilíndricos o cilindro-cónicos rotatorios, llamados molinos rotatorios. En el interior de ellos se utiliza una carga de medios de molienda que se mueven libremente y que, por la fuerza centrífuga generada en la rotación del molino, se elevan en la dirección de la rotación y caen por acción de la gravedad. El objetivo es lograr el tamaño óptimo

para la posterior flotación primaria, en la cual se espera que el mineral valioso se encuentre en gran medida liberado.

### **Flotación primaria o *rougher***

Es la primera etapa de separación a la que se enfrenta el mineral, su función es maximizar la recuperación, generando un relave con bajo contenido de especies de interés. Produce además una disminución de los flujos a tratar en etapas posteriores.

### **Remolienda**

Similar a la etapa de molienda, se diferencia principalmente en el grado de liberación que deben alcanzar las partículas. En vista de ello, las condiciones a las que se lleva a cabo la prueba también son diferentes, pues debe asegurarse que el mineral alcance las condiciones necesarias para ser procesado en las etapas posteriores. Una etapa de remolienda, a diferencia de la molienda, no se realiza al inicio del circuito, sino dentro de éste. Por lo general, luego de la etapa de flotación *rougher* y procesa el concentrado de ella junto a corrientes que puedan ser recirculadas a esta parte del circuito.

### **Flotación de limpieza o *cleaner***

Destinada a incrementar (maximizar) la ley de concentrado. En esta etapa se genera el producto final de una planta de procesamiento. Es posible que un circuito de flotación posea más de una etapa de limpieza, con el objetivo de alcanzar mayores leyes en el concentrado final.

### **Flotación de repaso, barrido o *scavenger***

Destinada también a maximizar la recuperación. Suele ir después de alguna de las etapas anteriores para el retratamiento de relaves, lo que evita pérdidas considerables de la especie valiosa.

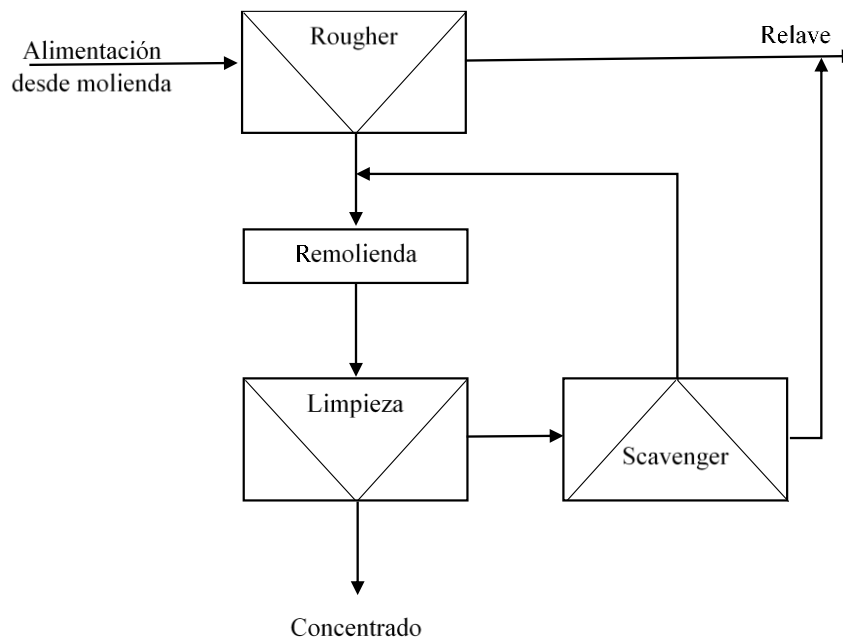


Figura 1. Diagrama de flujos de circuito de flotación convencional.



## **Desarrollo del circuito**

Para el desarrollo de un circuito de flotación destinado a procesar un mineral en particular, es necesario realizar un trabajo preliminar en laboratorio, cuyo objetivo es evaluar la dosificación de reactivos, el tamaño de la planta para una productividad dada, el diagrama de flujos y obtener información periférica del proceso. Es posible también llevar a cabo pruebas de flotación para minerales de plantas de procesamiento operativas, con la finalidad de evaluar el procedimiento actual y la eficiencia de los reactivos adicionados.

Es esencial que las muestras minerales ensayadas sean representativas del mineral tratado en la planta, desde los puntos de vista de composición química, composición mineralógica y el grado de diseminación en pulpa. Debe realizarse un estudio sobre la mineralogía de las muestras antes de seleccionar una muestra representativa. Muestras de compósitos contruidos a partir de testigos de perforación son ideales para las pruebas cuando la perforación en el depósito ha sido extensa. Los testigos, por lo general, contienen minerales de diversos puntos ampliamente distribuidos sobre la superficie del depósito y en profundidad. Es necesario hacer notar que los cuerpos mineralizados presentan alta variabilidad, por lo que una muestra representativa no lo será de igual manera para todas las partes de éste, por lo que se usan entonces para el desarrollo de un procedimiento general de flotación. Pruebas adicionales deben ser realizadas para muestras de diversos puntos y profundidades para establecer las condiciones óptimas en cada caso y así recopilar información fundamental para el diseño industrial sobre el completo rango de variación mineral. En vista de ello, es preferible que las muestras de testigos de perforación sean seleccionadas para representar las variaciones dentro del cuerpo mineralizado. Cada muestra debe ser ensayada de manera independiente y un valor general del depósito es estimado al compositar matemáticamente la respuesta metalúrgica de cada muestra.

Una vez seleccionado el conjunto de muestras representativas del depósito, es necesario prepararlas para las pruebas de flotación, lo que implica la conminución del mineral hasta el tamaño de partículas óptimo. El chancado de cada muestra debe ser llevado a cabo de forma controlada y con especial cuidado para evitar la contaminación de la muestra. El almacenamiento de la muestra chancada es importante, pues se debe evitar la oxidación de superficies, en especial, de minerales sulfurados. La oxidación superficial evita la adsorción del colector y facilita la disolución de iones metálicos pesados, que pueden intervenir en el proceso de flotación. La mejor solución es almacenar las muestras chancadas en una atmósfera inerte. La molienda en húmedo de las muestras debe ser realizada siempre inmediatamente antes de las pruebas de flotación para evitar la oxidación superficial del mineral una vez liberado (Finch & Wills, 2015).

### **2.4 Pruebas de flotación *batch* en laboratorio**

La mayoría del trabajo en laboratorio es llevado a cabo en celdas de flotación *batch*, generalmente con 500 g, 1 kg o 2 kg de muestra mineral. Las celdas son agitadas mecánicamente con velocidad de rotación del impulsor variable y simulando los modelos comerciales disponibles a gran escala. La inyección de aire a la celda se realiza normalmente mediante un tubo vertical que rodea el eje del impulsor, cuyo volumen es controlado por una válvula y por la velocidad de rotación del impulsor. La corriente de aire es separada en pequeñas burbujas que ascienden a través de la pulpa hacia la superficie, recolectando partículas de la zona de colección hacia la fase espuma (Finch & Wills, 2015).

“Las pruebas *batch* son bastante sencillas en la práctica. Aun así, es necesario realizar ciertas acotaciones sobre su ejecución:

- La recuperación de espuma es sensible a la técnica empleada por el operador.
- La mayoría de las operaciones industriales de flotación incluyen al menos una etapa de limpieza, en la cual la espuma es flotada nuevamente para aumentar la concentración del metal de interés, mientras que el relave producido es recirculado. Dado que los relaves de la etapa de limpieza no son recirculados en pruebas *batch*, no siempre se acercan a lo que ocurre en plantas industriales de procesamiento. Si la etapa de limpieza es crítica, pruebas en ciclo deben ser llevadas a cabo. Éstas consisten en pruebas de flotación con varias etapas diseñadas para medir el efecto del material recirculado. Los principales objetivos de los test en ciclo son determinar:
  - El impacto en la recuperación producto de la recirculación de relaves de etapas de limpieza.
  - La variación en la condición de reactivos para compensar la carga circulante de ellos.
  - El efecto del aumento de estéril u otros agentes no deseados que podrían interferir en la flotación.
  - Los problemas de manejo de espuma.
- Normalmente al menos seis ciclos son necesarios antes de que el circuito alcance el equilibrio y sea posible realizar un balance de masa completo en cada uno de ellos. En vista de que los reactivos son agregados en solución, es esencial que el agua, al igual que el sólido, recircule, por lo que toda agua usada para ajustar la densidad de pulpa debe ser recuperada a partir de etapas de decantación o filtración. Las pruebas en ciclo requieren de mucho trabajo para ser ejecutadas y usualmente fallan en alcanzar el estado estacionario” (Finch & Wills, 2015).

#### **2.4.1 Test de Ciclo**

“La mayoría de las operaciones industriales de flotación están compuestas por más de una etapa de procesamiento. Con esto se asegura una ley y recuperación adecuadas. Las distintas etapas de flotación usualmente incluyen recirculación de algunas corrientes para ser re-tratadas.

Cuando se tienen varias etapas de flotación, se realizan pruebas de ciclo para simular en laboratorio la operación continua de la planta a partir de pruebas discontinuas (*batch*). Existen dos tipos de pruebas conocidas como test de ciclo” (Kracht G., 2011).

##### **Test de ciclo abierto (TCA)**

“Se realiza para estudiar etapas interconectadas de flotación sin recirculación. Es relativamente sencillo de realizar ya que considera solo un ciclo.

El agua de procesos en cada etapa debe recuperarse para ser utilizada en la etapa siguiente. De este modo se asegura tener las condiciones químicas adecuadas y representativas de la situación real” (Kracht G., 2011).

## Test de ciclo cerrado (TCC)

“Se realiza para estudiar etapas interconectadas de flotación con recirculación. Es más laborioso que el test de ciclo abierto pues se compone de varios ciclos” (Kracht G., 2011).

Un test de ciclo cerrado es un conjunto de pruebas repetitivas de flotación *batch* realizadas en laboratorio, que simulan de manera experimental un circuito de procesamiento continuo. Cada test está compuesto de ciclos interconectados de manera tal que los productos intermedios generados en cada uno de ellos son recirculados como alimentación al ciclo siguiente.

“Una prueba de flotación de ciclo cerrado es usualmente efectuada al final de un programa de pruebas de flotación de laboratorio y tiene como objetivo principal evaluar qué tan efectivas son las condiciones de flotación obtenidas en la etapa de pruebas de ciclo abierto.

Para efectuar la prueba de ciclo cerrado se debe determinar el número de etapas o ciclos de carga fresca que ingresará al circuito de flotación. Usualmente, se toma como referencia seis ciclos.

El primer ciclo se realiza en base a los parámetros o condiciones determinadas a partir de pruebas de flotación preliminares que hayan obtenido los mejores resultados” (Michaud, 2015).

En particular, para la ejecución de un test de ciclo cerrado en laboratorio, las variables más relevantes a considerar se listan a continuación.

- I. Condiciones Electroquímicas
  - a. Composición del agua
  - b. Mineralogía de la alimentación
  - c. pH natural de pulpa
  - d. Adición, consumo y tipo de reactivos
  - e. Potencial de pulpa (ORP)
  
- II. Condiciones Hidrodinámicas
  - a. Velocidad de agitación (RPM)
  - b. Densidad de pulpa o contenido de sólidos (Cp)
  - c. Flujo de aire
  
- III. Condiciones de Operación
  - a. Tiempo de residencia en celdas de flotación
  - b. Tiempo de acondicionamiento y aireación
  - c. Tiempo de molienda y remolienda
  - d. Diseño de celda
  
- IV. Circuito de procesamiento
  - a. Número de etapas de separación y configuración en diagrama de flujos

“Las pruebas de ciclo cerrado se realizan por dos motivos principales:

- Para evaluar si el diseño del diagrama de flujo y el conjunto de reactivos de flotación son estables.
- Para producir una proyección metalúrgica para la muestra probada.

Las pruebas y ensayos de ciclo cerrado son el método preferido para llegar a una proyección metalúrgica dado que los ciclos finales de la prueba se diseñan para simular un circuito de flotación estable que se aproxime al procesamiento en continuo” (SGS.cl, 2018).

“Se dice que un test de ciclo cerrado puede proveer tanta información como lo hace una prueba en continuo a mayor escala, además de ahorrar costos, cantidad de muestra a ensayar y esfuerzo necesario para llevar a cabo la prueba en continuo” (Nishimura, Hirotsuke, & Jinnai, 1989).

A partir de la ejecución de una prueba, se generarán productos intermedios y finales. Los productos intermedios son comúnmente relaves de alguna etapa de limpieza o concentrados impuros que deben recircularse a una etapa particular del ciclo siguiente hasta finalizar el test.

Los productos finales se someten a operaciones de separación sólido – líquido y secado, hasta obtener los pesos secos que permitan calcular el balance de masa. Se deben generar igual número de relaves y concentrados que el número de ciclos realizados.

La generación de productos intermedios y finales es un proceso iterativo que debe seguirse desde el primer ciclo hasta el último. Los productos intermedios del último ciclo se someten a operación de filtrado y secado, y los pesos se usan para cerrar el balance de masa. Los productos finales e intermedios se pesan y una fracción de cada uno se envía a los laboratorios correspondientes para su eventual análisis (Michaud, 2015).

## **2.5 Balance de masa ciclo a ciclo**

“Consiste en una técnica de cálculo bastante sencilla que funciona bajo el supuesto de que la alimentación a cada ciclo debe ser la misma en peso y deben ser muestras verdaderas, es decir, deben ser idénticas en composición mineral. Bajo condiciones comunes de laboratorio esto no es una restricción muy severa; de hecho, corresponde a un procedimiento estándar de cualquier laboratorio. La única limitación sería que las muestras hayan sido tomadas desde un circuito operativo, caso en el que deben tomarse consideraciones especiales que aseguren que las muestras húmedas poseen la misma concentración de sólidos.

El procedimiento inicia con una reconstrucción del material alimentado al proceso, lo cual se calcula a partir de una combinación de los productos generados en el test. De esta suma, es posible determinar la alimentación promedio por ciclo, lo cual será la base para el cálculo del balance ciclo a ciclo; he ahí la importancia de que las muestras alimentadas sean similares. Una vez calculada la alimentación promedio para cada ciclo, la distribución del material en el primer ciclo es determinada a partir de la suma de los productos y el material restante es considerado como corriente recirculada. En todos los ciclos siguientes el cálculo es el mismo: la alimentación al ciclo es la suma de la alimentación fresca junto con lo recirculado del ciclo anterior. Al igual que en el primer ciclo la suma de los productos de salida del ciclo respectivo corresponde a la base para el cálculo de la distribución, siendo el material restante aquél que es recirculado al ciclo siguiente. El cálculo iterativo se realiza para todo el test hasta el último ciclo. Dado que la corriente recirculada del último ciclo sí es analizada, es posible chequearlo. Si no se han cometido errores aritméticos durante el cálculo del balance, la carga circulante del último ciclo será igual a la masa remanente del balance.

Este cálculo del balance de material ciclo a ciclo permite examinar la aproximación al estado estacionario al graficar la producción para cada ciclo. Obviamente, en el primer ciclo una parte del material es reportado a la corriente recirculada, por lo que la producción respecto al material

alimentado será menor al cien por ciento. A medida que el test avanza las corrientes recirculadas alcanza un valor estable y la suma de los productos de cada ciclo se aproximan cada vez más a cien por ciento respecto a la alimentación. Un gráfico con la distribución de la suma de los productos de salida de cada ciclo es uno de los medios por el cual es posible examinar la aproximación del test al estado estacionario. Una medida incluso más sensible de la aproximación al estacionario es entregada por las corrientes recirculadas. Un simple gráfico del peso de las corrientes recirculadas producidas a lo largo del test determinará si éste ha alcanzado el estado estacionario o no” (Agar, 2000).

De los métodos existentes para el cálculo del balance de masa de un test de ciclo cerrado, se considera como el más apropiado aquél descrito anteriormente. Balance ciclo a ciclo entrega la posibilidad de calcular el material recirculado en cada ciclo y con ello, qué tanto se aproxima el test al estado estacionario, condición necesaria para que los resultados sean considerados válidos y puedan ser proyectados a una operación en continuo.

A partir de este balance, es posible determinar la recuperación en peso de las etapas involucradas, con particular interés en la recuperación obtenida en las etapas *rougher*, el circuito *cleaner* y la recuperación global. Esta información es contrastada con las condiciones de operación utilizadas en el test, pues a ellas se atribuyen los resultados obtenidos en él.

## 2.6 Reconciliación de datos experimentales

La reconciliación de datos corresponde al ajuste de datos experimentales, sujeto a que se cumplan las restricciones impuestas por las ecuaciones de balance de masa, y que los datos reconciliados sean tan cercanos como sea posible a los datos medidos (Narasinhham & Jordache, 2000).

El objetivo de ello es generar una base de datos estadísticamente más confiable, que sustente el balance metalúrgico y represente al proceso.

En la literatura (Incorporating the covariance effect in modelling batch flotation kinetics, 2018), tres metodologías para estimación no lineal de parámetros son comparadas: (1) estimación generalizada no lineal de mínimos cuadrados (NLGLSE), (2) estimación ponderada de mínimos cuadrados (WLSE) y (3) estimación no ponderada de mínimos cuadrados (ULSE). La diferencia principal es la función objetivo a minimizar, que se muestra a continuación para cada uno de los métodos mencionados.

$$\min \sum_{i=1}^n (Y_{med,i} - Y_{mod})^T V^{-1} (Y_{med,i} - Y_{mod}) \quad (1)$$

$$\min \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{med,i} - Y_{mod})^2}{S_{Y_{med}}^2} \quad (2)$$

$$\min \sum_{i=1}^n (Y_{med,i} - Y_{mod})^2 \quad (3)$$

En las ecuaciones,  $Y_{med}$  corresponde al vector de datos medidos,  $Y_{mod}$  al vector de datos modelados. Para la Ecuación 1,  $V$  es la matriz de covarianzas traspuesta, la cual se asume conocida y constante.

Mínimos cuadrados ponderados (Ecuación 2) es un caso particular de la Ecuación 1 y considera independencia estadística entre las variables medidas. Para este caso, la matriz  $V$  es diagonal y la ecuación 1 es equivalente a la ecuación 2. En esta última,  $S_{Y_{med}}^2$  corresponde a la varianza de las muestras y su respectivo ponderador. Ambas metodologías requieren de réplicas experimentales o estimaciones previas de la varianza de cada medición.

Se utiliza la metodología de mínimos cuadrados no ponderados (Ecuación 3) cuando las variables son estadísticamente independientes y presentan homocedasticidad, es decir, el error cometido por el modelo tiene siempre la misma varianza ( $S_{Y_{med}}^2$  constante). Esta aproximación ha sido ampliamente utilizada y discutida en la literatura para ajustar resultados de flotación batch, principalmente en la ausencia de replicados.

En la publicación, se comenta el caso de estudio en que 3 pruebas fueron realizadas, cuyos resultados fueron procesados y ajustados a través de las 3 metodologías ya descritas. Cantidad suficiente de replicados fueron ensayadas con la finalidad de estimar de manera precisa la varianza/covarianza asociada a las mediciones. De ello, se concluye que NLGLSE llevó a una mejora considerable en la precisión del modelo, respecto a las metodologías ULSE y WLSE.

La diferencia en la precisión obtenida al comparar las diferentes metodologías se atribuye principalmente a los supuestos realizados en cada modelo. Independencia estadística y homocedasticidad son condiciones que difícilmente se alcanzan en pruebas de flotación.

El uso de mínimos cuadrados generalizados no lineales requiere de una estimación precisa de covarianzas, lo cual es típicamente obtenido con un número suficiente de pruebas replicadas.

## 2.7 Proyección metalúrgica – Métodos de cálculo

Una vez que un test ha aprobado los criterios metalúrgicos establecidos es considerado como un test válido. En este escenario, los resultados obtenidos a partir de él son utilizados para realizar la proyección metalúrgica a partir de los ciclos en estado estacionario, pues corresponden a los que mejor representan lo que se esperaría en una operación continua de flotación de minerales.

Existen diversas metodologías para proyectar los resultados obtenidos (Ounpuu, 2001-15).

- *N-product* (Fórmula de n-productos)
- *SME* (Procedimiento SME)
- *Concentrate Production* (Balance por producción de concentrado)

Es importante destacar que ninguno de ellos es recomendado para realizar la proyección en base a resultados de un test que no ha alcanzado el estado estacionario. Ahora bien, si el test logra la estabilidad y conservación de masa, cualquiera de ellos generará la misma proyección metalúrgica.

A continuación, una breve descripción de los métodos mencionados.

### **2.7.1 N-product**

Consiste en un balance de masa sencillo que utiliza las leyes de los productos finales para el cálculo. Para el caso en que se tiene sólo un concentrado y un relave, el procedimiento indica que deben usarse las leyes respectivas de dichas corrientes, junto a la ley de alimentación a través de la siguiente fórmula.

$$\text{Masa de Concentrado} = \text{Masa de Alimentación} * \frac{(\text{Ley}_{\text{alimentación}} - \text{Ley}_{\text{relave}})}{(\text{Ley}_{\text{concentrado}} - \text{Ley}_{\text{relave}})} \quad (4)$$

Para el caso de un test de ciclo cerrado, el cálculo se realiza en base a los resultados obtenidos en los últimos 2 a 4 ciclos (en estado estacionario). Es requisito importante para el uso de esta técnica que el circuito alcance la conservación de masa (Masa de entrada = Masa de salida), puesto que en caso contrario, el cálculo realizado entregará resultados erróneos.

### **2.7.2 SME**

Este procedimiento es más directo y fácil de aplicar que el anterior. Considerando un mineral simple separado en un concentrado y un relave, tanto la masa como la ley de ambos son proyectadas como el promedio de ellos producido en los últimos ciclos del test. La alimentación del test será entonces calculada como la suma de ambos productos. Este procedimiento funciona bien siempre que el test haya alcanzado el estado estacionario. En caso contrario, entregará resultados erróneos, puesto que no considera el mineral que no se reporta en los productos finales.

### **2.7.3 Concentrate Production**

Este procedimiento es una variación del anterior, por lo que el peso y la ley de concentrado son proyectadas de la misma manera, como el promedio de los últimos ciclos. El relave, entonces, es calculado como la diferencia entre la alimentación y el concentrado. Una ventaja de este procedimiento es que si el test no alcanza la conservación de masa, los parámetros metalúrgicos no son sobreestimados. La premisa para este procedimiento es que el concentrado producido se compone sólo del material reportado a él, mientras que todo lo demás será considerado como parte del relave.

## **2.8 Estado Estacionario: Estabilidad y Conservación de masa**

Una vez calculado el balance es posible determinar para cada ciclo la razón entre la cantidad de mineral contenida en los productos y la cantidad de mineral alimentada. De esta forma, se espera que para los últimos ciclos del test esta diferencia converja a cero. Puede observarse la convergencia del test a través de gráficos de distribución de material en los productos respecto a la alimentación para cada ciclo. Un claro ejemplo de un test cuya convergencia es deficiente se muestra a continuación.

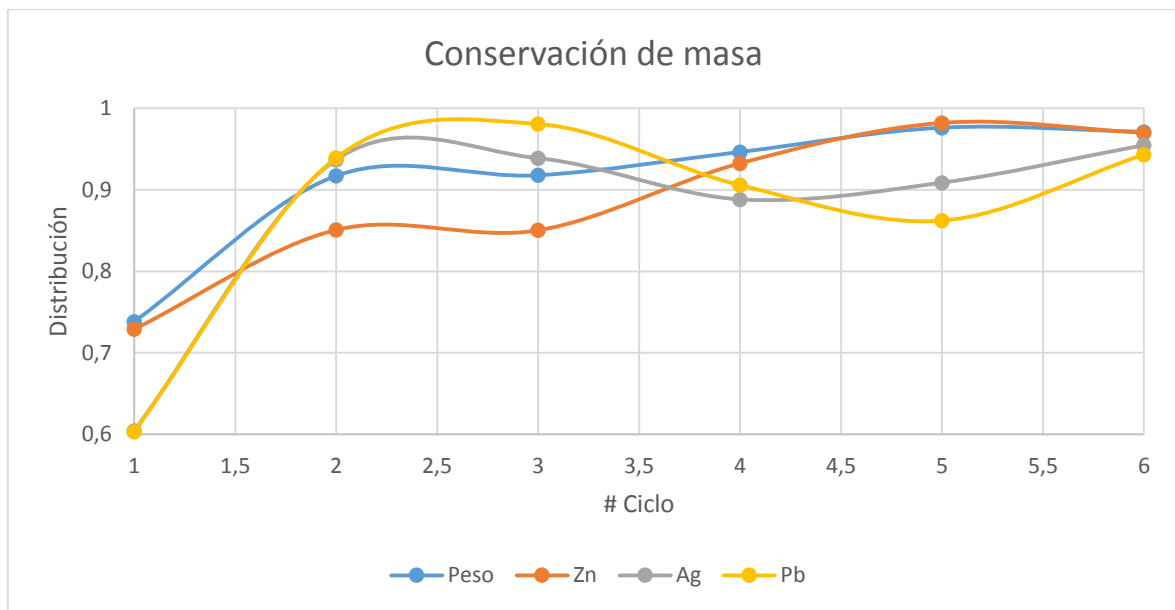


Figura 2. Aproximación a la conservación de masa para resultados de Test de Ciclo Cerrado. Adaptado de (Agar, 2000)

En ella, se muestra la distribución de material reportado en los productos de cada ciclo para pruebas realizadas por Coleman, usada en la publicación de Agar G. E. (Calculation of Locked Cycle Flotation Test Results, 2000) como ejemplo de un test que no alcanza el estado estacionario.

Cabe destacar que al tratarse de pruebas de ciclo cerrado, existen corrientes que son recirculadas al ciclo posterior respectivo. Estos flujos recirculados pueden ser determinados a partir del balance de masa realizado para cada ciclo y no deben ser considerados como productos para verificar la convergencia del test. En su publicación, Agar G. E. da cuenta de que aquellos test con aumento en las recirculaciones difícilmente alcanzan la estabilidad de masa, por lo que se considera que presentarán un comportamiento deficiente en plantas de procesamiento.

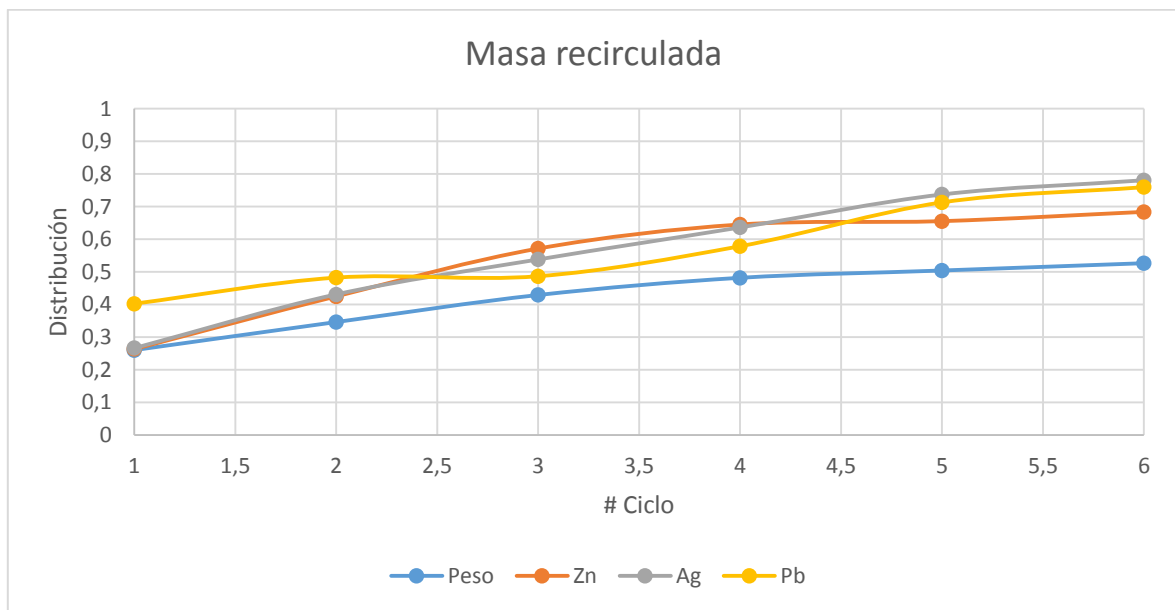


Figura 3. Corriente recirculada en test de ciclo cerrado que no alcanza el estado estacionario. Adaptado de (Agar, 2000)



Se muestra en la figura que la masa recirculada aumenta a medida que avanzan los ciclos, razón por la cual el test no alcanza el estado estacionario. Este comportamiento comúnmente se atribuye a problemas en el diseño del circuito o a dosificación deficiente de reactivos. Es poco recomendable llevarlo a operación industrial, pues se espera que su procesamiento sea inestable (Agar, 2000).

Además de la conservación de masa, para que un test se considere en estado estacionario, la masa de material y la concentración de los elementos de interés en ellas contenidas deben ser similares en los últimos ciclos. Cuando ambas condiciones se cumplen, es posible afirmar que el test alcanzó el estado estacionario y su resultado puede ser usado para realizar proyecciones metalúrgicas.

Un claro ejemplo en que un test alcanzó el estado estacionario se muestra en la nota técnica de SGS, “Was that locked cycle test any good?” (Ounpuu, 2001-15).

Tabla 1. Estabilidad y Conservación de masa. Convergencia del Test de Ciclo Cerrado. (Ounpuu, 2001-15).

<b>Ciclo</b>	<b>Peso</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>
<b>A</b>	76,5	66,8	88	77,9
<b>B</b>	94,8	98,5	90,3	94,8
<b>C</b>	100,1	100,6	98,2	99,9
<b>D</b>	100,6	99,9	100,7	100,7
<b>E</b>	102,2	103,7	101,6	102,7
<b>F</b>	100	100,4	100,2	100,7
<b>G</b>	100,1	99,5	99,3	99,8
<b>H</b>	101,6	101,9	102,5	101,8
<b>I</b>	96,8	99,8	93,9	95,4
<b>Promedio E-I</b>	<b>100,1</b>	<b>101,1</b>	<b>99,5</b>	<b>100,1</b>

En él, se recomienda construir una tabla como la anterior para determinar si el test alcanza o no la estabilidad. En ella se muestra la razón de masa entre el flujo de salida y de entrada para cada ciclo y para cada metal de interés contenidos en la muestra, calculada a partir de los resultados y del balance de masa ciclo a ciclo, utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Conservación de masa ciclo a ciclo}[\%] = \frac{\Sigma \text{Masa productos del ciclo}}{\text{Masa alimentada al ciclo}} * 100 \quad (5)$$

En la ecuación, se entiende por productos del ciclo aquellos productos finales, es decir, relave rougher, concentrado de limpieza y relave scavenger, sin considerar aquéllos que son recirculados.

No sólo es necesario revisar si un test alcanza la estabilidad de masa, también debe ser estable al estudiar el flujo de los metales contenidos en ella. Para el cálculo de conservación de masa por metal se utiliza la misma fórmula, sólo que en lugar de masa mineral se utiliza la masa de fino o metal valioso determinada a partir de las leyes medidas.

Es claro en el ejemplo de la tabla 1 que se trata de un test estable, pues para los últimos ciclos el valor promedio es bastante cercano al 100%.

Una vez se valida el test, es posible realizar la proyección metalúrgica en base al promedio de los últimos ciclos, los cuales han alcanzado la estabilidad. Se entregan 3 metodologías para realizar la

proyección metalúrgica de los resultados, pero se afirma que ninguna de ellas será válida si el test no ha alcanzado el estado estacionario (Ounpuu, 2001-15).

Que un test alcance al 100% la estabilidad puede ser difícil, por lo que es necesario definir cuándo un test será o no considerado en estado estacionario. En la publicación de SGS, Ounpuu M. propone que los buenos test alcanzan el 100% en términos de conservación de masa y  $100\% \pm 2\%$  para metales. Todo test que esté a  $\pm 5\%$  del 100% será considerado lejos del estado estacionario y sus resultados deberán ser revisados. Aquellos test por sobre  $\pm 10\%$  debe ser repetido o rechazado.

Es necesario acotar que en ambas publicaciones se comenta que el número de iteraciones que componen un test son cruciales para alcanzar la convergencia. Muchos test podrían alcanzar el estado estacionario si el número de iteraciones fuese mayor. De la misma forma, existen casos en que el test no alcanzará nunca el estado estacionario, aun cuando el número de iteraciones aumente.

## **2.9 Split Factors: Simulación de resultados de TCC**

Una manera de predecir los resultados de un test de ciclo cerrado es realizar un modelamiento numérico del diagrama de flujos a través de Split Factors obtenidos a partir de un test de ciclo abierto, para luego contrastar con los resultados obtenidos en el test de ciclo cerrado experimental.

Por definición, Split Factor corresponde a la proporción de mineral contenida en la celda que no fue recuperada durante el tiempo de flotación establecido, para cada etapa del circuito. Es por ello que el Split factor puede ser definido también como la recuperación obtenida en cada etapa de concentración, pues se trata de un valor que busca caracterizar el comportamiento de la etapa de separación de mineral.

Si el circuito es bien definido, el modelo puede ser utilizado como base de comparación para resultados experimentales. Algunos ejemplos se muestran en la publicación de Agar G. E. (Calculation of Locked Cycle Flotation Test Results, 2000). De ellos, el autor concluye que modelar el proceso a través de Split Factor logra aproximaciones bastante cercanas a los datos experimentales obtenidos en las pruebas de flotación. Además, propone una metodología que considera Split Factors secundario, en busca de una aproximación que se acerque más a la realidad, pues considera que los flujos recirculados en un test de ciclo cerrado no serán clasificados o separados de la misma manera que la alimentación fresca en la etapa siguiente. El autor muestra a través de los modelos realizados para diferentes esquemas, que aquellas aproximaciones realizadas solo con Split Factor primario se acercan más a los valores medidos, por lo que se asume que el modelo es más preciso que si se consideraran los valores calculados de Split factor secundarios.

## 3 Antecedentes

### 3.1 Caracterización de muestras

Una vez finaliza un test de ciclo cerrado los productos son filtrados, secados, pesados y enviados al laboratorio correspondiente, donde son caracterizados a través de diversas técnicas de análisis químico que buscan determinar la composición mineral y elemental en cada uno de ellos. Esto, en vista de que es de suma importancia saber cómo se comportan los minerales dentro del proceso de separación de especies, en particular, la de interés económico que se desea concentrar. Para ello, se realizan también pruebas de caracterización a las muestras de cabeza (alimentación). Estos datos son fundamentales para caracterizar el proceso a través del cálculo de variables operacionales que dan cuenta de su desempeño.

El laboratorio químico de análisis y caracterización de muestras cuenta con diversas técnicas de análisis. A continuación se listan aquellas que fueron utilizadas para analizar el contenido de cada metal en los productos del test.

Tabla 2. Técnicas de análisis utilizadas para medición de leyes.

<b>Analito</b>	Técnica de análisis	Código
<b>Cobre</b>	Absorción Atómica	AAS023D
	Volumetría	CON013V
<b>Hierro</b>	Absorción Atómica	AAS022D
<b>Molibdeno</b>	Absorción Atómica	AAS023D

En el caso del cobre, la técnica de análisis a emplear depende de la ley de cobre contenida en la muestra mineral. En particular, se utiliza AAS023D para leyes de cobre menores a 5%, mientras que para valores mayores, CON013V. Para hierro y molibdeno, la técnica de análisis utilizada en la campaña metalúrgica en estudio es absorción atómica en todo el espectro de leyes.

### 3.2 Procesamiento de resultados

El circuito de flotación utilizado en Test de Ciclo Cerrado en SGS se compone de 6 ciclos. Cada uno de ellos inicia con una etapa de flotación *rougher*, a la cual se alimenta el producto de la etapa de molienda. El concentrado *rougher* pasa por una etapa de remolienda y luego ser alimentado al circuito *cleaner*, mientras que el relave es enviado a preparación y caracterización de muestras. El circuito *cleaner* se compone de dos etapas de limpieza y una de barrido o *scavenger*. El producto de la remolienda se alimenta a la primera limpieza. Sus productos, concentrado y relave, constituyen la alimentación de la segunda limpieza y de la etapa *scavenger*, respectivamente. De ellas se obtienen cuatro productos: concentrado *cleaner* o final y relave *scavenger* corresponden a productos terminales enviados a caracterización de muestras; relave *cleaner* y concentrado *scavenger* constituyen productos intermedios que son recirculados como alimentación al ciclo siguiente. El circuito utilizado en las pruebas de flotación a ciclo cerrado posee entonces la siguiente configuración.

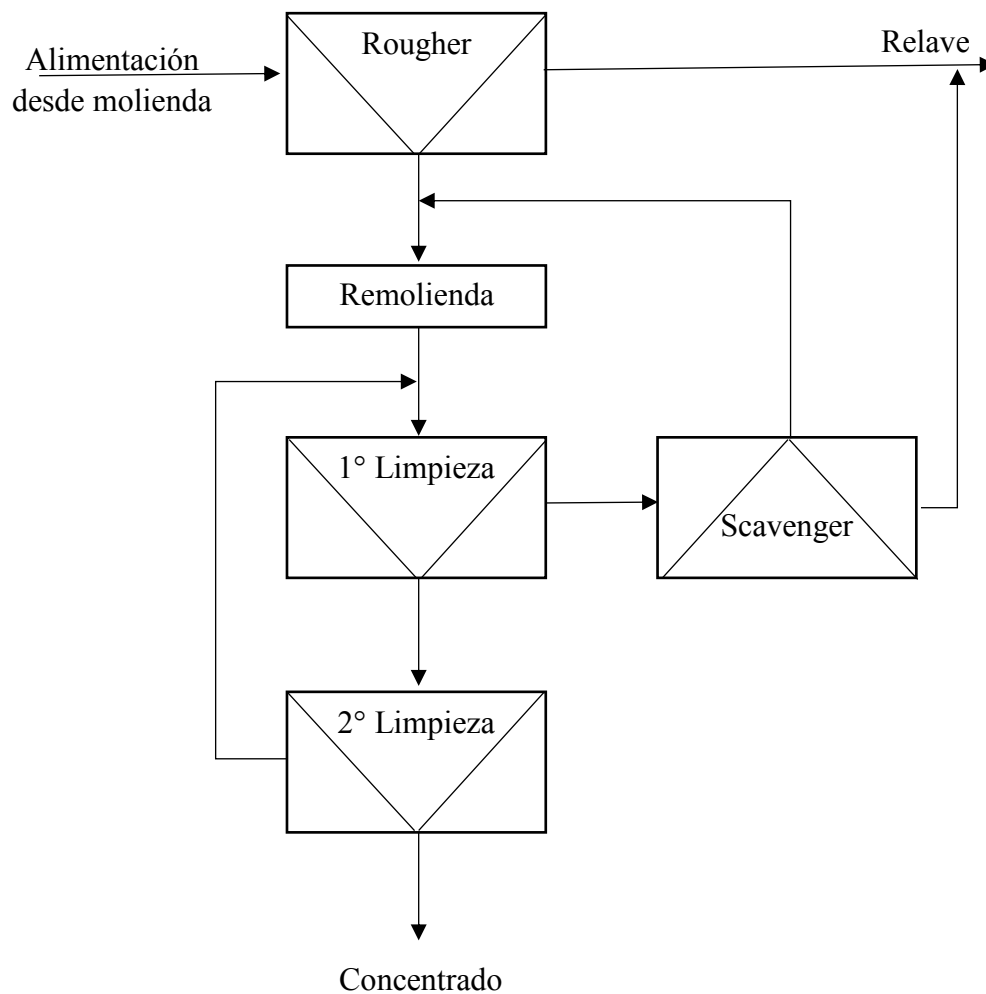


Figura 4. Diagrama del circuito de flotación utilizado en Test de Ciclo Cerrado.

Una vez ejecutado el test y caracterizados los productos finales, se reportan las masas y leyes de los productos listados a continuación.

Tabla 3. Cantidad de muestras por producto obtenidas en un Test de Ciclo Cerrado.

Producto	Cantidad de muestras
Alimentación	1
Relave rougher	6
Concentrado final	6
Relave scavenger	6
Concentrado scavenger	1
Relave cleaner	1

Dado el circuito, se desprenden de él las ecuaciones de balance de masa en función de las mediciones conocidas, en las cuales  $i$  representa el número del ciclo correspondiente.

$$\text{Alimentación Rougher}_i [g] = \text{Relave Rougher}_i [g] + \text{Concentrado Rougher}_i [g] \quad (6)$$

De ella, es posible calcular la masa del concentrado rougher al ser conocidas las masas y leyes de alimentación y de relave rougher.

Para  $i = 1$

$$\text{Alimentación Circuito Cleaner}_i [g] = \text{Concentrado Rougher}_i [g] \quad (7)$$

Para  $i > 1$

$$\text{Alimentación Circuito Cleaner}_i [g] = \text{Concentrado Rougher}_i [g] + \text{Recirculaciones}_{i-1} \quad (8)$$

El cálculo de los productos recirculados se realiza a través de la siguiente ecuación de balance.

$$\text{Recirculaciones}_i [g] = \text{Alim. Cleaner}_i [g] - \text{Concentrado Scavenger}_i [g] - \text{Relave Cleaner}_i [g] \quad (9)$$

De ellas, se desprenden también las ecuaciones para el cálculo de recuperación por etapa.

$$\text{Recuperación Rougher} [\%] = \frac{\text{Concentrado Rougher} [g]}{\text{Alimentación Rougher} [g]} * 100 \quad (10)$$

$$\text{Recuperación Global} [\%] = \frac{\text{Concentrado Final} [g]}{\text{Alimentación Rougher} [g]} * 100 \quad (11)$$

$$\text{Recuperación Circuito Cleaner} [\%] = \frac{\text{Concentrado Final} [\%]}{\text{Concentrado Rougher} [\%]} * 100 \quad (12)$$

O bien

$$\text{Recuperación Circuito Cleaner} [\%] = \frac{\text{Recuperación Global} [\%]}{\text{Recuperación Rougher} [\%]} * 100 \quad (13)$$

El balance de masa de cada test es efectuado a través de una planilla de cálculos en Excel mediante la metodología de balance ciclo a ciclo y las ecuaciones listadas anteriormente, mientras que la proyección metalúrgica de resultados se determina a través de la metodología *n-product*, ambas detalladas las secciones 2.5 y 2.7 respectivamente.

### 3.3 Criterios de validación

#### 3.3.1 Error ley cabeza

Para cada test, previo a su ejecución, es necesario realizar una caracterización de cabeza a las muestras que serán ensayadas con la finalidad de disponer de información referente a la composición y concentración de metales en ellas contenidas. Una vez ejecutado el test, los productos obtenidos a partir de él son analizados mediante las técnicas de caracterización correspondientes. Gracias a ello, es posible calcular nuevamente la composición mineral del material procesado. No es de extrañar que en ocasiones el análisis hecho antes de la prueba sea diferente de aquél recompuesto en base a los productos obtenidos. En particular, el análisis se hace para las leyes de los metales de interés (o simplemente aquellos elementos que fueron analizados), por lo que se establecen criterios a partir de la estrategia adoptada por expertos.

Se define el error de ley de cabeza como la diferencia relativa entre la ley de cabeza medida y la calculada, según la siguiente ecuación.

$$\text{Error ley de cabeza [\%]} = \frac{(\text{Ley medida} - \text{Ley calculada})}{\text{Ley medida}} * 100 \quad (14)$$

Según prácticas operacionales actuales, se espera que el error no supere el 5%, pero al tratarse de un error relativo a la ley medida, para leyes muy bajas el error puede alcanzar valores mayores a 5% con facilidad.

#### 3.3.2 Estado Estacionario: Estabilidad y conservación de masa

Se desconoce un criterio pertinente que permita validar los resultados de Test de Ciclo Cerrado desde la estabilidad y conservación de masa, aun cuando se tiene como referencia el criterio propuesto en la nota técnica de SGS (Ounpuu, 2001-15). En ella, el autor propone que los buenos test alcanzan el 100% en términos de conservación de masa y  $100\% \pm 2\%$  para metales. Todo test que esté a  $\pm 5\%$  del 100% será considerado lejos del estado estacionario y sus resultados deberán ser revisados. Aquellos test por sobre  $\pm 10\%$  debe ser repetido o rechazado.

#### 3.3.3 Pérdida de masa

Se considera dentro de los criterios metalúrgicos de validación la pérdida de masa asociada a la ejecución del test, cuya causa se atribuye a la manipulación de las muestras durante su desarrollo. Medida en porcentaje, los valores son establecidos en base a prácticas operacionales. En vista de ello, pérdidas de hasta un 3% se consideran de bajo impacto en los resultados finales del test. Este criterio no es considerado en el análisis de resultados de esta investigación.

## 4 Metodología

El presente capítulo entrega la metodología utilizada en el procesamiento y análisis de resultados de Test de Ciclo Cerrado.

### 4.1 Balance de masa

El cálculo del balance de masa para cada test se lleva a cabo en el software Excel, según la metodología de Balance ciclo a ciclo descrita en la sección 2.5. En ella, tanto la masa alimentada al circuito como su respectiva ley son calculadas como una suma de los productos obtenidos en el test. En este escenario, el balance de masa cierra para todos los metales. En paralelo, se realiza el cálculo del balance de masa considerando como ley de alimentación la ley de cabeza medida, escenario en el cual los balances no cierran.

### 4.2 Reconciliación de datos

La metodología de reconciliación de datos experimentales descrita en la sección 4.5 utilizada es la de mínimos cuadrados ponderados (WLSE) y se lleva a cabo mediante la herramienta de optimización de Excel, SOLVER.

La metodología se aplica a las leyes de metales medidas en los productos del test (por lo general, cobre, hierro y molibdeno).

El laboratorio químico de la empresa cuenta con modelos de error para cada una de las metodologías empleadas, listadas en la tabla 2. De ellos, se tomaron datos y se realizó un ajuste de la curva obtenida gráficamente.

Se entregan a continuación los modelos utilizados para cada metal en la reconciliación de resultados experimentales de TCC.

#### 4.2.1 Modelo de error

##### Cobre

Si la ley del producto es menor a 5%:

$$\text{Error asociado [\%]} = 0,1259 * [\text{Ley en el producto}]^{-0,994} + 5 \quad (15)$$

Si la ley del producto es mayor que 5%, la muestra es analizada a través de CON013V, para el cual se realizó un ajuste en dos intervalos:

- $5\% < [\text{Ley muestra}] < 15\%$

$$\text{Error asociado [\%]} = 5,4541 * [\text{Ley en el producto}]^{-0,634} \quad (16)$$

- $15\% \leq [\text{Ley muestra}]$

$$\text{Error asociado [\%]} = 2,8008 * [\text{Ley en el producto}]^{-0,385} \quad (17)$$

## Hierro

$$\text{Error asociado [\%]} = 5,1583 * [\text{Ley en el producto}]^{-1,021} + 6 \quad (18)$$

## Molibdeno

$$\text{Error asociado [\%]} = 0,1231 * [\text{Ley en el producto}]^{-1,003} + 5 \quad (19)$$

Los modelos fueron empleados para determinar la desviación estándar asociada a cada medición, necesaria para la reconciliación de datos experimentales a través de estimación ponderada de mínimos cuadrados (Ecuación 2). Los gráficos correspondientes a cada modelo de error se encuentran en la sección Anexo.

Una vez definidos los modelos de error a utilizar, se lleva a cabo el problema de optimización cuya restricción de balance está dada por las ecuaciones en la sección 3.2, que entrega las leyes reconciliadas que cumplen con la restricción de balance de masa considerando como ley de alimentación la ley medida.

Se calcula el error relativo y la raíz del error cuadrático medio entre ley medida y ley reconciliada de cada corriente o producto. Se realiza la proyección metalúrgica de resultados en base a las leyes reconciliadas y las masas medidas. Se calcula el error absoluto entre las proyecciones metalúrgicas del circuito generadas con las leyes medidas y con las leyes reconciliadas.

### 4.3 Proyección metalúrgica

Se utilizan las metodologías disponibles para el cálculo de proyecciones: *N-product*, *SME* y *Concentrate Production*, descritas en la sección 2.7. Se determinan la recuperación del circuito y la ley de concentrado final.

Para la proyección metalúrgica de la etapa *rougher*, se consideran los 6 ciclos del test, pues son independientes y no debiesen variar significativamente entre ciclos. Por otra parte, para la proyección del circuito de limpieza y del circuito global, solo se consideran los últimos 3 ciclos del test que presuntamente han alcanzado el estado estacionario.

Para evaluar el efecto de la conservación de masa en la validez de la proyección realizada, se crean gráficos con la diferencia entre las proyecciones metalúrgicas generadas a partir de las 3 metodologías.

Se realizan proyecciones metalúrgicas a partir de las leyes reconciliadas para comparar con aquéllas realizadas en base a las leyes medidas. De esta forma, se evalúa la diferencia que el error relativo a la ley de cabeza genera entre las proyecciones metalúrgicas.



#### **4.4 Simulación de Test de Ciclo Cerrado**

Para realizar la simulación de TCC se emplea la técnica de Split Factor descrita en la sección 2.9 y los resultados obtenidos en un Test de Ciclo Abierto ejecutado bajo condiciones operacionales establecidas.

A partir de cada TCA se obtiene el Split Factor correspondiente a cada etapa del circuito. A través de Excel se realiza la simulación de un test de ciclo cerrado mediante las ecuaciones de balance para el circuito descrito en la sección 3.2. Se considera como supuesto que el material presenta el mismo comportamiento en las etapas de todos los ciclos, es decir, la recuperación de cada etapa de separación es la misma en los distintos ciclos del circuito simulado.

Luego de realizar la simulación, se evalúa el nivel de precisión de la metodología al comparar los resultados simulados con aquéllos resultados de una prueba experimental de TCC, para una muestra de iguales características, bajo las mismas condiciones de operación. Se estudian las diferencias entre los resultados experimentales y los resultados simulados, considerando masa, leyes de productos y proyección metalúrgica.

## 5 Resultados y Análisis

Se utilizaron los resultados de 40 pruebas de test de ciclo cerrado, que fueron procesados mediante la metodología descrita en la sección anterior.

### 5.1 Balance de masa

El balance de masa se llevó a cabo considerando diferentes cantidades de masa de valioso como alimentación al circuito:

Caso 1: Masa de valioso alimentada = Ley calculada [%] \* Masa Mineral [g]. En este escenario los balances de masa no cierran.

Caso 2: Masa de valioso alimentada = Ley medida [%] \* Masa Mineral [g]. En este escenario los balances de masa no cierran.

Ambos casos presentaron balances con valores negativos en ellos. De un total de 40 pruebas, se entrega el porcentaje de aquéllas que presentaron dicha condición.

*Tabla 4. Porcentaje de pruebas con valores negativos en el balance de masa por metal.*

	<b>Balances de</b>		
	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mo</b>
<b>Ley calculada</b>	0%	30%	3%
<b>Ley medida</b>	13%	90%	48%

El número de pruebas con valores negativos en los balances se reduce considerablemente cuando la masa de metal en la alimentación se determina a partir de la ley calculada. En este escenario, todos los balances de masa cierran.

Al utilizar como alimentación la ley medida, el número de balances con valores negativos aumenta. Para entender este comportamiento, se entregan gráficos de dispersión de los errores relativos entre leyes de cabeza de los metales analizados en las 40 pruebas.

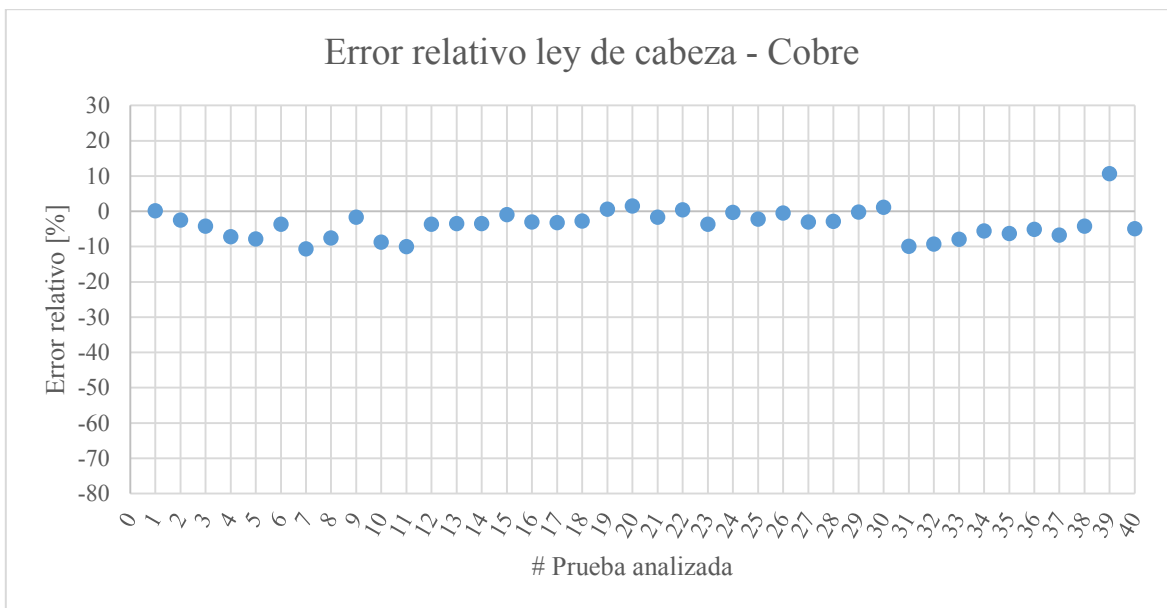


Figura 5. Error relativo entre ley de cabeza de cobre medida y calculada en las 40 pruebas analizadas.

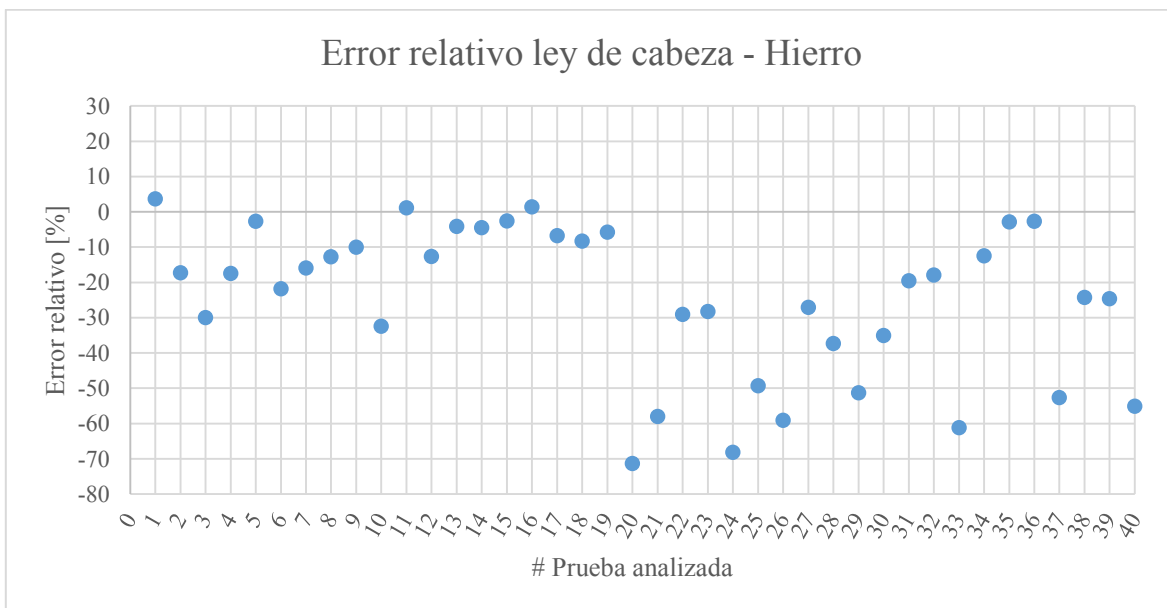


Figura 6. Error relativo entre ley de cabeza de hierro medida y calculada en las 40 pruebas analizadas.

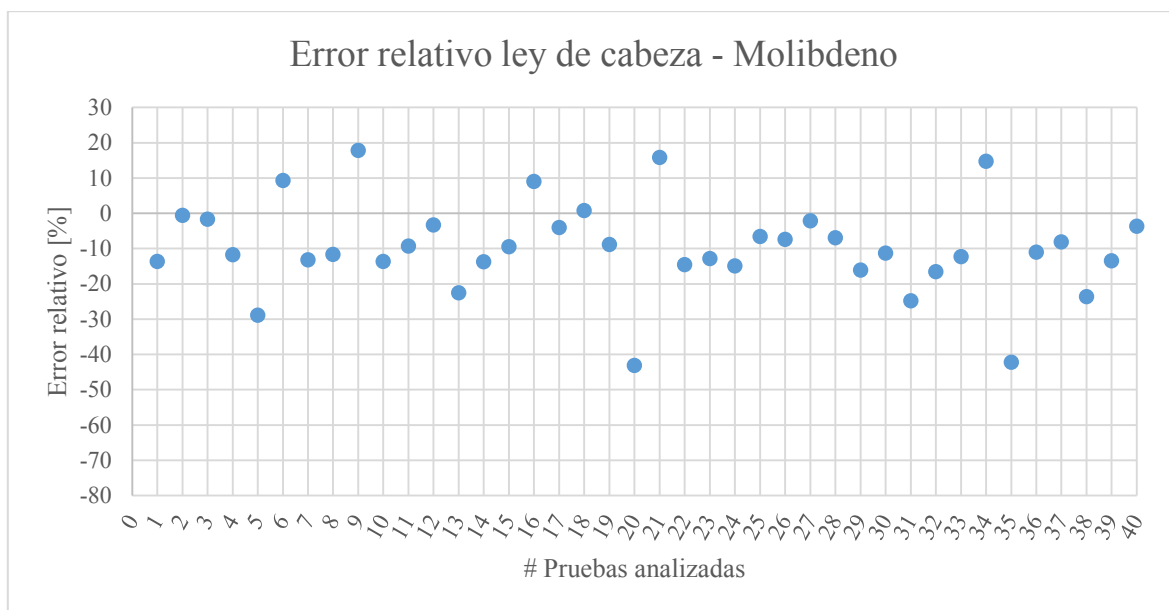


Figura 7. Error relativo entre ley de cabeza de molibdeno medida y calculada en las 40 pruebas analizadas.

En las figuras es posible notar que un gran número de pruebas presentan errores relativos menores a cero, lo que da cuenta de que la ley de cabeza calculada tiende a ser mayor que la ley medida. En particular, de las 40 pruebas, solo 6 pruebas en análisis de cobre, 3 en análisis de hierro y 6 en análisis de molibdeno presentan ley de cabeza calculada menor que la ley medida, siendo esta la principal razón de que se observe un mayor número de pruebas con valores negativos en el caso 2.

Al considerar como ley de alimentación la ley de cabeza calculada, el balance de finos cierra para cada metal. Sin embargo, este escenario asume que los datos medidos no están sujetos a error de medición y, por ende, el valor reportado es el correcto. Bajo este supuesto, es la ley medida aquella sujeta a error de medición. Aun así, 30% de los balances de hierro presentan valores negativos. Se presume una baja precisión en las mediciones de leyes y presencia de *outliers*.

Diferencias entre la ley de cabeza medida y la ley de cabeza calculada a partir de las leyes medidas en productos indican necesariamente que ciertas mediciones no fueron realizadas con la precisión esperada. Se aborda la problemática al aplicar la metodología de reconciliación de datos experimentales a las leyes medidas en los productos de cada test.

## 5.2 Reconciliación de datos experimentales

La reconciliación de las leyes medidas en los productos elimina el error relativo entre la ley de alimentación medida y la ley de alimentación calculada al generar como resultado leyes reconciliadas que cierran el balance para la ley de alimentación medida.

La ley reconciliada de cada producto es estimada en base a la ley medida en él y según el modelo de error que caracteriza el nivel de precisión con que el análisis químico es realizado.

Como resultado se entrega el error relativo entre leyes medidas y leyes reconciliadas en función del error relativo de ley de cabeza, para cada corriente y para cada elemento.

## 5.2.1 Impacto en las leyes

### Cobre

Se presentan a continuación gráficos con el error relativo promedio obtenido entre las leyes de cobre medidas y las leyes de cobre reconciliadas para cada producto en el proceso.

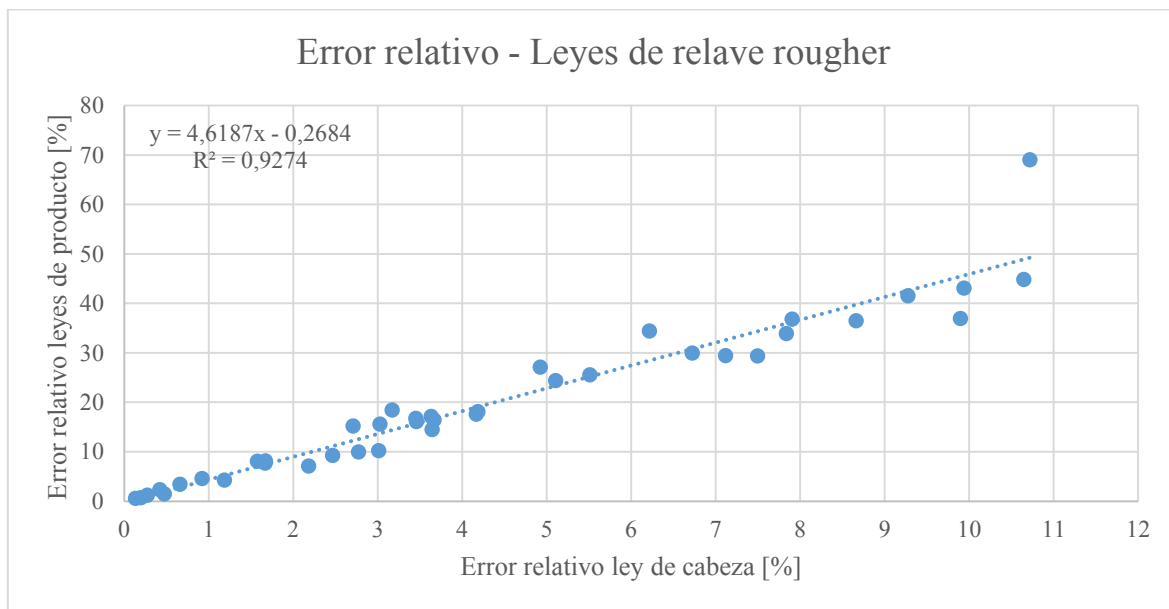


Figura 8. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

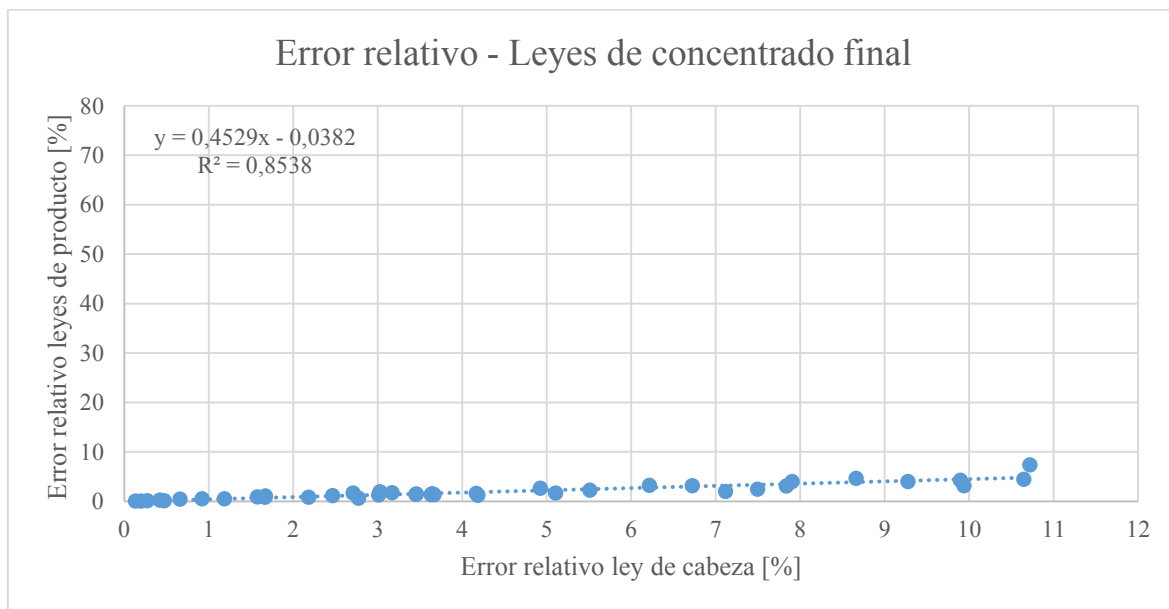


Figura 9. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

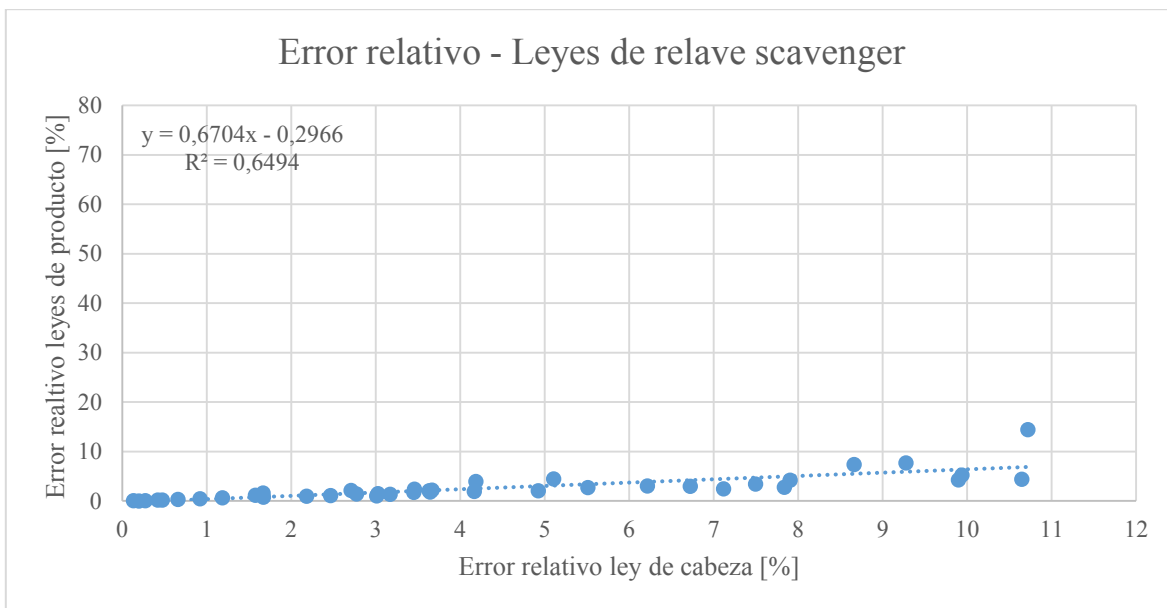


Figura 10. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

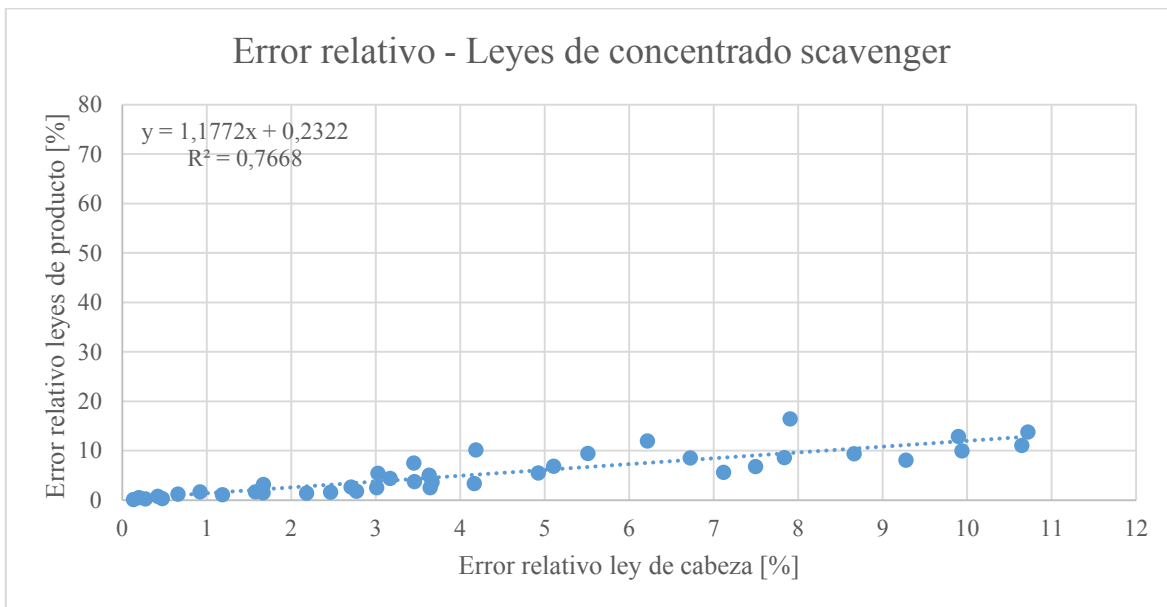


Figura 11. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

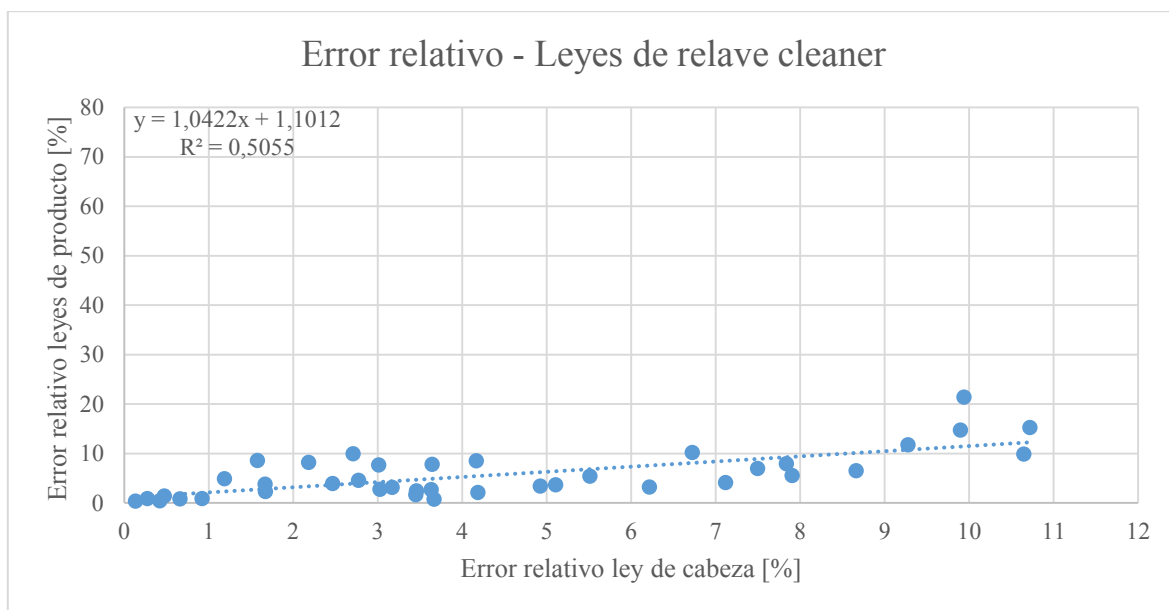


Figura 12. Error relativo entre ley de cobre medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba

A continuación se muestra una tabla resumen con el error relativo promedio para cada corriente.

Tabla 5. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de cobre medida y reconciliada para cada producto del proceso.

<b>Producto</b>	<b>Promedio Error relativo [%]</b>	<b>Promedio RMSE [%]</b>
<b>Relave <i>Rougher</i></b>	19,68	0,010
<b>Concentrado 2° Limpieza</b>	1,91	0,438
<b>Relave <i>Scavenger</i></b>	2,59	0,007
<b>Concentrado <i>Scavenger F</i></b>	5,31	0,077
<b>Relave 2° Limpieza F</b>	5,57	0,402

Las leyes de relave *rougher* fueron las mediciones que presentaron mayor variaciones relativa al ser reconciliadas. Esto se explica a través del modelo de error utilizado en la reconciliación. En él, las leyes de menores magnitudes, como es el caso de las leyes de relave *rougher* son más propensas a ser modificadas pues la precisión de la medición es menor. La ley de concentrado final (2° limpieza) fue la que presentó menor variación, lo que también se explica porque el modelo de error otorga mayor precisión a aquellas leyes de mayor magnitud, como es el caso de la corriente en cuestión.

Mientras mayor es el error relativo a la ley de cabeza, mayor es la diferencia entre las leyes reconciliadas y medidas.

Se muestra en la tabla el promedio de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las leyes medidas y las leyes reconciliadas para cada corriente. En ella se observa la variación promedio en puntos porcentuales para cada producto. Aun cuando el error relativo promedio en relave *rougher* es cercano al 20%, este valor corresponde a 0,01% de variación promedio en la ley de cobre de dicho producto.

## Hierro

El error relativo entre las leyes de hierro medidas y las leyes de hierro reconciliadas fue el siguiente.

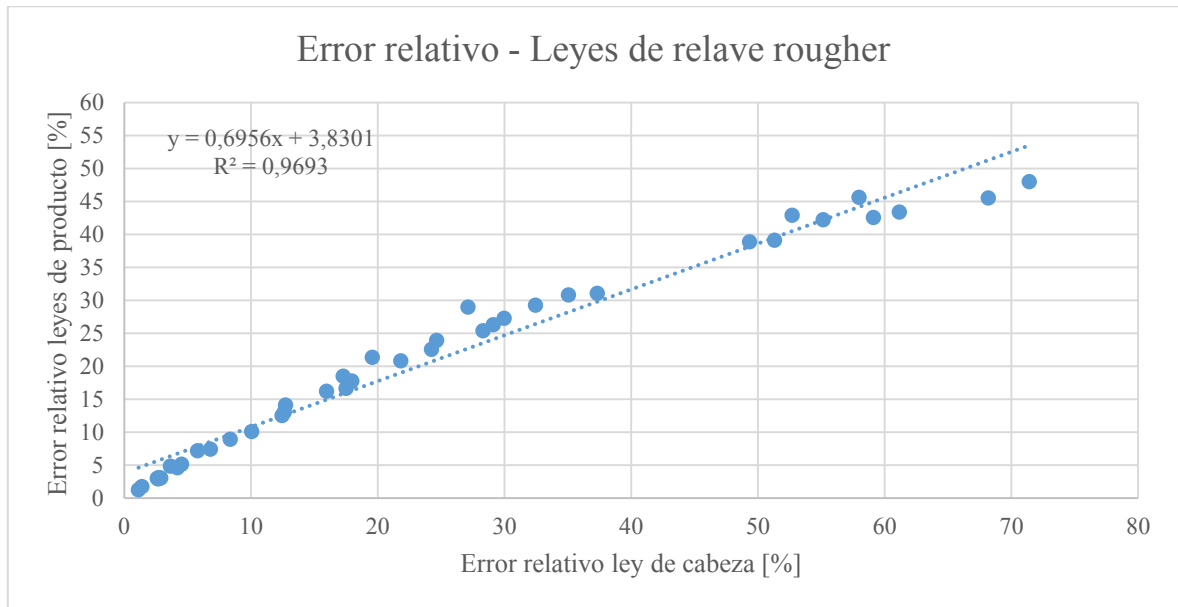


Figura 13. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

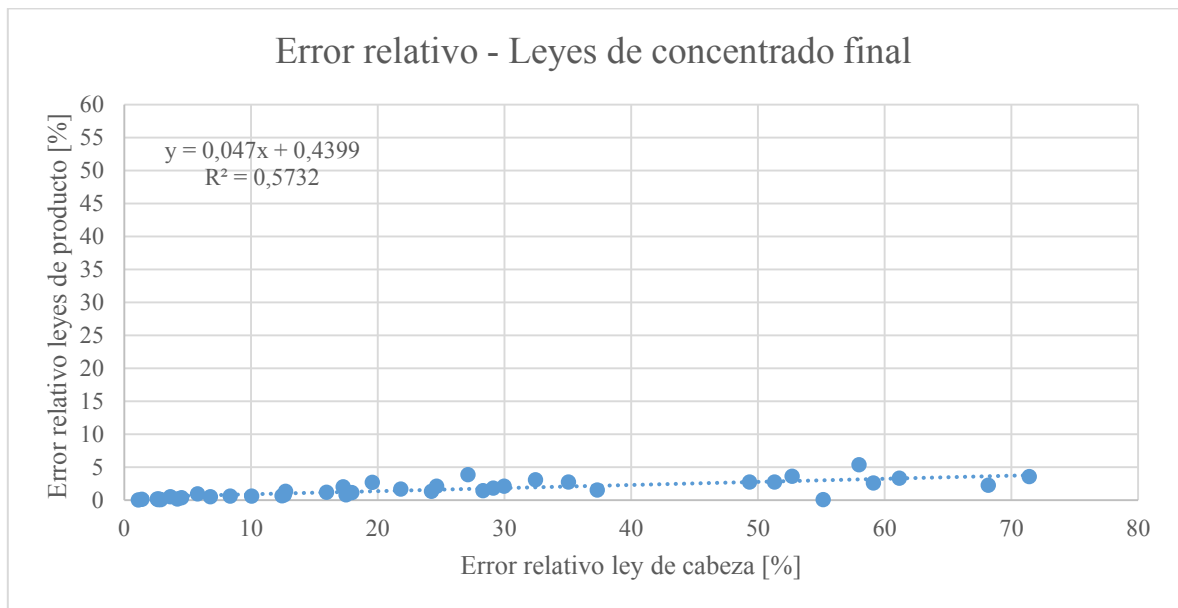


Figura 14. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.



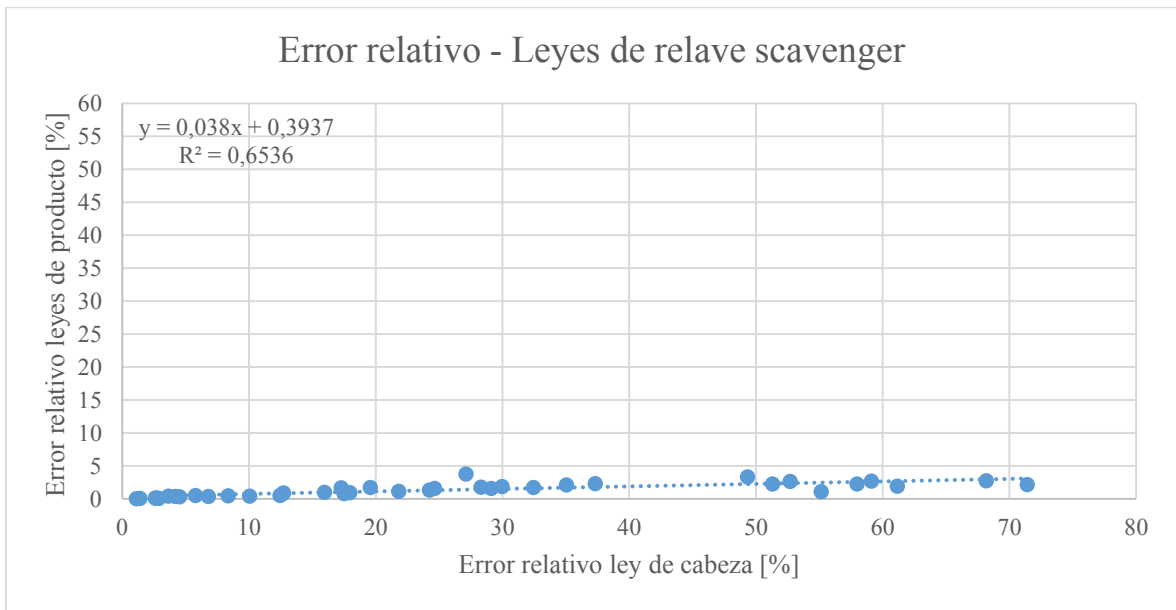


Figura 15. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

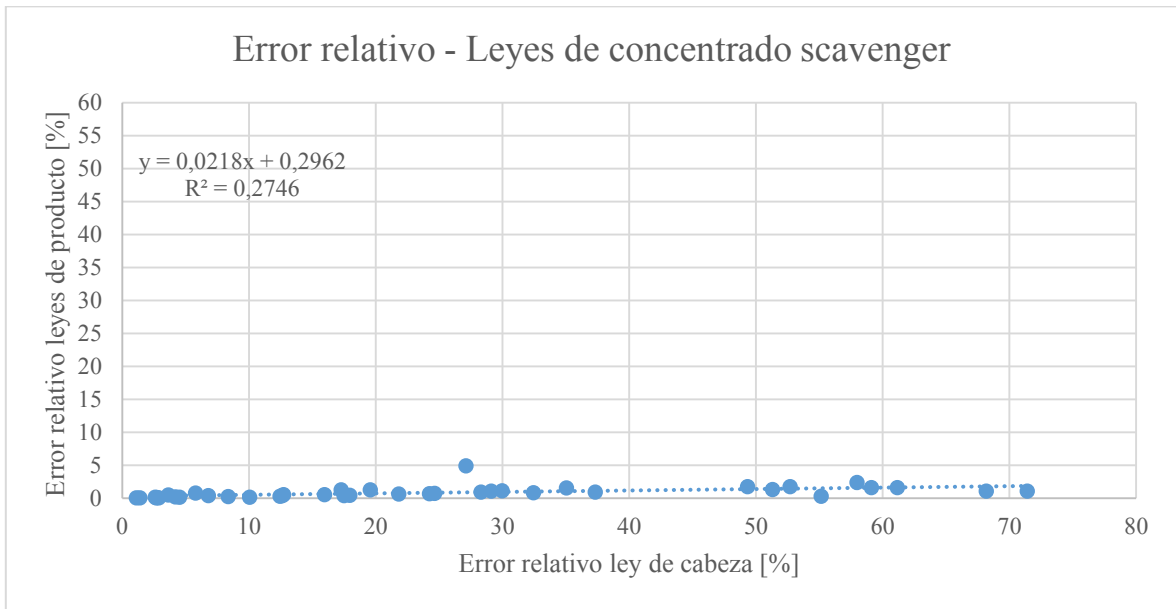


Figura 16. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

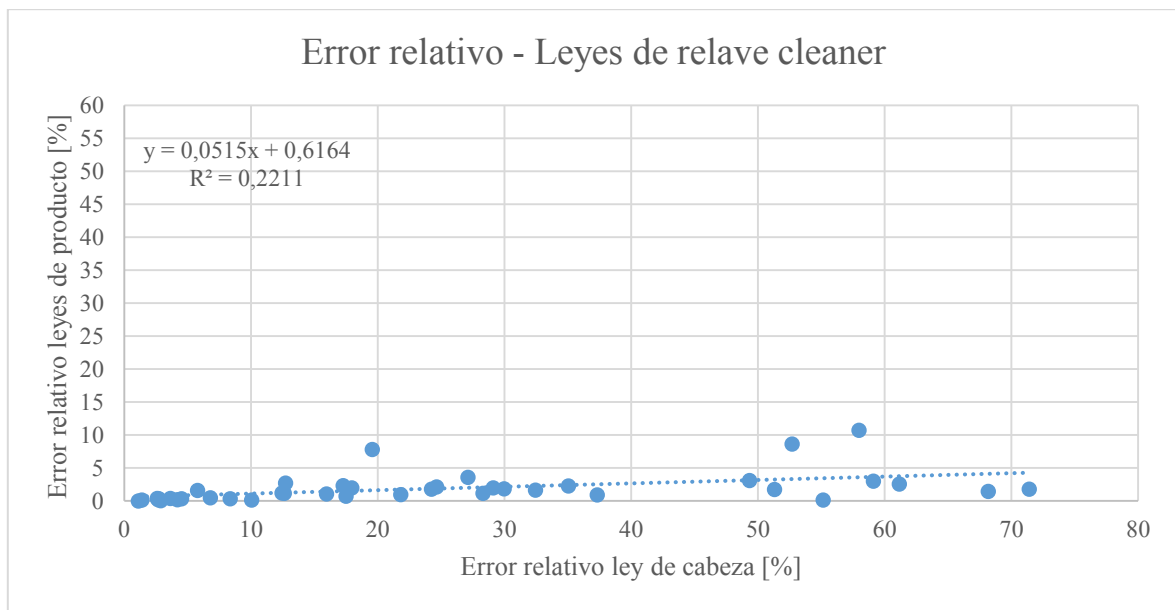


Figura 17. Error relativo entre ley de hierro medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

A continuación, una tabla resumen con el error relativo promedio entre las leyes de cada producto.

Tabla 6. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de hierro medida y reconciliada para cada producto del proceso.

Producto	Promedio Error relativo [%]	Promedio RMSE [%]
Relave Rougher	21,21	0,91
Concentrado 2° Limpieza	1,61	0,43
Relave Scavenger	1,34	0,07
Concentrado Scavenger F	0,84	0,07
Relave 2° Limpieza F	1,90	0,31

La ley de relave *rougher* medida es la que presenta mayor error relativo promedio respecto a la ley reconciliada.

Al igual que en el cobre, la tendencia en los gráficos indica que el error relativo entre las leyes medidas y reconciliadas en cada corriente es mayor mientras más alto es el error relativo a la ley de cabeza.

Los resultados o leyes reconciliadas son acordes al modelo de error utilizado.

Además, se muestra en la tabla el promedio de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las leyes medidas y reconciliadas por corriente. Para todas las corrientes se observa una variación promedio en la ley menor a 1%.

A través de la metodología de reconciliación, el número de pruebas con valores negativos en el balance se reduce un 50%, quedando solo 6 pruebas con dicha condición. Los balances cierran para la ley de alimentación medida. Se presume la presencia de *outliers*.

## Molibdeno

El error relativo entre las leyes de molibdeno medidas y reconciliadas fue el siguiente.

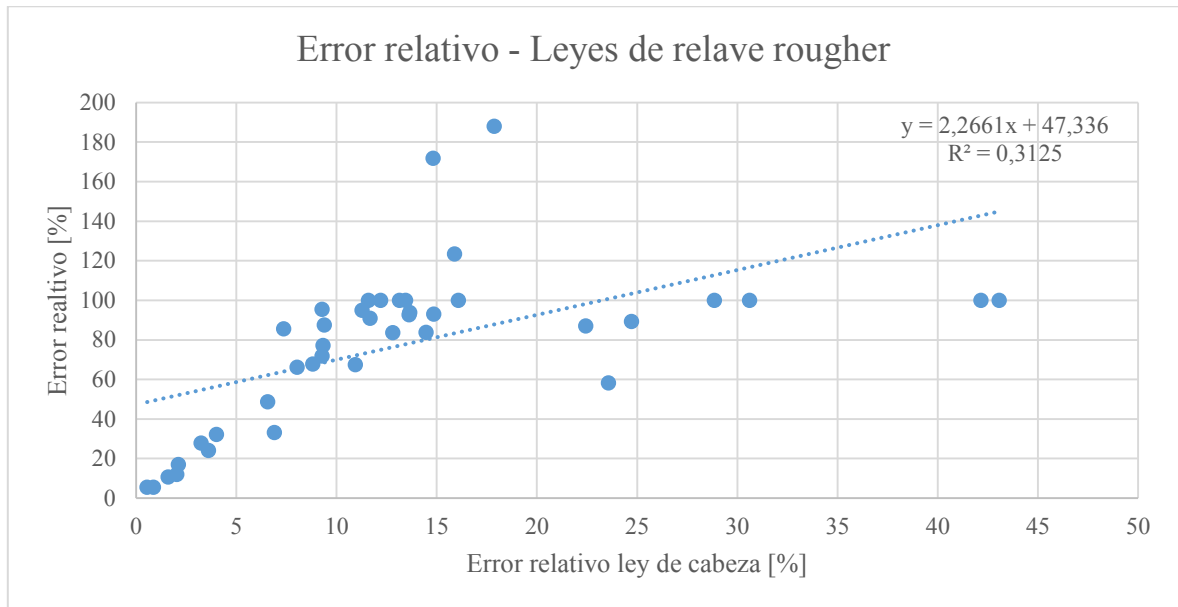


Figura 18. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave rougher en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

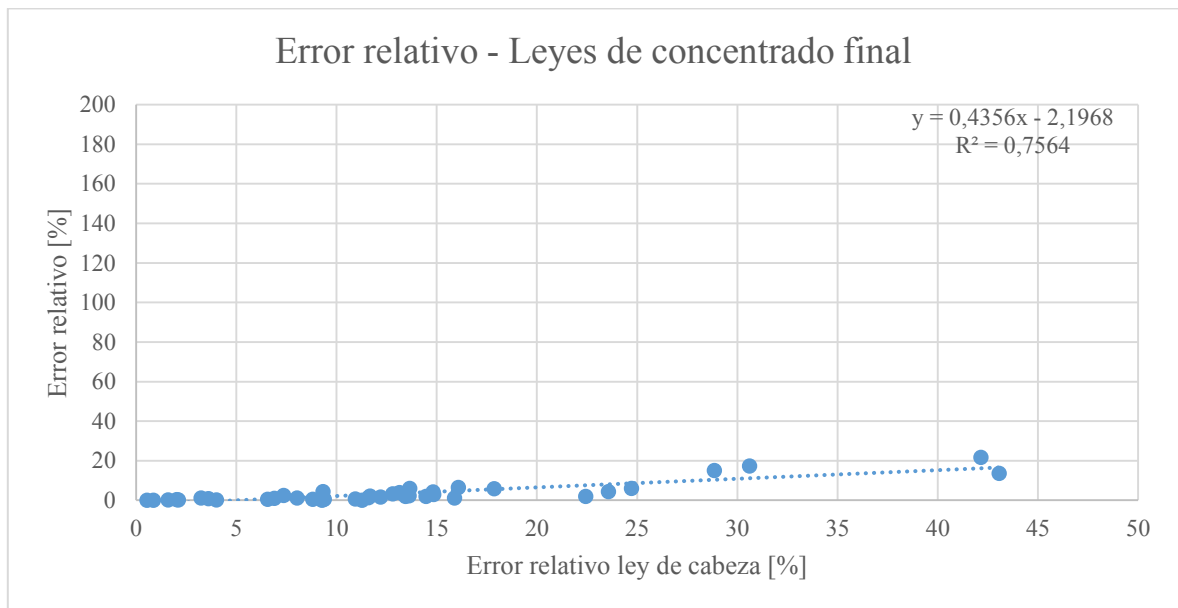


Figura 19. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de concentrado final en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

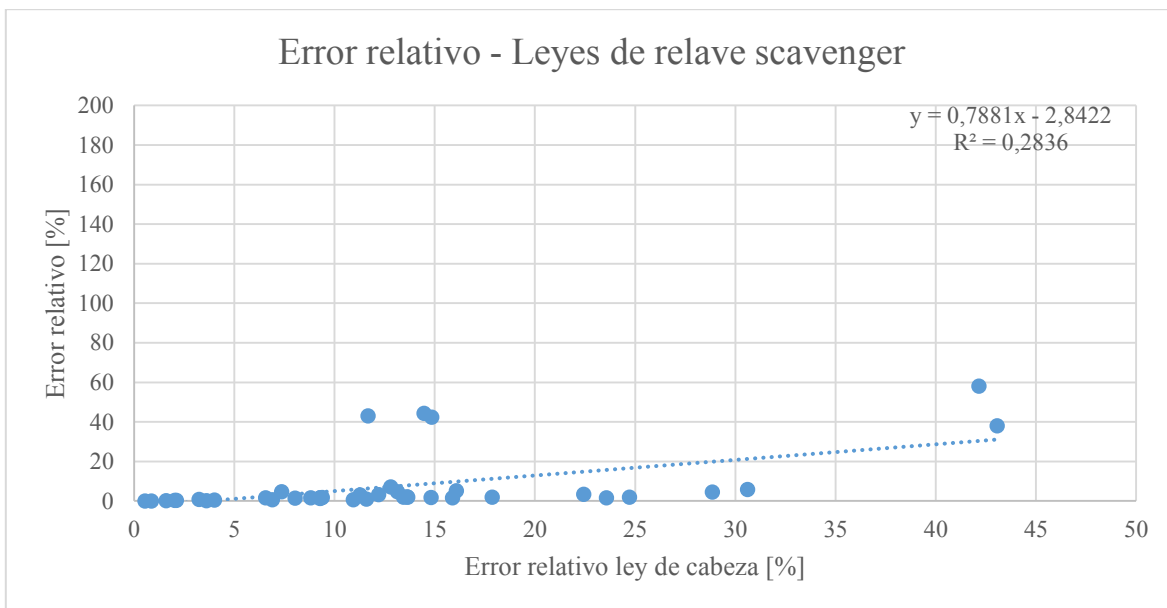


Figura 20. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

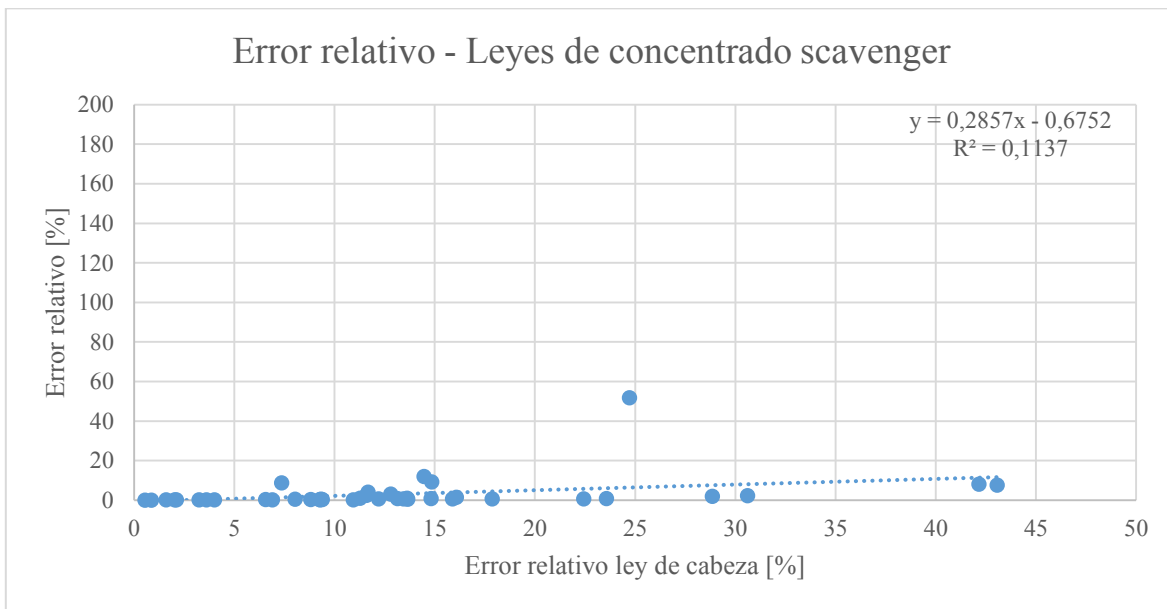


Figura 21. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de concentrado scavenger en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

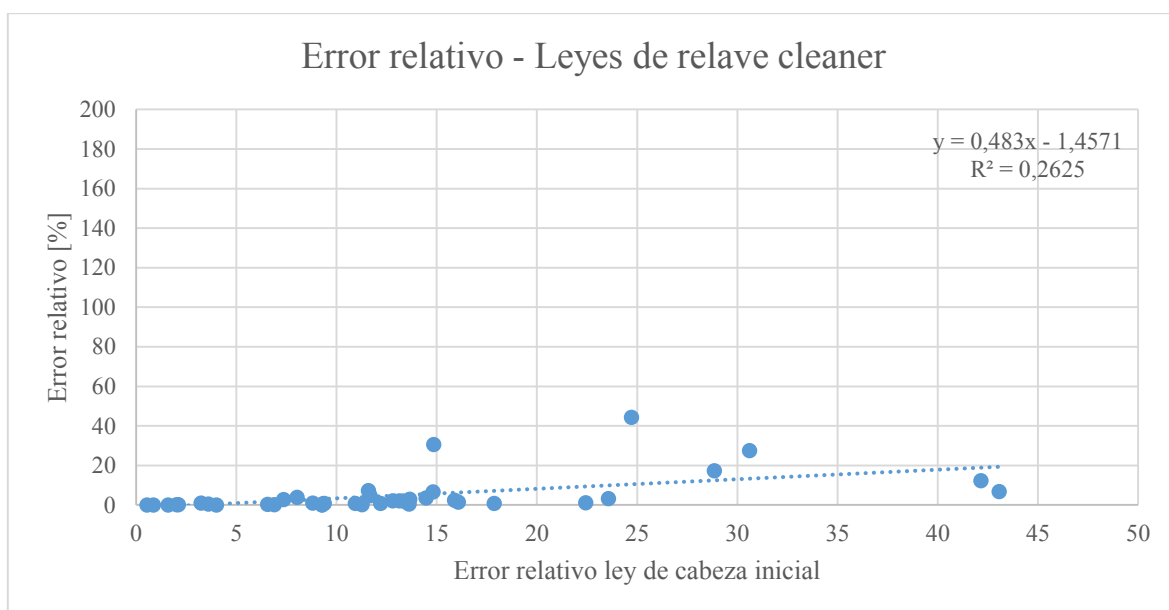


Figura 22. Error relativo entre ley de molibdeno medida y reconciliada de relave cleaner en función del error relativo a la ley de cabeza en cada prueba.

A continuación, la tabla muestra el error relativo promedio de los test entre las leyes de molibdeno medidas y modeladas por corriente.

Tabla 7. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de molibdeno medida y reconciliada para cada producto del proceso.

Producto	Promedio Error relativo [%]	Promedio RMSE [%]
<b>Relave Rougher</b>	77,17	0,001
<b>Concentrado 2° Limpieza</b>	3,54	0,029
<b>Relave Scavenger</b>	7,53	0,001
<b>Concentrado Scavenger F</b>	3,09	0,002
<b>Relave 2° Limpieza F</b>	4,90	0,023

La ley de relave *rougher* es la medición que presenta mayor variación relativa luego de la reconciliación, alcanzando un promedio de 77%, como se muestra en la Tabla 7. Esto se debe principalmente a que, dado el modelo, el ajuste modifica preferentemente las leyes de relave *rougher* al presentar un orden de magnitud mucho menor respecto a las demás mediciones. Al minimizar la función objetivo, los valores son modificados incluso más allá de un 100% en ciertos casos (Figura 18), existiendo algunos en que la ley de relave reconciliada toma valores de 0% para cerrar el balance de molibdeno. En particular, 21 pruebas (~50%) presentan dicha condición. Se espera entonces que la metodología tenga un fuerte impacto en la recuperación de la etapa *rougher*.

Aun así, al igual que en los demás metales, es posible distinguir una tendencia en los gráficos que da cuenta del aumento en el error relativo de las leyes de productos al aumentar el error relativo a la ley de cabeza.

Se entrega la variación promedio entre las leyes de molibdeno medidas y reconciliadas, calculada como la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Si bien el error relativo promedio generado en

las leyes de relave rougher luego de la reconciliación alcanzó el 77%, de la tabla anterior, este valor corresponde a 0,001% de variación promedio en la ley.

Se observa que para todos los metales, la ley de relave rougher es la que presenta una mayor variación relativa al aplicar la metodología de reconciliación de datos para cerrar el balance con la ley de alimentación medida.

### 5.3 Proyección metalúrgica de resultados

La proyección de resultados fue llevada a cabo para las 40 pruebas de test de ciclo cerrado a través de las 3 metodologías descritas en la sección 4.4 para evaluar el impacto de la conservación de masa sobre los resultados proyectados para los tres metales.

#### 5.3.1 Conservación de masa

Se entrega en la siguiente tabla la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test obtenido a través del balance respectivo y la Ecuación 13, tanto en masa mineral como en los metales analizados.

*Tabla 8. Conservación de masa. Promedio de últimos 3 ciclos en masa de mineral y por metal, para cada prueba.*

# Prueba	Masa [%]	Cu [%]	Fe [%]	Mo [%]
1	99,6	98,3	97,1	99,9
2	99,7	98,1	95,6	97,9
3	99,8	98,2	99,9	97,9
4	99,9	101,0	98,6	104,1
5	99,5	89,3	97,1	87,8
6	99,5	95,0	101,2	99,5
7	100,0	98,4	100,7	101,2
8	99,6	91,7	100,4	88,5
9	100,0	101,6	95,3	103,5
10	99,7	96,5	98,9	99,7
11	99,9	98,9	99,0	96,0
12	99,8	95,7	97,4	99,6
13	100,1	101,1	96,9	104,4
14	99,8	95,4	96,4	96,2
15	99,7	99,6	100,9	98,5
16	99,6	95,6	98,6	92,5
17	99,7	97,4	98,0	93,8
18	99,6	100,4	100,4	99,3
19	99,8	99,8	96,9	92,8
20	99,8	99,7	100,5	100,1
21	99,2	87,6	97,3	87,0
22	99,8	93,5	97,5	98,8
23	99,8	96,5	94,5	100,3
24	99,8	98,0	102,7	99,0
25	99,7	93,8	101,5	92,1
26	99,7	98,6	101,3	97,5
27	99,6	101,5	98,9	96,5

28	100,0	97,9	102,5	100,1
29	99,8	99,5	100,2	103,9
30	99,7	96,7	100,6	98,6
31	99,4	82,7	94,0	81,8
32	99,5	89,2	95,4	69,1
33	99,8	99,3	104,2	100,3
34	99,4	84,7	98,6	85,0
35	99,8	98,7	100,7	100,1
36	99,7	93,0	97,8	94,6
37	99,2	84,0	95,9	68,9
38	99,7	90,7	98,3	95,8
39	99,6	98,4	98,3	97,8
40	99,8	97,1	101,0	98,7

De los datos mostrados en la tabla anterior se rescata lo siguiente:

- Al observar los valores de conservación de masa mineral en el proceso, es posible notar que todos se encuentran sobre el 99%.
- En el caso de la conservación de masa de cobre, hierro y molibdeno, se entregan a continuación histogramas que buscan describir la distribución de los valores obtenidos por metal.

## Cobre

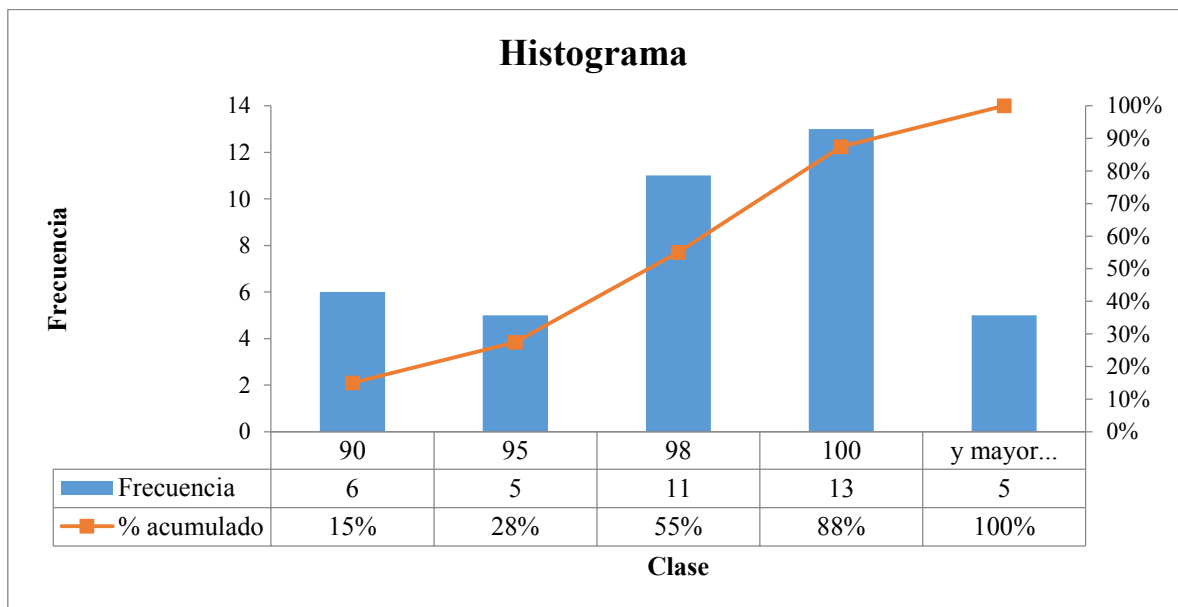


Figura 23. Histograma de conservación de masa de cobre promedio de los 3 últimos ciclos de cada test.

Para el caso del cobre, se observa que 22 de las 40 pruebas no alcanzan el 98% en conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos, mientras que las otras 18 se encuentran por sobre dicho valor.

## Hierro

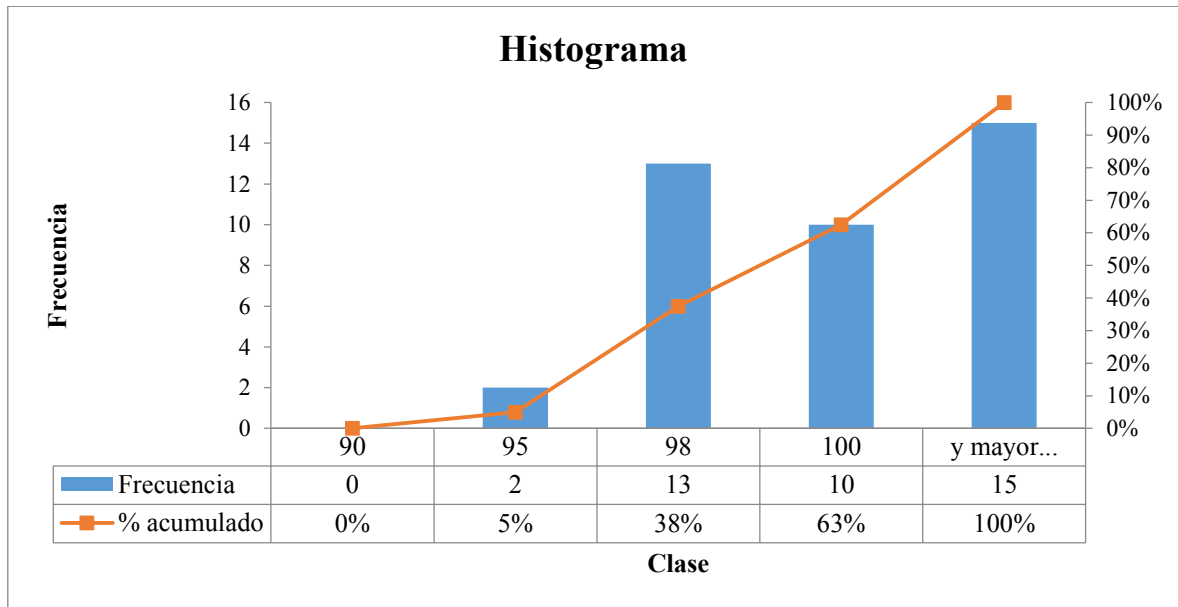


Figura 24. Histograma de conservación de masa de hierro promedio de los 3 últimos ciclos de cada test.

En el caso del hierro, 25 pruebas logran alcanzar una conservación de masa mayor al 98% en los últimos ciclos del test, mientras que los 15 restantes se encuentran bajo dicho valor.

## Molibdeno

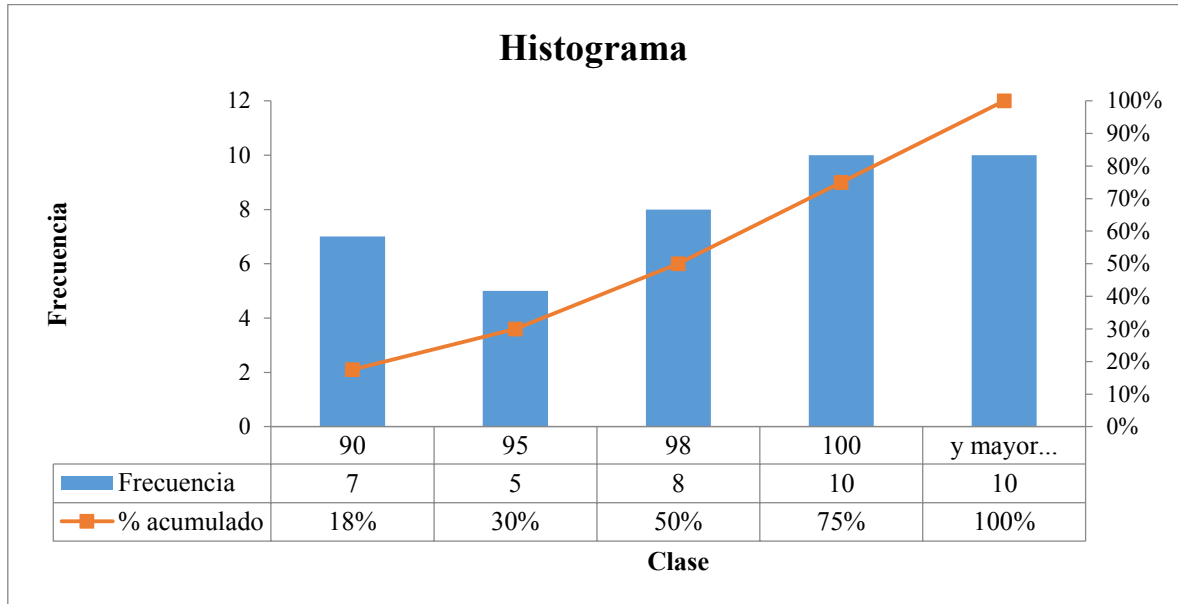


Figura 25. Histograma de conservación de masa de molibdeno promedio de los 3 últimos ciclos de cada test.

En el caso del molibdeno, 20 de las 40 pruebas se encuentran bajo el 98% de conservación de masa, mientras que las otras 20 lo superan, de las cuales 10 alcanzan valores mayores a 100%

Del total de pruebas, el 17% no alcanza el 98% en conservación de masa en ninguno de los metales analizados, el 20% lo alcanza en los 3 metales, el 28% en al menos 1 metal y el 35% en 2 de ellos.



El criterio es estudiado a partir de la diferencia observada entre las proyecciones metalúrgicas de cada metal calculadas a través de las 3 metodologías disponibles.

### 5.3.2 Proyección metalúrgica

Las proyecciones realizadas en base a las leyes de metales contenidos en los productos son las siguientes:

#### Cobre

Los siguientes gráficos muestran la recuperación de cobre obtenida a través de cada metodología de proyección en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

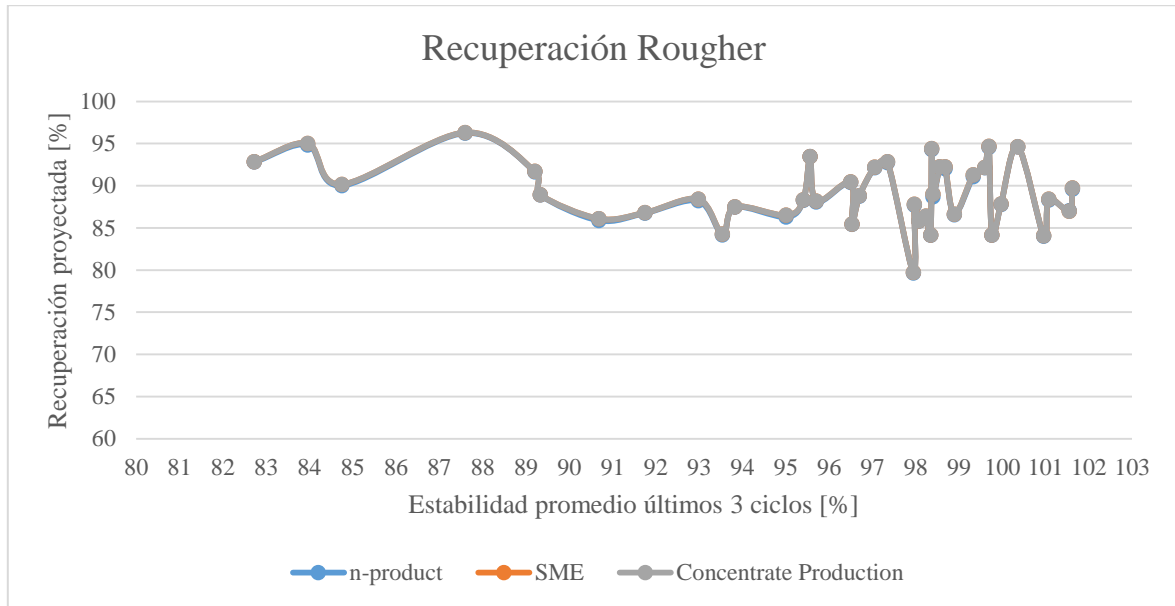


Figura 26. Recuperación de cobre proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Las curvas se encuentran superpuestas. La conservación de masa del test no afecta la recuperación rougher proyectada con las 3 metodologías de cálculo, pues se realiza a partir de los 6 ciclos del test.

Al observar la diferencia absoluta entre los métodos en función de la conservación de masa del test para la recuperación de cada etapa, es posible notar lo siguiente:

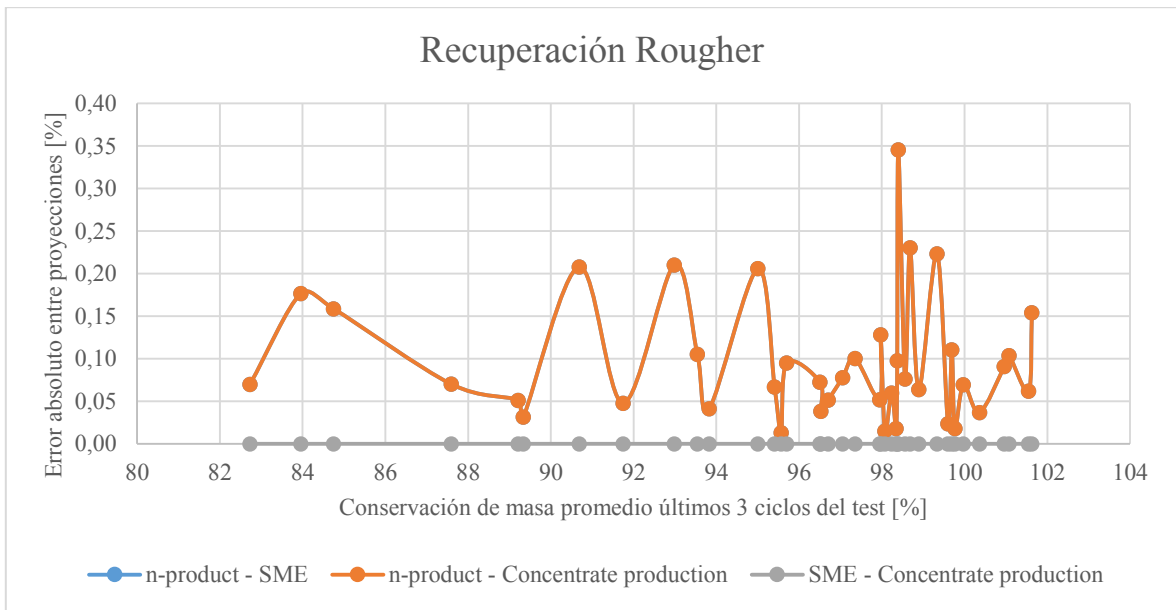


Figura 27. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Bajas diferencias en proyección de recuperación *rougher*. El valor máximo alcanza un 0,35% de diferencia absoluta entre la metodología *n-product* y las otras dos metodologías. *SME* y *Concentrate Production* presentan diferencias prácticamente nulas, reflejadas en la línea gris.

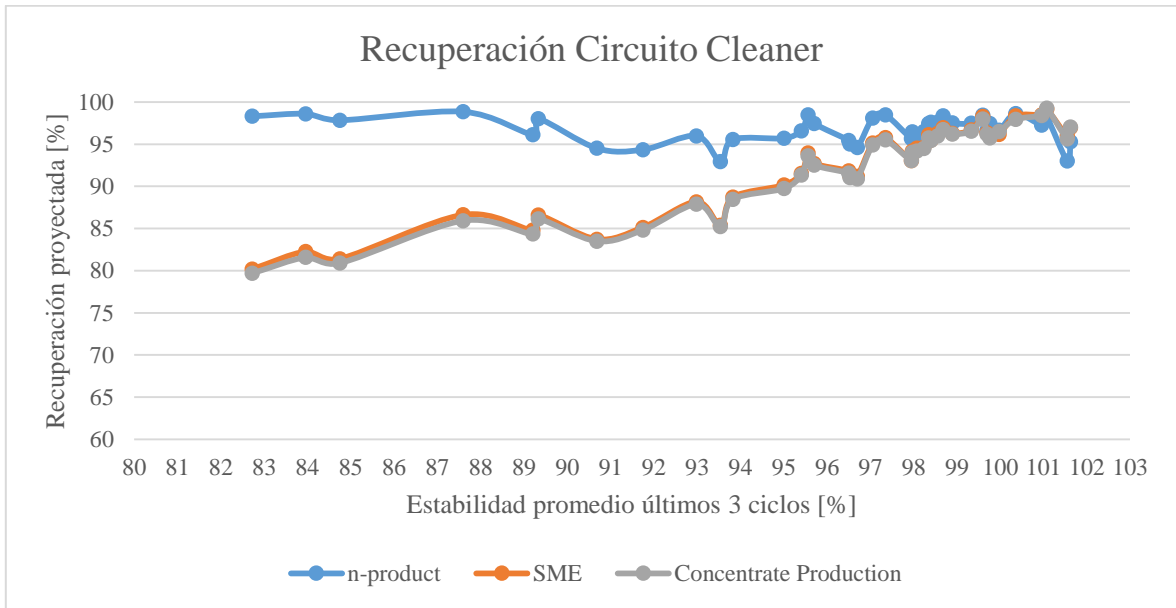


Figura 28. Recuperación de cobre proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

La recuperación *cleaner* proyectada presenta mayores diferencias entre las metodologías mientras más alejada del 100% esté la conservación de masa en los últimos ciclos del test.

La metodología *n-product* entrega valores mayores de recuperación proyectada en aquellas pruebas que se encuentran lejos del estado estacionario, mientras que cuando el test presenta conservación de masa mayor a 100%, entrega valores menores respecto de las demás metodologías.

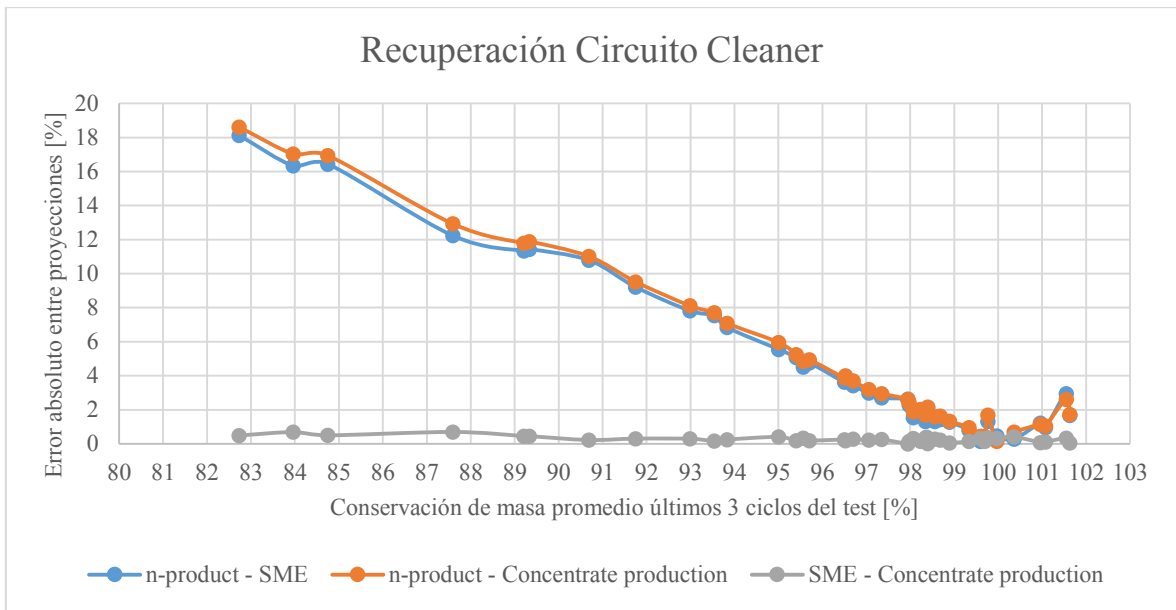


Figura 29. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

La diferencia absoluta entre las proyecciones de recuperación *cleaner* es menor mientras más cerca del 100% en conservación de masa promedio se encuentre el test. Para valores mayores a 98% la diferencia entre recuperaciones proyectadas entre las metodologías es menor a 2%.

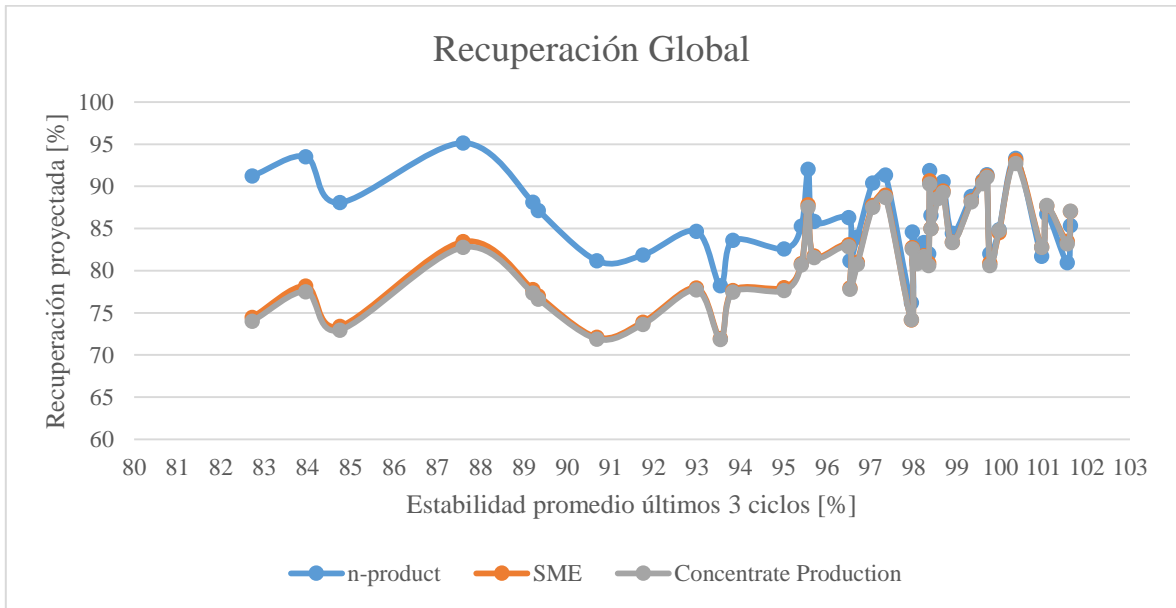


Figura 30. Recuperación de cobre proyectada del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al igual que para la recuperación *cleaner*, las recuperaciones globales proyectadas con cada metodología convergen al acercarse al estado estacionario (100%).

Se muestra entonces un gráfico con la diferencia absoluta de recuperación global proyectada, donde la tendencia es clara.

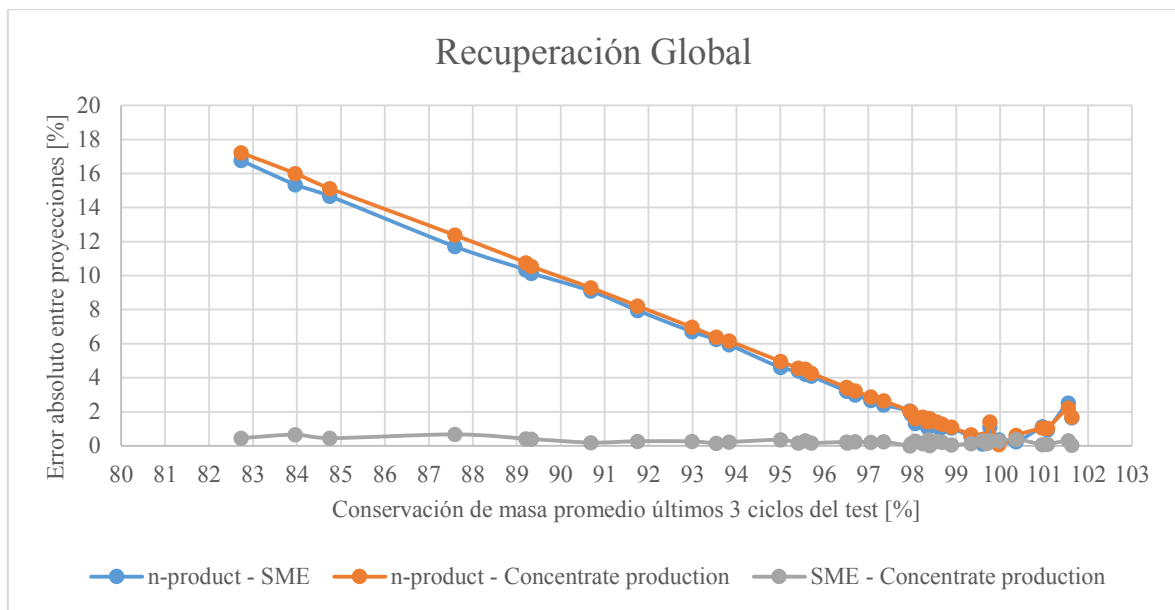


Figura 31. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de cobre del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Mientras el test se encuentre cerca del estado estacionario (>98%) la diferencia absoluta entre la recuperación global proyectada con cada metodología es menor a 2%, mientras que en test alejados de la conservación de masa, la diferencia absoluta alcanza valores incluso mayores a 10%.

## Hierro

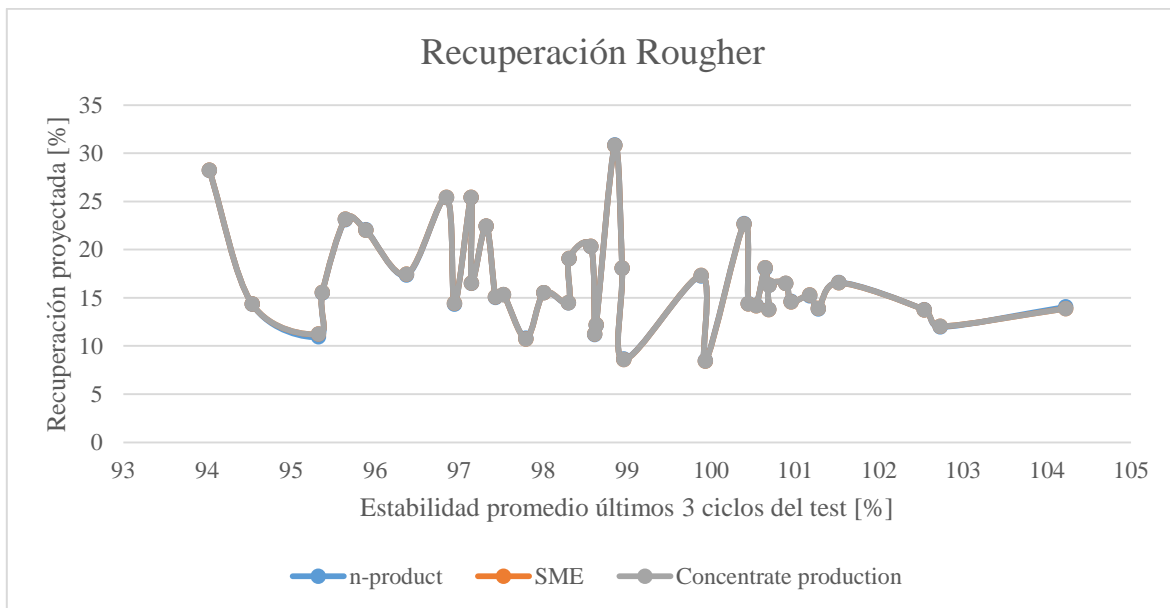


Figura 32. Recuperación de hierro proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al igual que para el cobre, la recuperación rougher proyectada no depende de la conservación de masa.

Se entrega el gráfico con la diferencia absoluta obtenida entre las metodologías en función de la estabilidad del test.

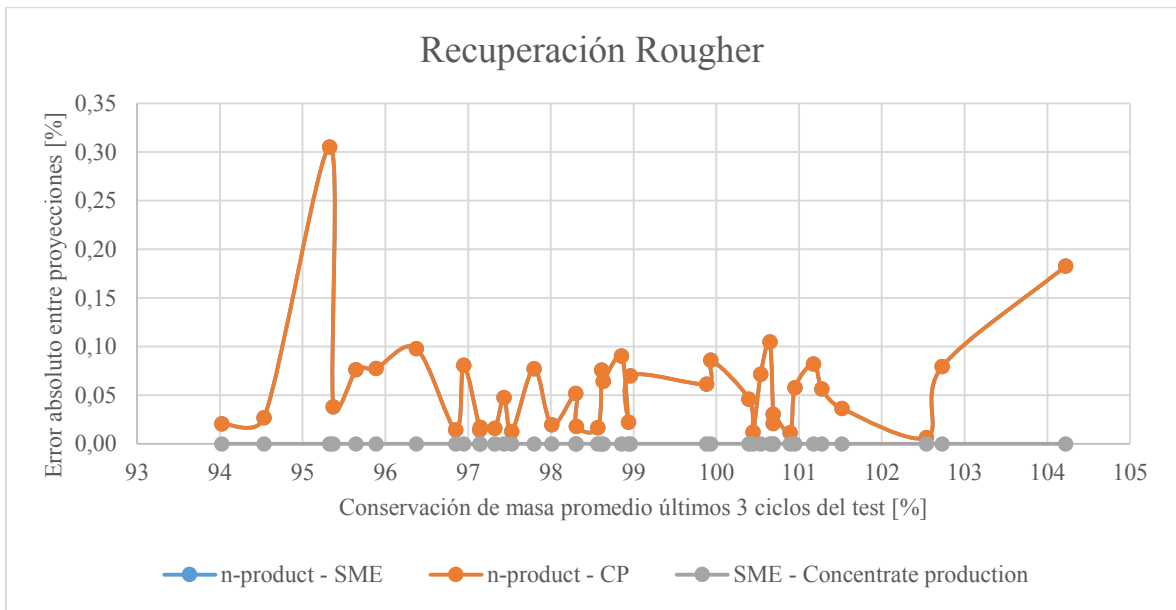


Figura 33. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

El impacto en la recuperación rougher alcanza un valor máximo de 0,3%, mientras que gran parte de las proyecciones presentan error absoluto menor a 0,1%.

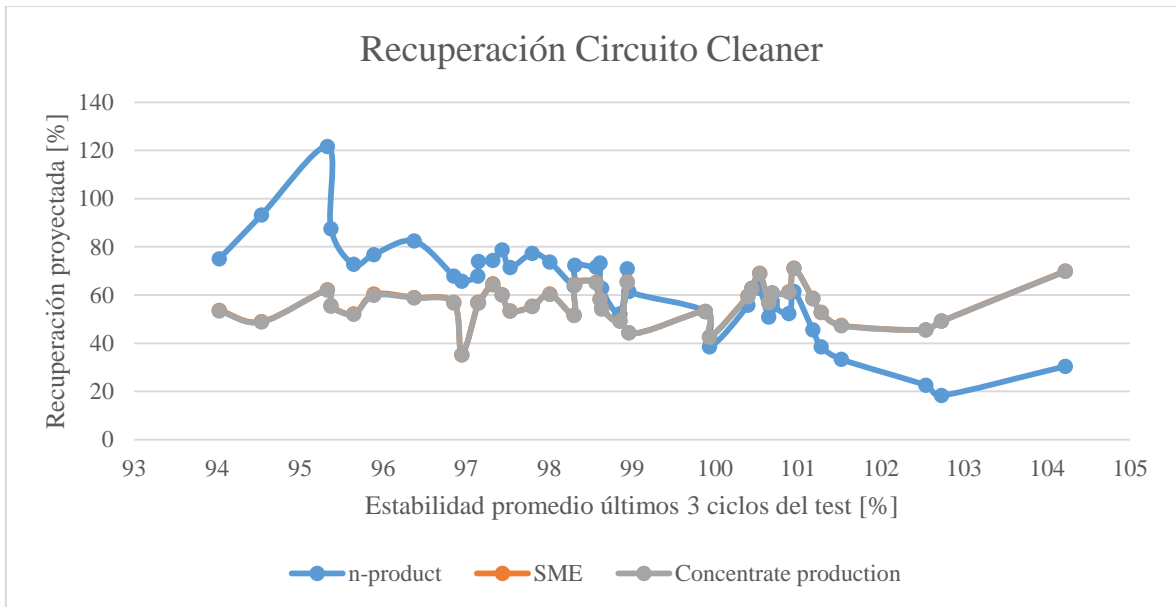


Figura 34. Recuperación de hierro proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

En el circuito *cleaner*, los valores de recuperación de hierro proyectados difieren en mayor medida mientras más alejado esté un test del estado estacionario. La metodología *n-product* entrega valores mayores de recuperación del circuito *cleaner* cuando el test no ha alcanzado el 100%. Para conservación de masa mayor a 100%, la metodología subestima.

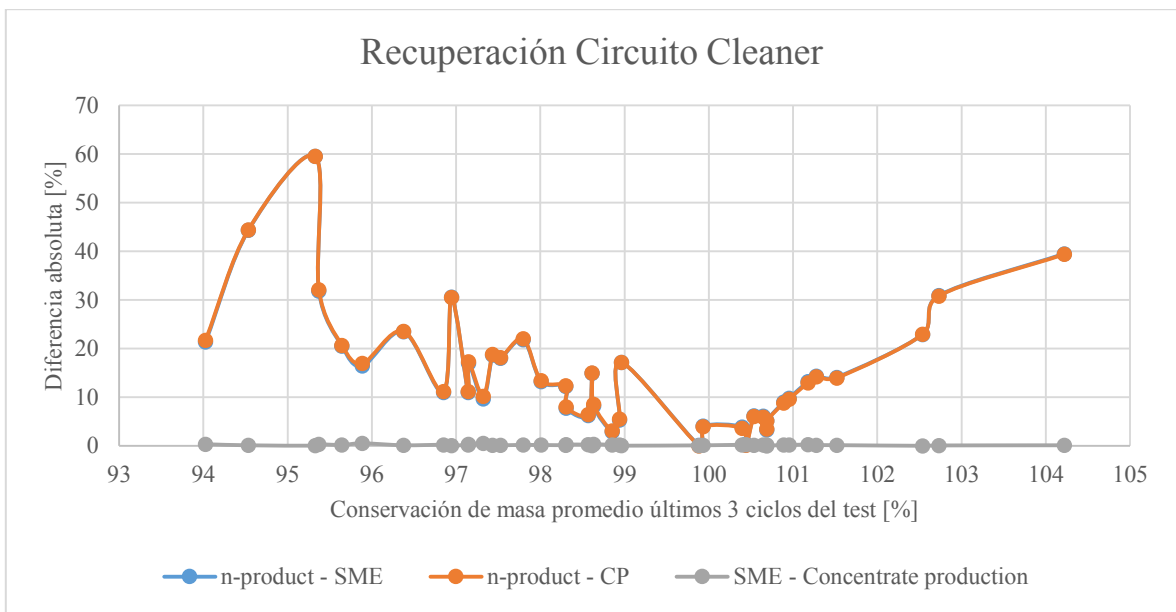


Figura 35. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al acercarse al 100% en conservación de masa de hierro la diferencia entre las recuperaciones proyectadas para el circuito cleaner es menor. Diferencias de hasta 60% pueden alcanzarse entre las metodologías, en particular entre *n-product* y *SME* o *Concentrate Production*, cuando el test se encuentra lejos del estado estacionario.

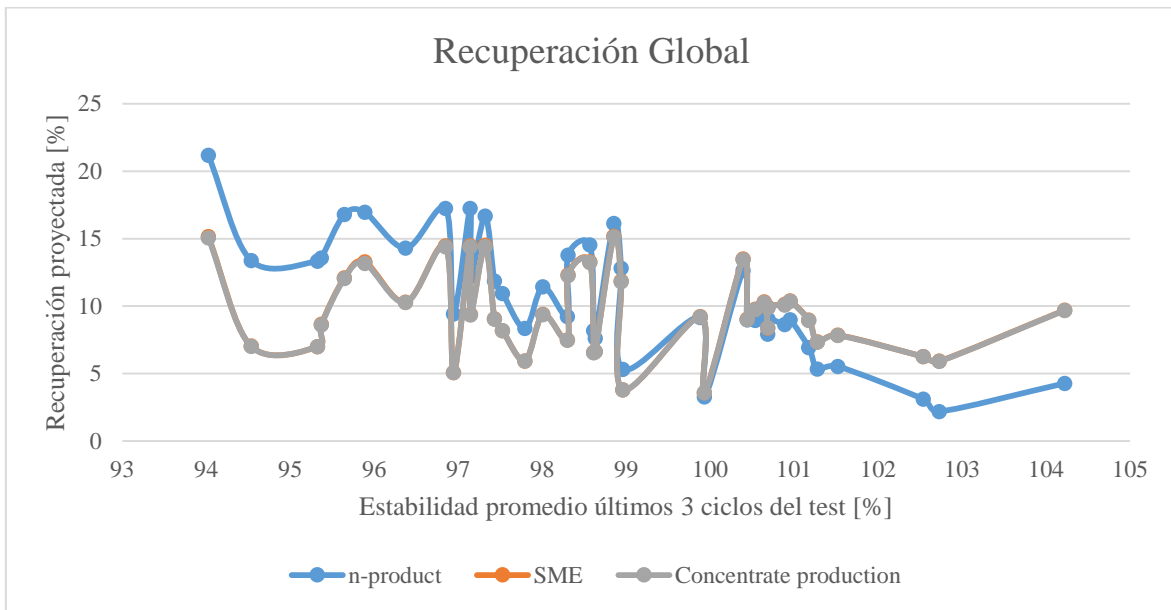


Figura 36. Recuperación de hierro proyectada del circuito global en función de la estabilidad promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Se observa una clara convergencia entre las proyecciones de recuperación global cuando el test se acerca al 100% en conservación de masa.

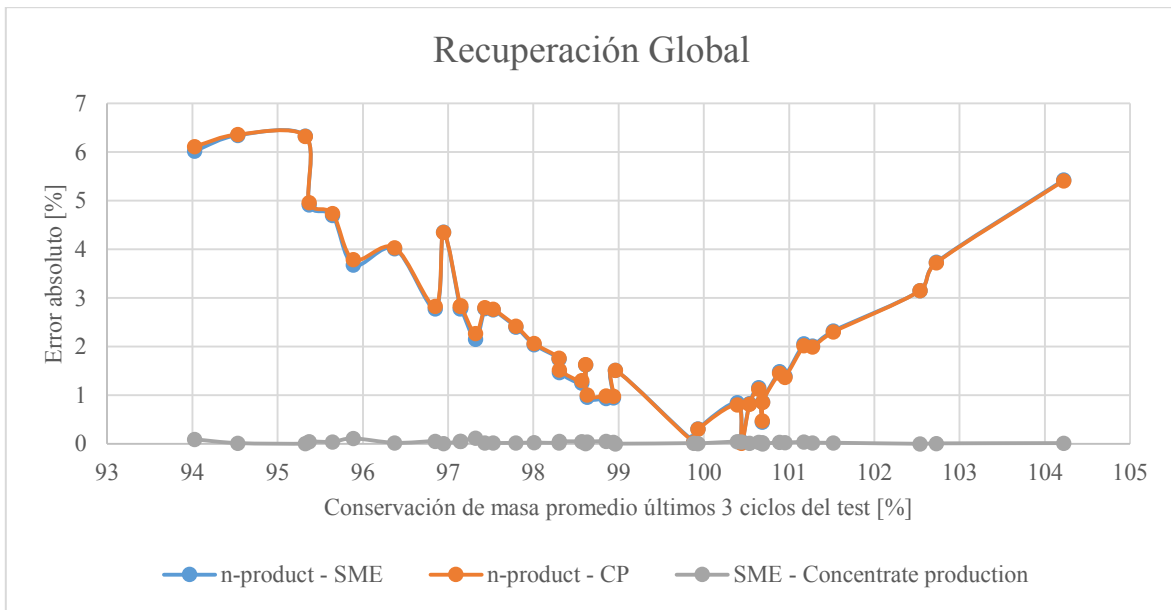


Figura 37. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de hierro del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al observar la diferencia absoluta en la recuperación global de hierro proyectada, es posible notar que en el rango de  $100\% \pm 2\%$  la diferencia absoluta entre las recuperaciones proyectadas es menor a 3%, alcanzando valores mayores a 6% de diferencia en aquellos casos más alejados de la conservación de masa.

### Molibdeno

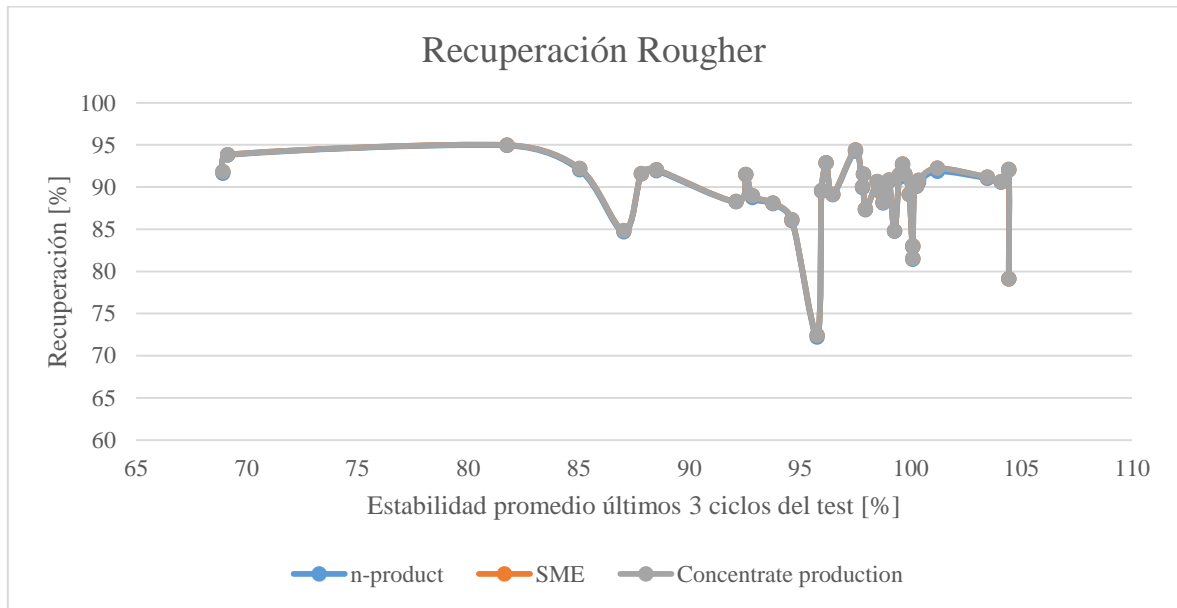


Figura 38. Recuperación de molibdeno proyectada de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al igual que en los casos anteriores, la recuperación proyectada de la etapa *rougher* no se ve afectada con la conservación de masa de molibdeno en el test.

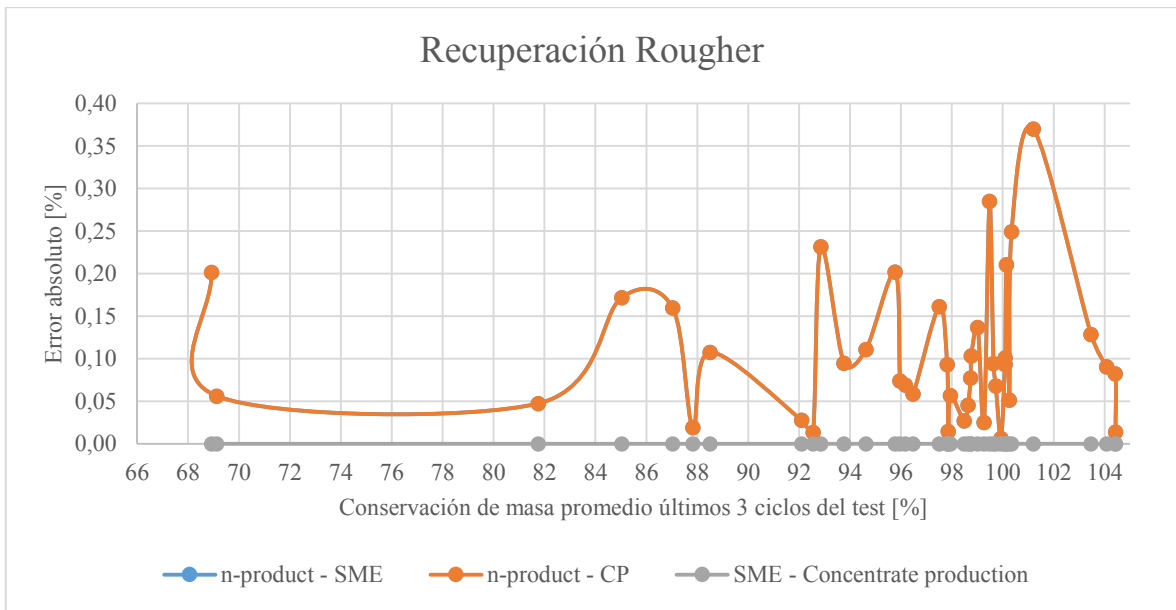


Figura 39. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno de la etapa rougher en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

El valor máximo de diferencia absoluta entre las proyecciones de recuperación *rougher* de molibdeno obtenidas a partir de los diferentes métodos de cálculo no supera el 0,4%, por lo que se considera que la estabilidad del test no influye en esta etapa

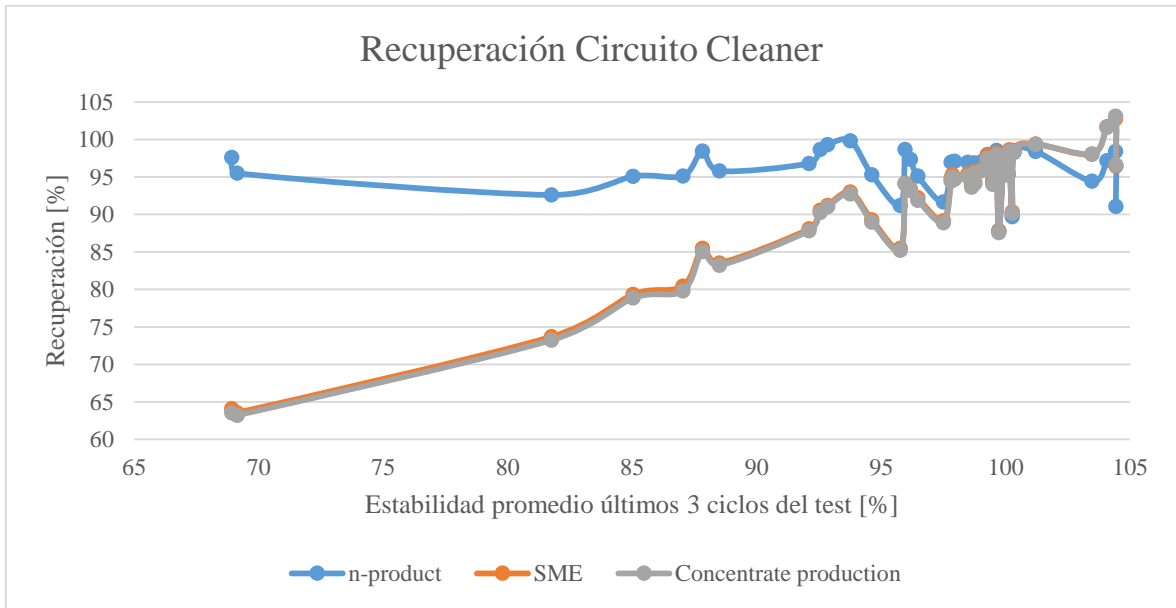


Figura 40. Recuperación de molibdeno proyectada del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

En cuanto a la recuperación proyectada para el circuito cleaner, la tendencia indica que los valores proyectados a partir de cada metodología convergen al acercarse al estado estacionario. Igualmente, la diferencia entre las metodologías se acentúa al alejarse del 100% en conservación de masa.



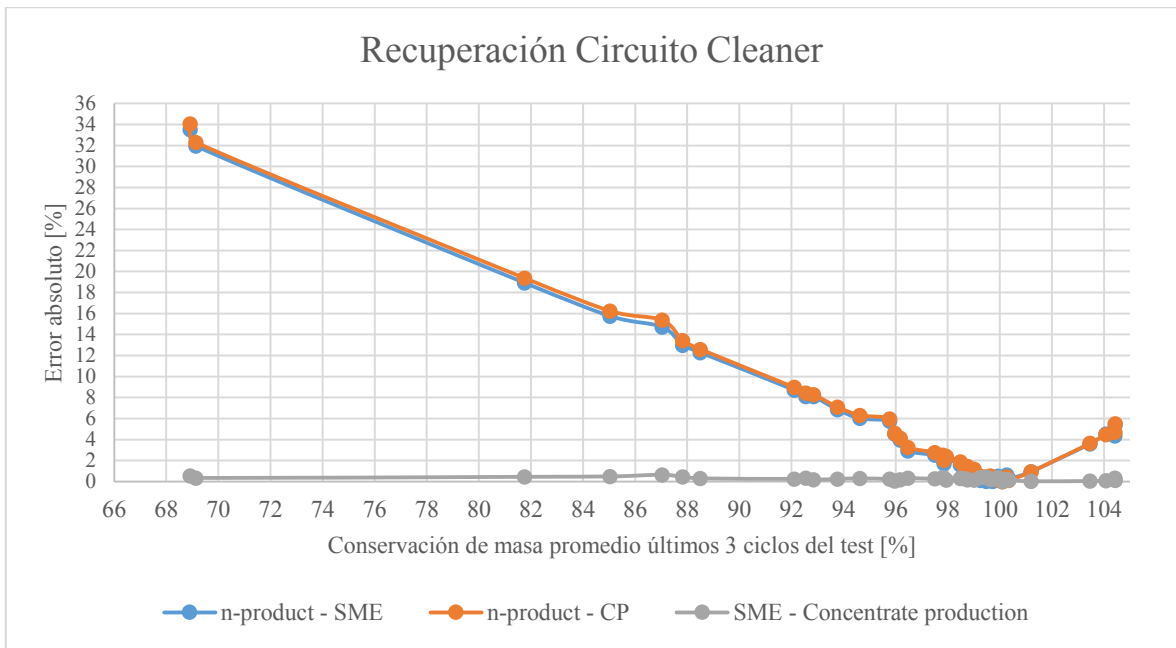


Figura 41. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno del circuito cleaner en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al graficar la diferencia absoluta entre las metodologías, se puede observar que ésta se reduce cuando el test está cerca de alcanzar la conservación de masa. La diferencia absoluta es menor a 2% cuando el test se encuentra en el rango de estabilidad  $100\% \pm 2\%$ .

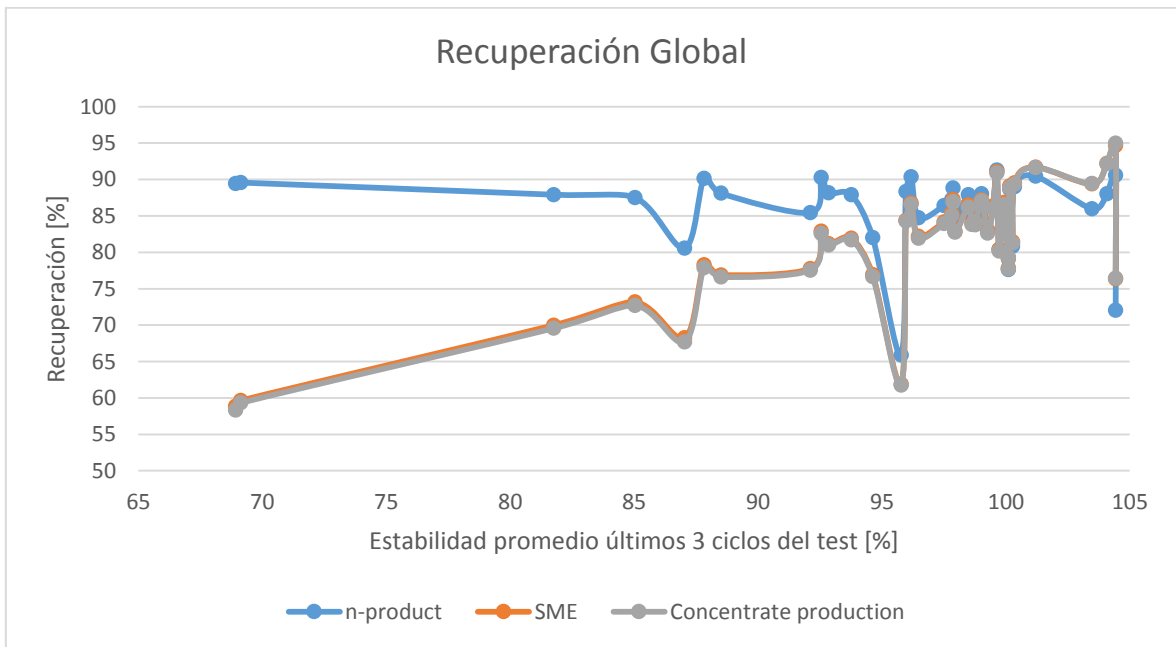


Figura 42. Recuperación de molibdeno proyectada del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

Al observar el comportamiento de la recuperación global de molibdeno proyectada la tendencia es la misma. La recuperación converge a medida que el test se acerca al estado estacionario.

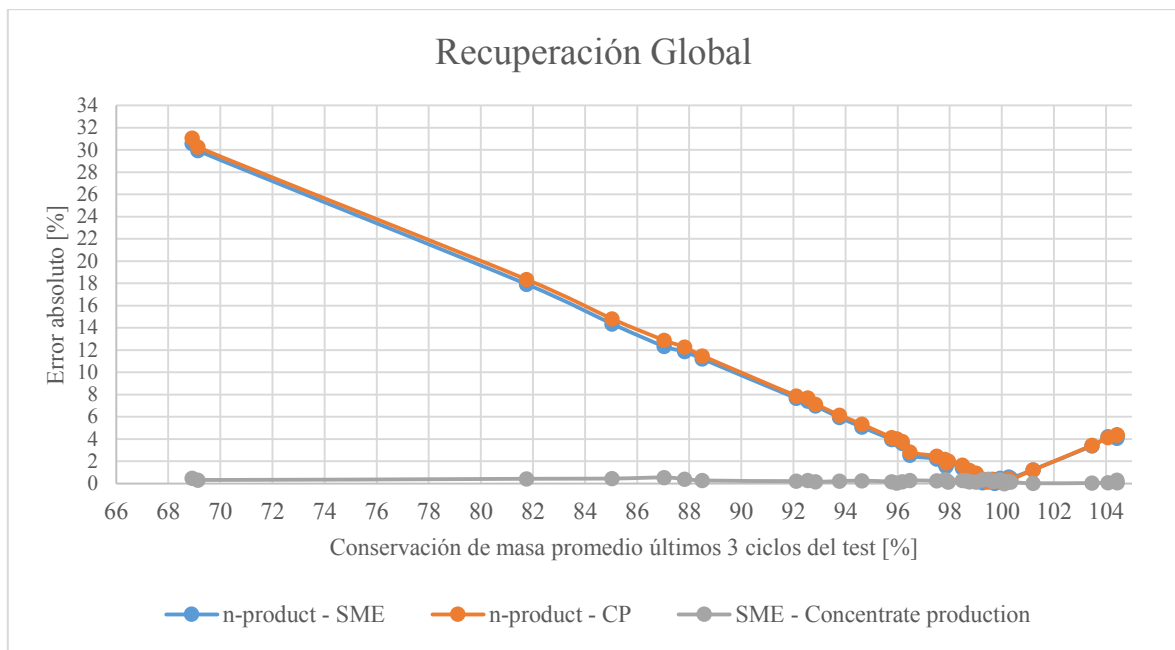


Figura 43. Error absoluto entre metodologías de proyección para recuperación de molibdeno del circuito global en función de la conservación de masa promedio de los últimos 3 ciclos de cada test.

La curva de error absoluto para recuperación global de molibdeno proyectada muestra que cuando el test se encuentra en el rango mencionado anteriormente ( $100\% \pm 2\%$ ), la diferencia absoluta de recuperación global es menor a 2% entre las metodologías utilizadas.

Se observa además que en todos los casos las proyecciones realizadas mediante las metodologías *SME* y *Concentrate Production* no se diferencian de manera significativa, independiente de la estabilidad del test. Esto se debe a que en ambas metodologías las proyecciones se realizan en base a promedios, pero bajo supuestos diferentes.

En base a los gráficos mostrados y al análisis realizado, es posible aseverar que la estabilidad del test es una condición necesaria y primordial que un Test de Ciclo Cerrado debe cumplir para validar la proyección metalúrgica que caracteriza el potencial comportamiento que la muestra ensayada tendrá en una operación continua a las condiciones establecidas. En otras palabras, si el test no ha alcanzado el estado estacionario, el procesamiento de la muestra respectiva será inestable a esas condiciones y la proyección no se considera válida, independiente de la metodología de proyección utilizada.

En ello radica la importancia de determinar una manera de aumentar las probabilidades de que un test alcance el estado estacionario.

Que un test no alcance el estado estacionario quiere decir que las condiciones operacionales utilizadas para procesar la muestra mineral no fueron las adecuadas y, por tanto, que las corrientes recirculadas en el circuito *cleaner* provocan un comportamiento inestable del proceso.

En procesamiento de datos, este comportamiento inestable se ve reflejado en la recuperación ciclo a ciclo de la etapa *cleaner* calculada respecto a la alimentación efectiva a él y no a la alimentación fresca (concentrado *rougher*).

Para un análisis más claro, se muestra una tabla con la desviación estándar de la recuperación de la etapa involucrada en cada test.

Tabla 9. Conservación de masa y desviación estándar de recuperación de cada metal en circuito cleaner para cada prueba.

# Prueba	Cu		Fe		Mo	
	Conservación de masa [%]	Desviación estándar [%]	Conservación de masa [%]	Desviación estándar [%]	Conservación de masa [%]	Desviación estándar [%]
1	98,3	2,2	97,1	5,5	99,9	70,0
2	98,1	3,7	95,6	18,9	97,9	82,8
3	98,2	5,3	99,9	17,7	97,9	88,4
4	101,0	1,7	98,6	4,7	104,1	65,0
5	89,3	9,6	97,1	13,5	87,8	57,4
6	95,0	8,8	101,2	6,0	99,5	87,8
7	98,4	2,2	100,7	4,6	101,2	66,7
8	91,7	6,7	100,4	6,5	88,5	49,3
9	101,6	4,7	95,3	7186,1	103,5	75,7
10	96,5	6,4	98,9	18,1	99,7	76,3
11	98,9	3,3	99,0	49,6	96,0	96,8
12	95,7	6,8	97,4	3,9	99,6	56,6
13	101,1	2,0	96,9	8,9	104,4	54,6
14	95,4	7,0	96,4	16,3	96,2	75,5
15	99,6	4,4	100,9	3,3	98,5	44,5
16	95,6	5,3	98,6	3,9	92,5	59,9
17	97,4	3,4	98,0	5,5	93,8	69,6
18	100,4	2,6	100,4	4,6	99,3	81,7
19	99,8	4,1	96,9	7,7	92,8	44,7
20	99,7	3,1	100,5	4,9	100,1	76,7
21	87,6	6,6	97,3	5,0	87,0	44,5
22	93,5	9,0	97,5	13,5	98,8	74,5
23	96,5	4,3	94,5	32,1	100,3	72,4
24	98,0	2,4	102,7	5,7	99,0	76,0
25	93,8	6,6	101,5	3,9	92,1	72,6
26	98,6	4,0	101,3	13,3	97,5	59,5
27	101,5	2,4	98,9	4,0	96,5	60,5
28	97,9	2,7	102,5	5,0	100,1	79,5
29	99,5	1,1	100,2	4,1	103,9	80,1
30	96,7	4,7	100,6	9,3	98,6	66,2
31	82,7	7,9	94,0	7,0	81,8	38,9
32	89,2	8,1	95,4	12,0	69,1	57,8
33	99,3	2,5	104,2	6,3	100,3	66,3
34	84,7	11,6	98,6	5,0	85,0	51,7
35	98,7	3,4	100,7	10,0	100,1	67,5
36	93,0	7,0	97,8	9,8	94,6	51,4
37	84,0	7,4	95,9	7,8	68,9	33,2

<b>38</b>	90,7	9,2	98,3	3,3	95,8	62,9
<b>39</b>	98,4	<b>1,4</b>	98,3	4,8	97,8	56,9
<b>40</b>	97,1	3,2	101,0	18,8	98,7	63,8

En la tabla destacan aquellos valores de desviación estándar obtenidos en la etapa *cleaner* para recuperación de cobre en los cuales se alcanzó una estabilidad promedio mayor a 98%. Las pruebas con mejores valores de conservación de masa tienden a presentar menor desviación estándar en la recuperación *cleaner* ciclo a ciclo. Se entregan a continuación gráficos que buscan hallar una relación entre el estado estacionario y la desviación estándar de la recuperación *cleaner* a través de los ciclos.

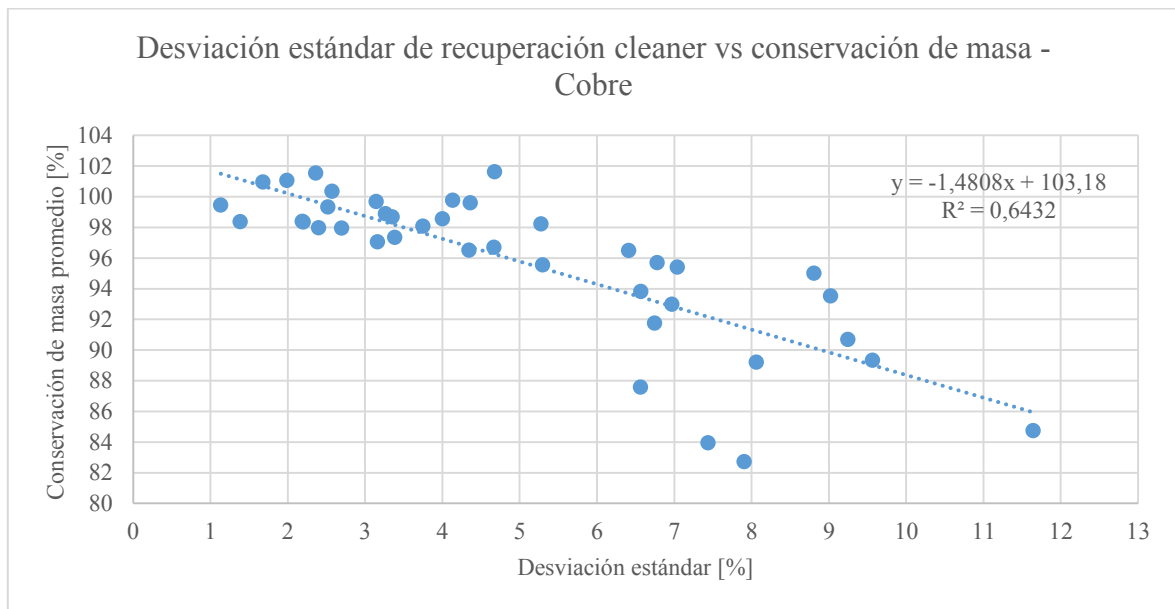


Figura 44. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de cobre en etapa *cleaner*.

Para el caso del cobre es posible rescatar del gráfico que para menor desviación estándar en la recuperación de la etapa *cleaner*, el test alcanza un valor de conservación de masa cercano al 100%, en particular para pruebas cuya desviación de recuperación *cleaner* ha sido menor a 3%.

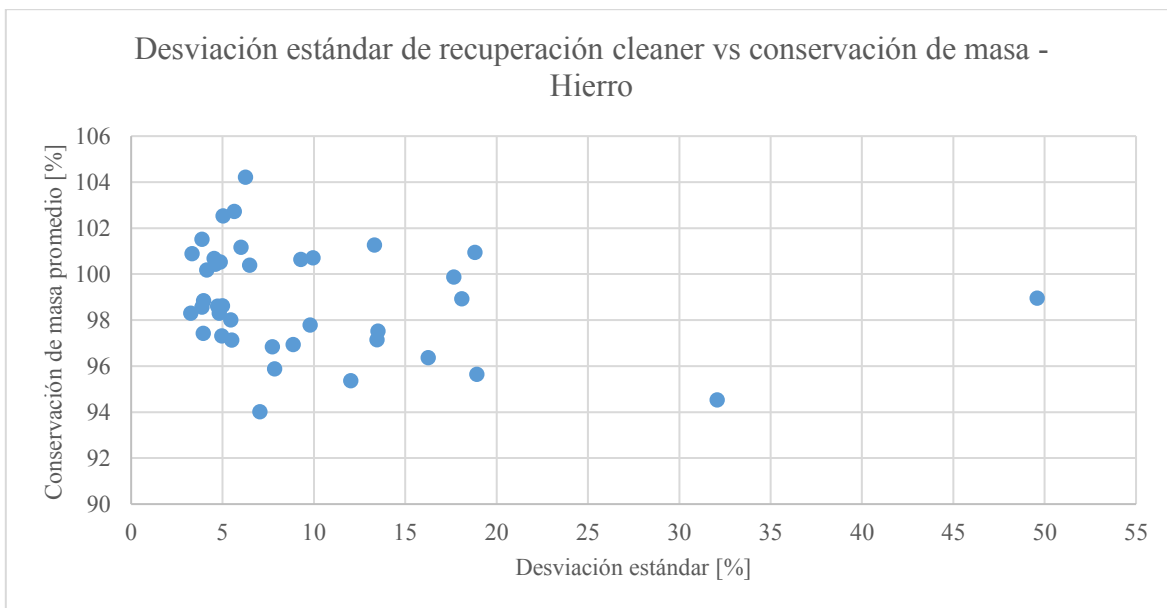


Figura 45. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de hierro en etapa cleaner.

En el caso del hierro es difícil realizar un análisis de este escenario, la conservación de masa del test no presenta una tendencia clara respecto a la desviación estándar de la recuperación *cleaner*. Aun así, es posible observar un grupo de pruebas con valores de conservación de masa cercanos o superiores a 98%, cuya desviación estándar es menor a 5%.

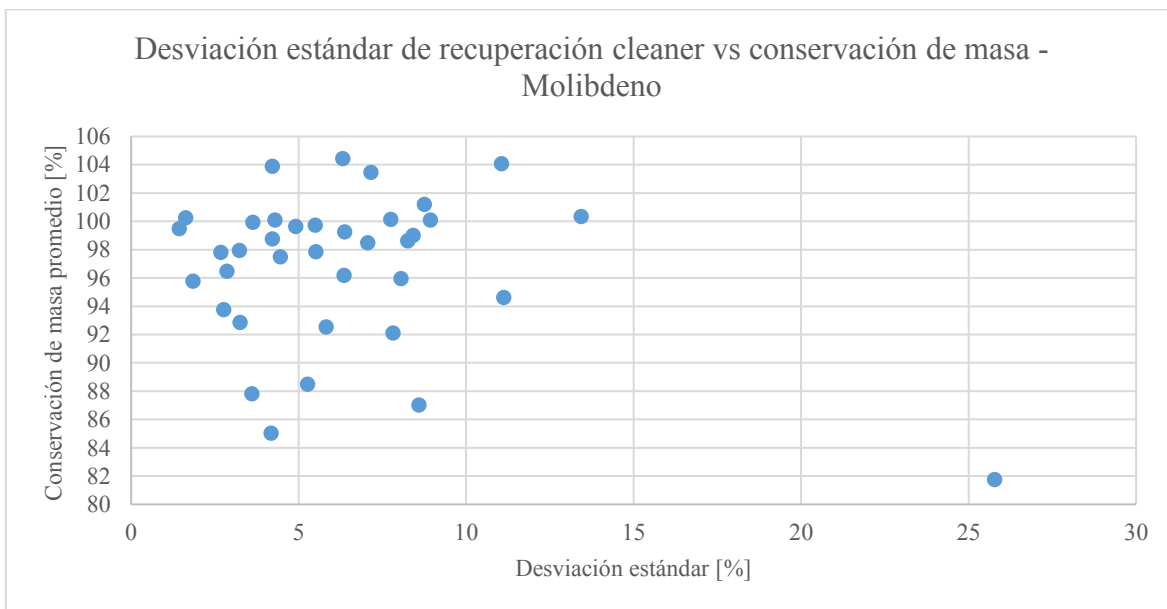


Figura 46. Conservación de masa promedio de los 3 últimos ciclos del test en función de la desviación estándar de la recuperación de molibdeno en etapa cleaner.

En el caso del molibdeno no se observa mayor influencia de la desviación en la etapa *cleaner* respecto a la estabilidad del test. Aun así, es posible distinguir que la mayor parte de las pruebas presentan desviación estándar de la etapa *cleaner* menor a 10%. No se observa una tendencia clara.

Aquellas pruebas que presentan alta variabilidad en la recuperación ciclo a ciclo de la etapa *cleaner* corresponden a pruebas que no logran la conservación de masa. Para mejorar las probabilidades de que una prueba alcance el 100%, la etapa debe ser estable a lo largo de los ciclos, lo cual puede ser controlado mediante el ajuste de las condiciones de operación a las cuales fue procesada la muestra. Para ello, es necesario tener claridad y la mayor cantidad de información posible respecto a las características de la muestra mineral y cómo ésta se ve afectada por las variables que dominan el proceso.

### 5.3.3 Conservación de masa para resultados reconciliados

Se evalúa el efecto de la reconciliación de datos en el estado estacionario por medio de la diferencia absoluta entre el promedio de conservación de masa en los 3 últimos ciclos de cada test, para cada metal.

#### Cobre

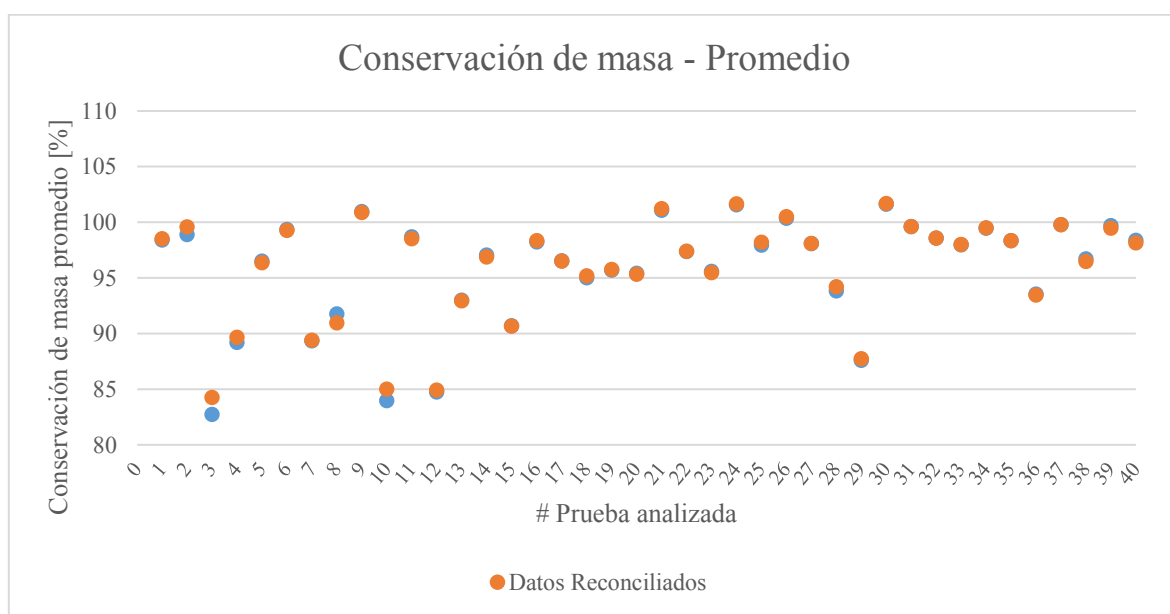


Figura 47. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de cobre medidas y reconciliadas.

No se observan diferencias significativas en la conservación de masa.

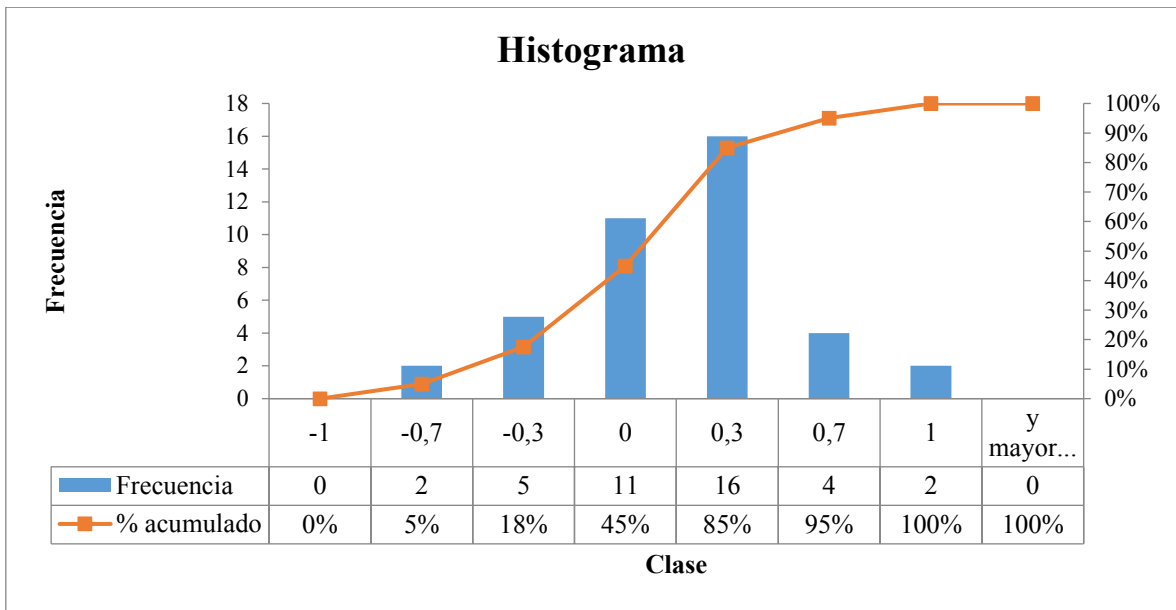


Figura 48. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de cobre en cada test.

En todas las pruebas se observa una variación absoluta dentro del rango de  $\pm 1\%$ , de las cuales el 80% se encuentra en el rango de  $\pm 0,3\%$ .

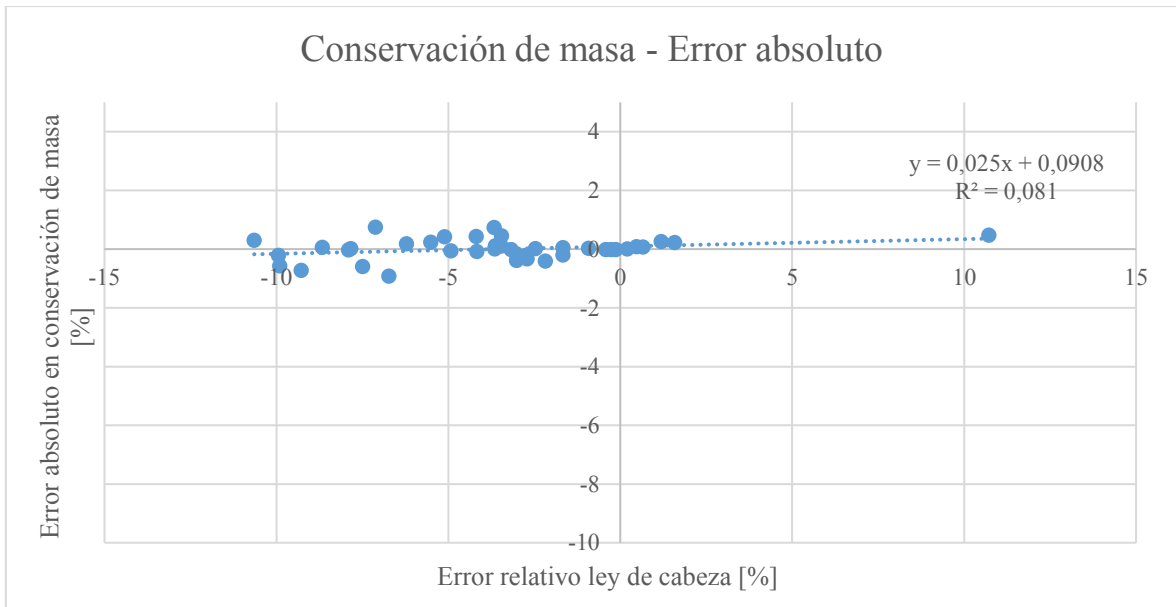


Figura 49. Error absoluto en conservación de masa de cobre promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza.

Además, se observa que no existe una relación directa entre el error relativo a la ley de cabeza y el error absoluto en la conservación de masa.

## Hierro

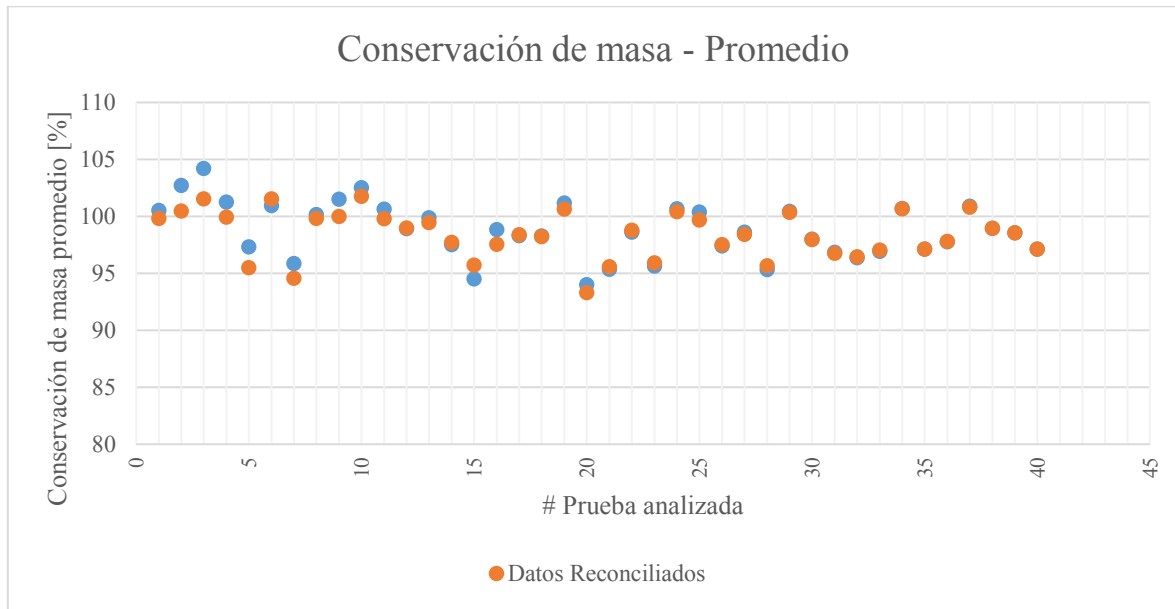


Figura 50. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de hierro medidas y reconciliadas.

No se observan diferencias significativas en la conservación de masa del test al reconciliar las leyes medidas de hierro.

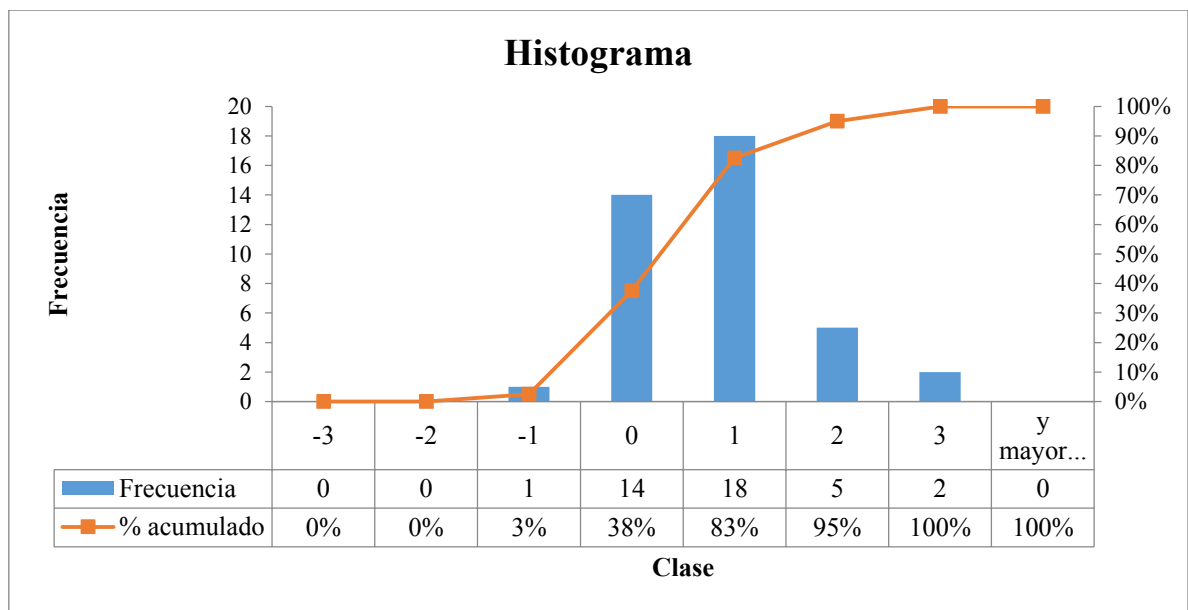


Figura 51. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de hierro en cada test.

El error absoluto con el que impacta la reconciliación de leyes a la conservación de masa de hierro se encuentra en el rango -1% y 3%, con un 80% entre  $\pm 1\%$ .



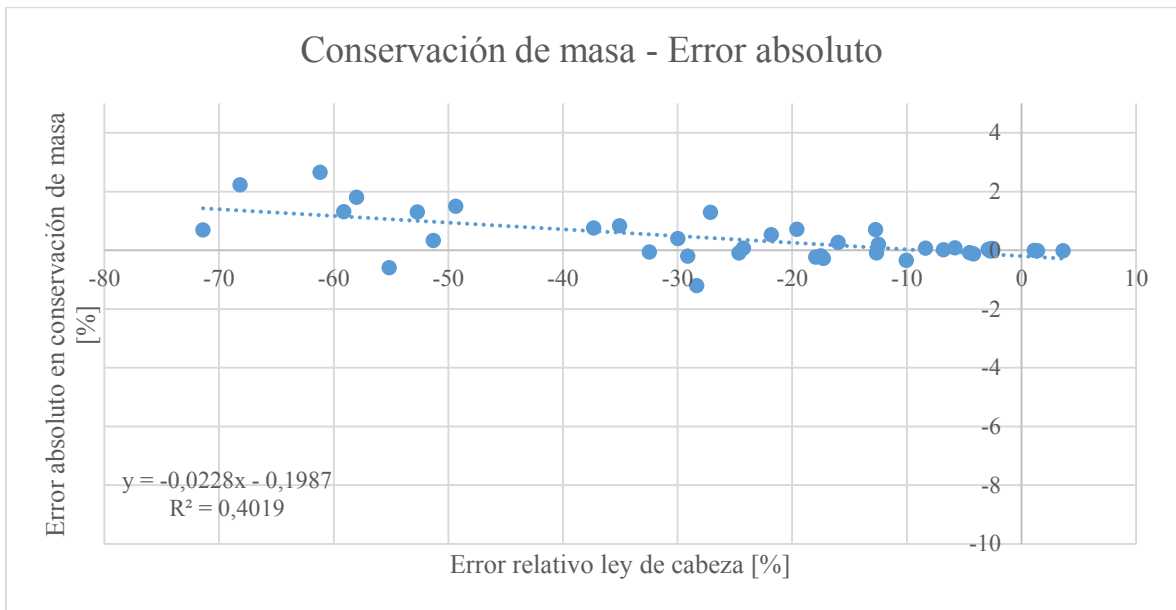


Figura 52. Error absoluto en conservación de masa de hierro promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza.

El error absoluto tiende a aumentar al ser mayor el error relativo de la ley de cabeza. Aun así, para error de cabeza de -30, el error absoluto se encuentra bajo 1,5%, mientras que para 60% de error relativo a la ley de cabeza, bajo 2%. Las diferencias no se consideran significativas y la tendencia aumenta levemente con el error relativo.

## Molibdeno

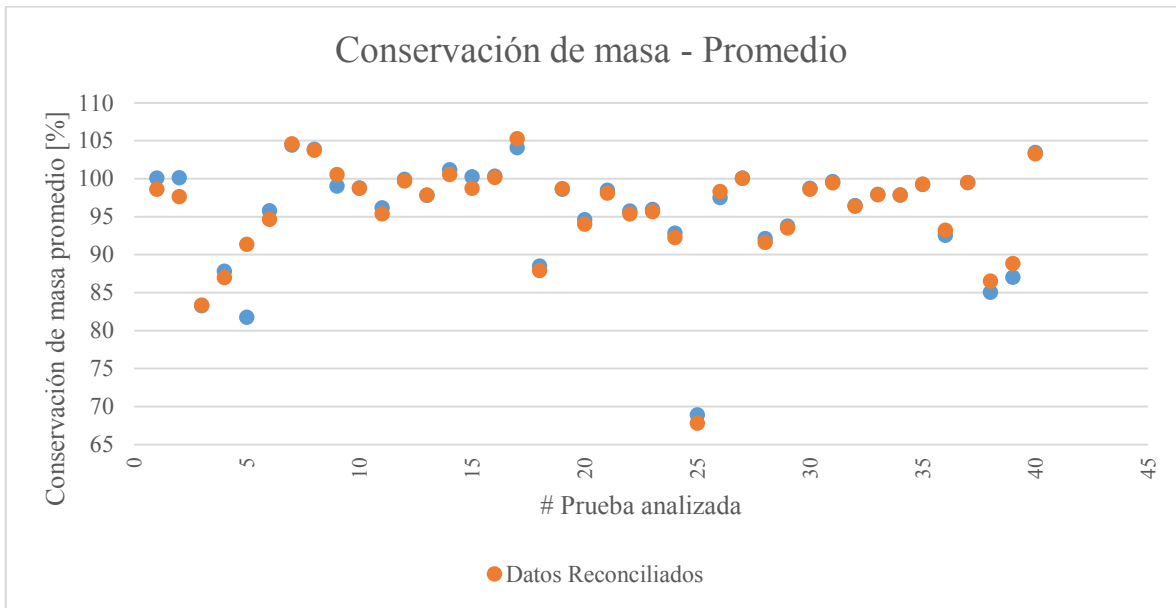


Figura 53. Promedio de conservación de masa de cobre de los últimos 3 ciclos de cada test calculado a partir de leyes de molibdeno medidas y reconciliadas.

En la figura 54 no se observa un impacto significativo de la reconciliación de datos en la conservación de masa de molibdeno promedio.

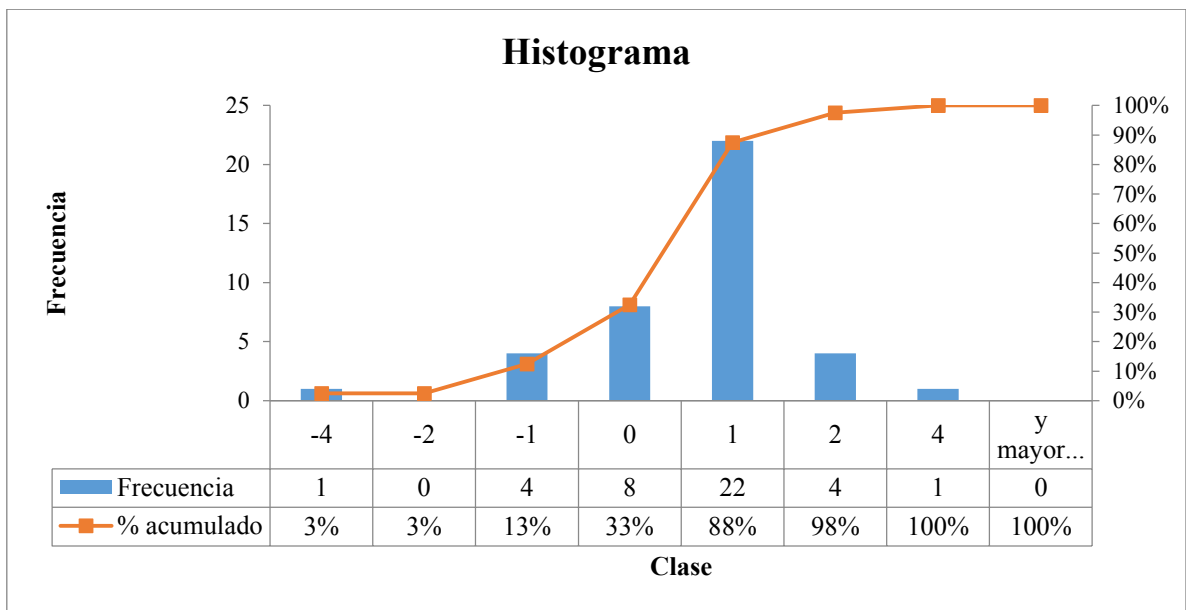


Figura 54. Error absoluto en el promedio de conservación de masa en los últimos 3 ciclos del test, al reconciliar las leyes de molibdeno en cada test.

El 95% de las pruebas presentaron error absoluto en conservación de masa de molibdeno entre -1% y 2%.

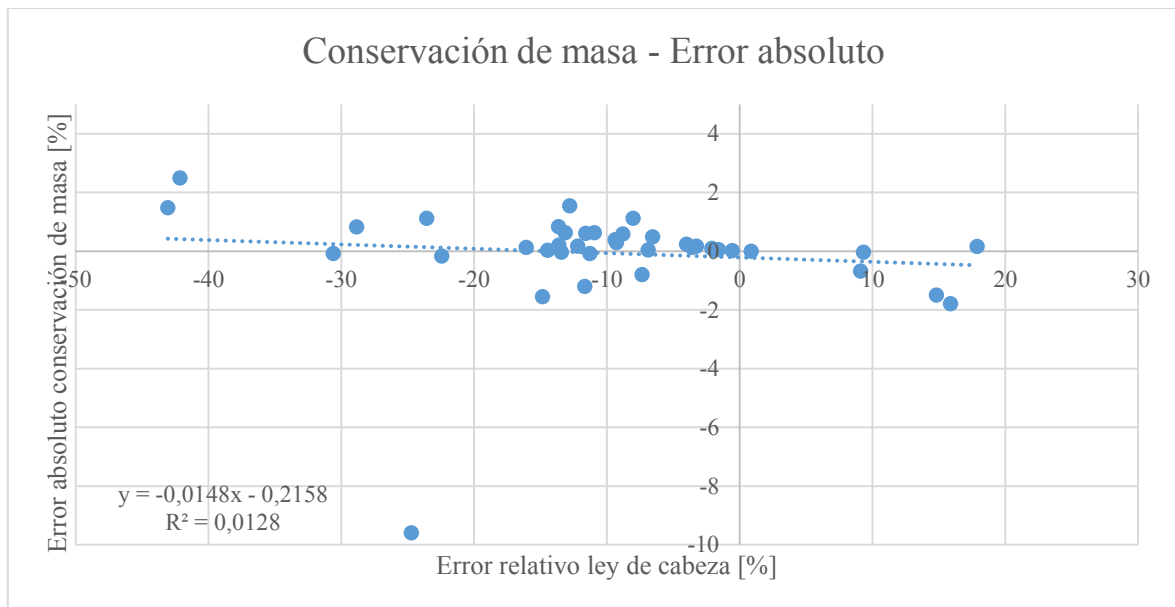


Figura 55. Error absoluto en conservación de masa de molibdeno promedio de los ciclos finales de cada test producto de la reconciliación de leyes en función del error relativo de ley de cabeza.

No se observa una tendencia clara del error absoluto entre conservación de masa de molibdeno al realizar la reconciliación respecto al error relativo de ley de cabeza.

En general, para los tres metales, la metodología de reconciliación de datos no impacta de manera significativa los valores de conservación de masa, por lo que se espera un bajo impacto de la metodología en la recuperación *cleaner*.

### 5.3.4 Proyección metalúrgica de resultados reconciliados

Se entregan gráficos que muestran el error absoluto entre las proyecciones de recuperación *rougher*, *cleaner* y global, calculadas a partir de las leyes medidas y de las leyes reconciliadas. Se observa el error absoluto en cada metodología de proyección para cada metal.

#### Cobre

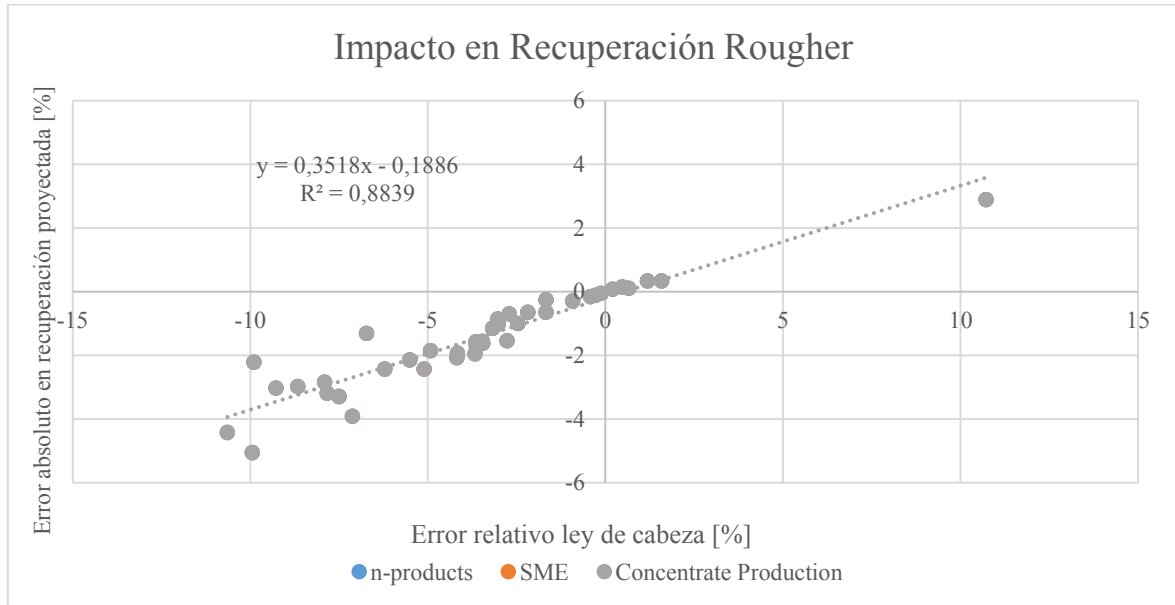


Figura 56. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre *rougher* para cada metodología.

Para las tres metodologías el impacto en la recuperación *rougher* causado por la reconciliación de datos es el mismo. Esto se explica pues en cada caso la recuperación *rougher* se proyecta con los resultados obtenidos de los 6 ciclos. Se observa que para pruebas con error relativo a la ley de cabeza de cobre en el rango  $\pm 5\%$ , el error absoluto de la recuperación proyectada es menor a 2%.

Este impacto se debe principalmente a que la reconciliación modifica preferentemente las leyes de relave *rougher*.

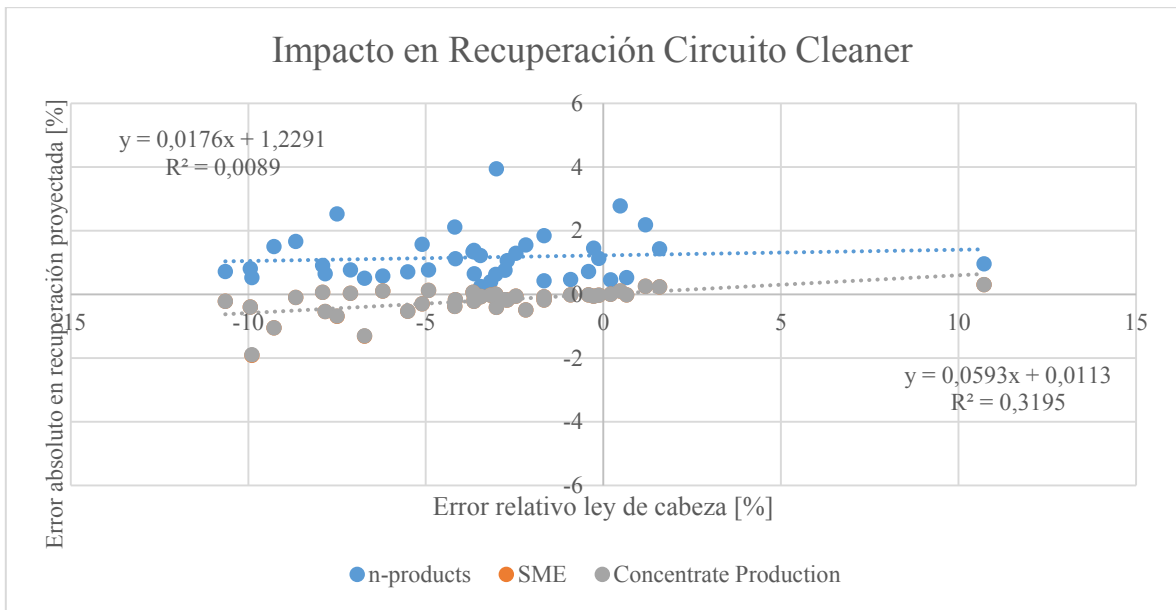


Figura 57. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre del circuito cleaner para cada metodología.

El impacto de la reconciliación de datos en la recuperación proyectada para el circuito *cleaner* es mayor para la metodología *n-product*, aun cuando gran parte de las pruebas se encuentran bajo el 2% de error absoluto. En cambio, *SME* y *Concentrate Production* se encuentran en el rango  $\pm 1\%$ . No se observa una tendencia clara respecto al error relativo a la ley de cabeza. El impacto es reducido debido a que la reconciliación no afecta de manera significativa las leyes de los productos involucrados en el cálculo de la recuperación *cleaner* proyectada.

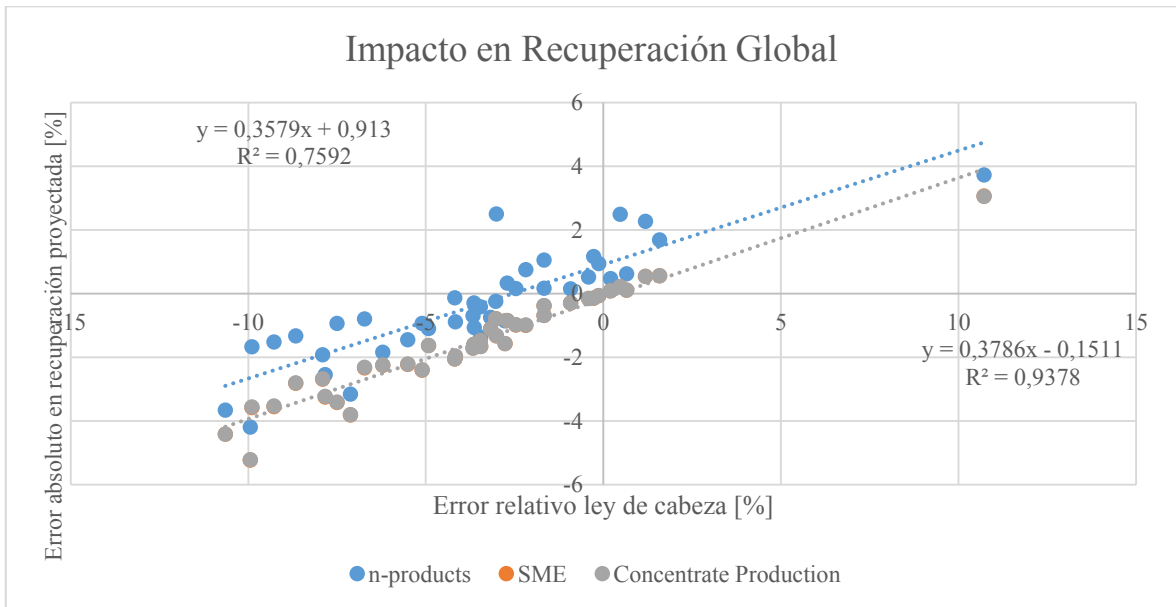


Figura 58. Error absoluto en proyección de recuperación de cobre global para cada metodología.

Se observan tendencias similares del impacto provocado por la reconciliación en las tres metodologías, aun cuando para *n-product* tiende a ser mayor. Para *SME* y *Concentrate Production*, pruebas con error relativo a la ley de cabeza en el rango de  $\pm 5\%$  presentan un error absoluto en la proyección de recuperación global de  $\pm 2\%$ .

## Hierro

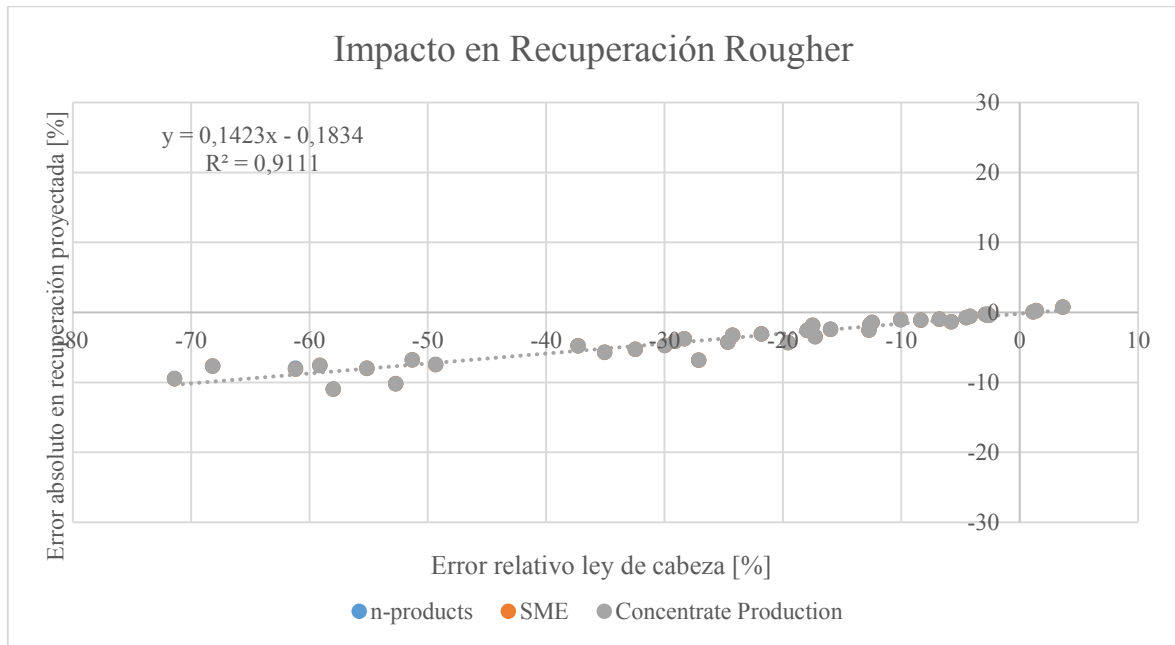


Figura 59. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro rougher para cada metodología.

Clara tendencia del error absoluto en recuperación proyectada causado por la reconciliación de leyes en función del error relativo a la ley de cabeza. Para pruebas con 30% de error relativo, se observa una variación absoluta de  $\pm 5\%$  en la recuperación proyectada.

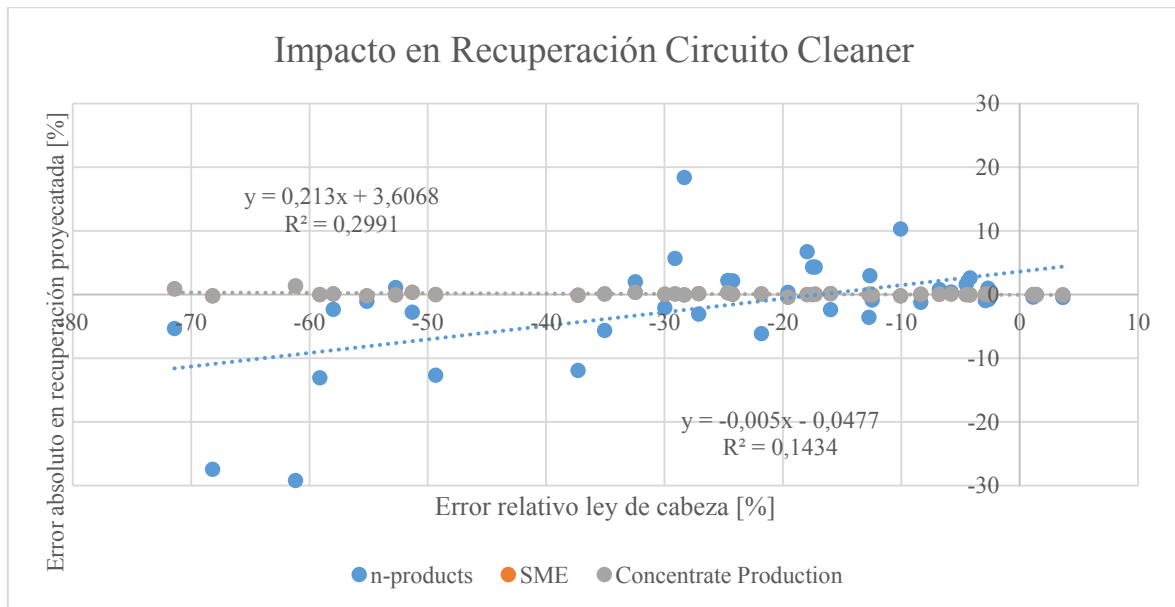


Figura 60. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro en circuito cleaner para cada metodología.

La variación absoluta en la proyección de recuperación *cleaner* es evidentemente más marcada para la metodología *n-product* que para las demás metodologías, en las cuales el error es prácticamente nulo. En consecuencia, *n-product* resulta ser una metodología sensible ante la reconciliación de leyes de hierro.

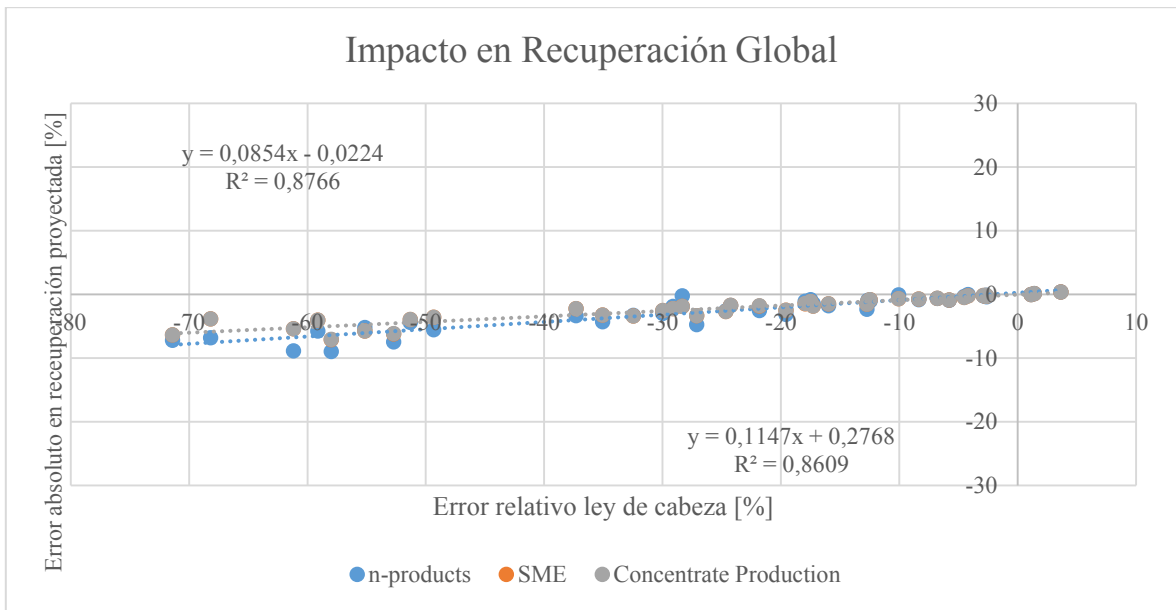


Figura 61. Error absoluto en proyección de recuperación de hierro global para cada metodología.

Según la tendencia observada para *SME*, por ejemplo, pruebas con error relativo de ley de cabeza cercano a 30% presentan error absoluto en la recuperación proyectada global entre 2% y 3%, mientras que para errores de cabeza cercanos o mayores a 50%, el error absoluto supera el 4% en las 3 metodologías, alcanzando un máximo de 7%.

## Molibdeno

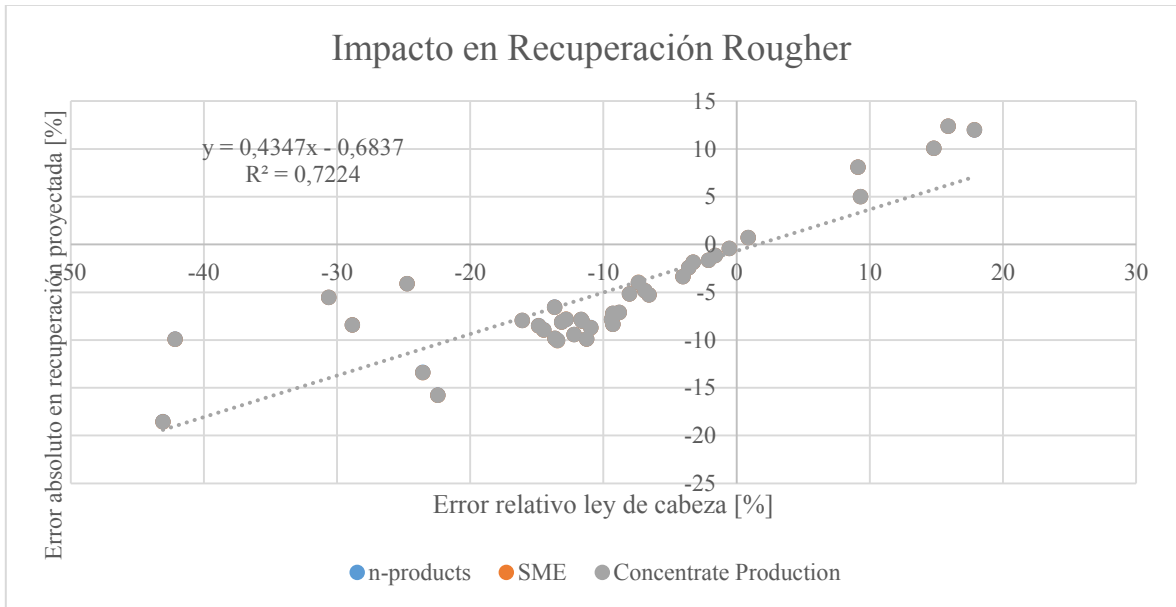


Figura 62. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno rougher para cada metodología.

Existe una evidente relación entre la proyección de la recuperación de la etapa rougher respecto al error de cabeza de molibdeno.

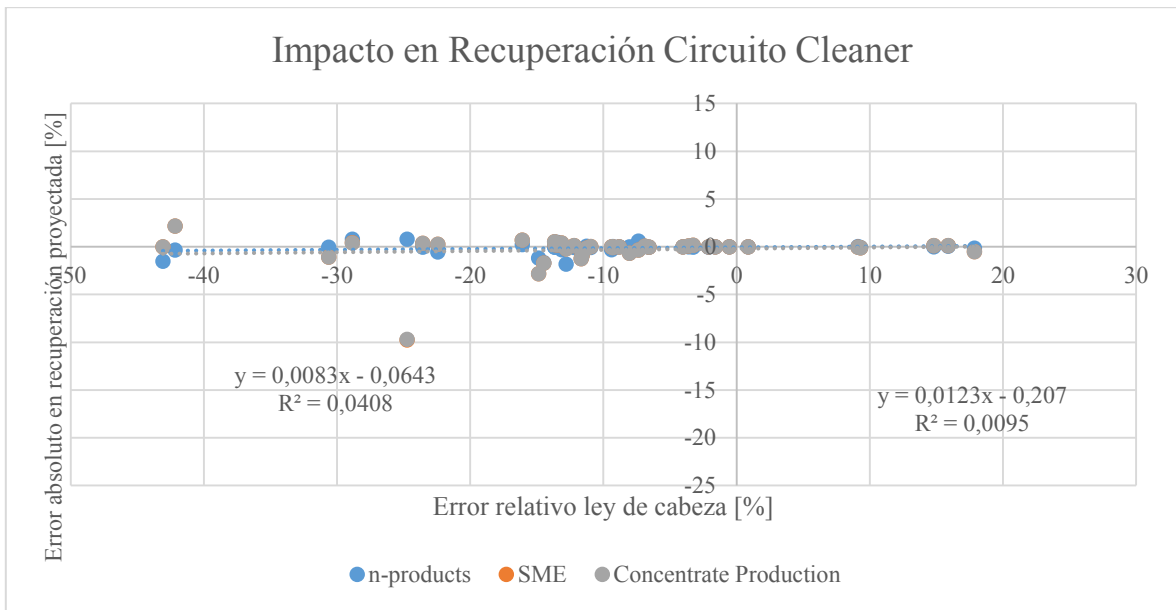


Figura 63. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno en circuito cleaner para cada metodología.

El impacto en la etapa cleaner para cada metodología de proyección de resultados es prácticamente nulo.

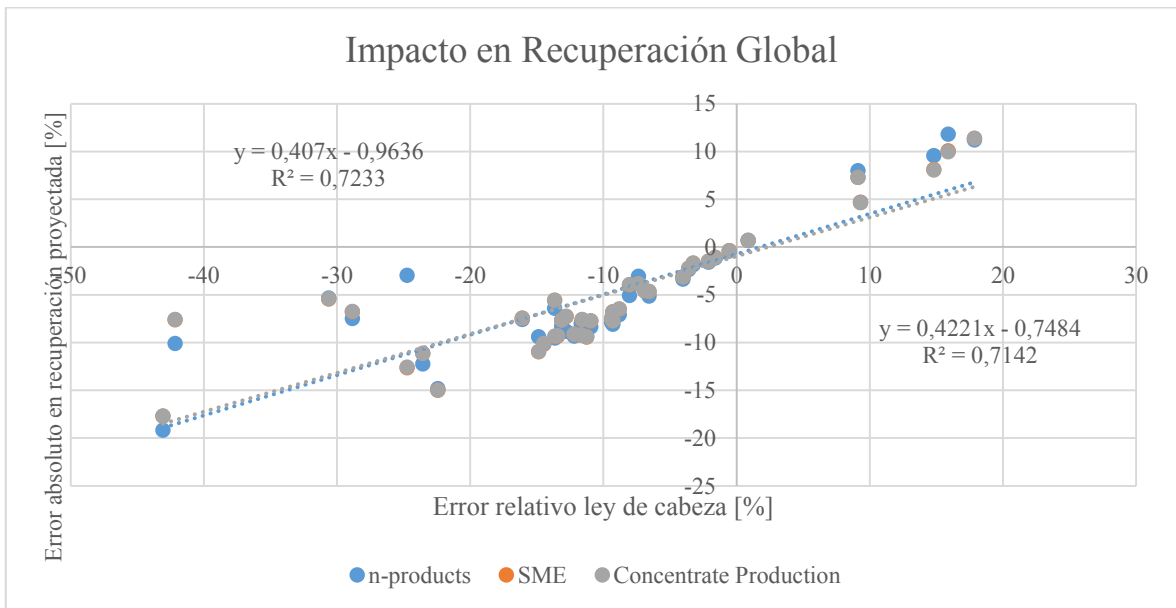


Figura 64. Error absoluto en proyección de recuperación de molibdeno global para cada metodología.

Se observa una clara tendencia del error absoluto en la recuperación *rougher* proyectada en función del error relativo a la ley de cabeza. Cabe mencionar que para los 3 métodos las variaciones son similares. Pruebas con 10% de error relativo a la ley de cabeza muestran variación en la proyección menor a 5%, mientras que pruebas con 40% de error relativo podrían alcanzar diferencias de hasta 20% de error absoluto en la proyección.

Las diferencias observadas entre las proyecciones de resultados medidos y reconciliados están fuertemente ligadas al modelo de error que se utiliza en la reconciliación de datos

La proyección metalúrgica de resultados reconciliados permite evaluar la calidad y representatividad de las proyecciones realizadas en base a las leyes medidas. De la misma forma en que se comparan los valores proyectados con las diferentes metodologías, que convergen al acercarse al estado estacionario, las proyecciones metalúrgicas de ambos escenarios son más cercanas mientras menor sea el error relativo a la ley de alimentación.

En base a las leyes reconciliadas, es posible observar el impacto que un alto error relativo a la ley de cabeza puede generar en las proyecciones metalúrgicas.

## 5.4 Predicción de resultados a partir de TCA

Se entregan tablas cuyo contenido muestra el promedio del error relativo y de la raíz de error cuadrático medio obtenido entre los resultados del TCC simulado y el TCC experimental, para masas, leyes y proyecciones metalúrgicas.

### 5.4.1 Masa

*Tabla 10. Error relativo promedio y RMSE promedio entre masa medida en TCC experimental y masa simulada, para cada producto en el test.*

<b>Producto</b>	<b>RMSE [g]</b>	<b>Error Relativo [%]</b>
<b>Relave rougher</b>	19,39	0,82
<b>Concentrado final</b>	2,65	5,94
<b>Relave scavenger</b>	14,65	5,88
<b>Concentrado scavenger</b>	2,13	25,96
<b>Relave cleaner</b>	4,53	25,80

De la tabla se desprende que la estimación de las masas de productos terminales presentan bajos errores relativos entre los valores experimentales y los simulados, en particular para relave *rougher*, concentrado final y relave *scavenger*. Es posible notar que el error relativo de los productos recirculados o intermedios es alto, pues corresponden a valores puntuales del último ciclo del test.

### 5.4.2 Leyes

#### Ley de Cobre

*Tabla 11. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de cobre medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test.*

<b>Producto</b>	<b>RMSE [%]</b>	<b>Error relativo [%]</b>
<b>Relave rougher</b>	0,006	6,55
<b>Concentrado final</b>	1,478	4,98
<b>Relave scavenger</b>	0,037	31,49
<b>Concentrado scavenger</b>	0,937	69,84
<b>Relave cleaner</b>	0,630	39,78



Se observa que la predicción alcanza un buen nivel de precisión para relave *rougher* y concentrado final. Las variaciones obtenidas en las leyes de los demás productos presentan errores relativos altos, aun cuando la variación neta promedio es menor a 1% en ley.

### Ley de Hierro

Tabla 12. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de hierro medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test.

<b>Producto</b>	<b>RMSE [%]</b>	<b>Error relativo [%]</b>
<b>Relave rougher</b>	0,118	5,31
<b>Concentrado final</b>	1,581	4,79
<b>Relave scavenger</b>	0,720	5,15
<b>Concentrado scavenger</b>	1,085	12,94
<b>Relave cleaner</b>	0,857	9,60

Nuevamente, los productos con mayor error relativo corresponden a aquellos que son intermedios o recirculados, pues solo se conoce la medición del último ciclo. Se considera precisa la predicción de resultados referente a los productos terminales, presentando errores relativos promedio cercanos a 5%.

### Ley de Molibdeno

Tabla 13. Error relativo promedio y RMSE promedio entre ley de molibdeno medida en TCC experimental y ley simulada, para cada producto en el test.

<b>Producto</b>	<b>RMSE [%]</b>	<b>Error relativo [%]</b>
<b>Relave rougher</b>	0,001	41,20
<b>Concentrado final</b>	0,081	18,47
<b>Relave scavenger</b>	0,006	25,13
<b>Concentrado scavenger</b>	0,050	30,35
<b>Relave cleaner</b>	0,014	15,31

En el caso de las leyes de molibdeno, la simulación entrega altos errores relativos en todos los productos, principalmente dado que la magnitud de las leyes de molibdeno es mucho menor respecto a los otros metales analizados, por lo que la precisión del método de análisis utilizado también lo es.

Es claro que mientras menos precisa sea la medición, menos precisa es entonces la simulación de resultados. Por esta razón, las predicciones de leyes de cobre son más precisas que de las leyes de hierro, y ambas, más que las leyes de molibdeno.

### 5.4.3 Proyección metalúrgica

Se analiza la precisión del modelo de simulación para predecir los resultados proyectados a partir de la metodología *SME*. Se comparan los valores proyectados de recuperación *rougher*, global y del circuito *cleaner* a partir de los resultados obtenidos en el TCC simulado con los del TCC experimental, para los tres metales.

#### Cobre

Tabla 14. Proyección metalúrgica de recuperación de cobre. TCC simulado y TCC experimental.

ID TEST	ROUGHER [%]		CLEANER [%]		GLOBAL [%]	
	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp
_025	82,74	83,78	93,74	97,23	77,56	81,46
_029	89,82	89,68	98,19	97,41	88,19	87,35
_045	92,09	91,50	98,10	97,52	90,34	89,24
_098	84,86	83,97	97,66	98,59	82,87	82,79
_067	90,81	91,59	98,95	98,52	89,86	90,23
_076	91,25	92,12	97,37	95,31	88,85	87,80
_147	92,11	92,29	98,56	95,90	90,78	88,51
_154	94,50	94,08	98,83	97,17	93,39	91,42
<b>RMSE</b>	<b>0,69</b>		<b>1,88</b>		<b>1,85</b>	

Se observa que la simulación predice con buena precisión las recuperaciones obtenidas en el TCC experimental. Como se observa de la tabla, la predicción proyectada de recuperación global se diferencia en promedio 1,85% del valor proyectado a partir del test experimental.

#### Hierro

Tabla 15. Proyección metalúrgica de recuperación de hierro. TCC simulado y TCC experimental.

ID TEST	ROUGHER		CLEANER		GLOBAL	
	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp
_025	21,86	21,87	44,00	43,72	9,62	9,56
_029	57,45	56,26	36,22	33,36	20,81	18,77
_045	36,62	36,51	47,75	45,57	17,49	16,64
_098	29,91	29,56	41,96	44,60	12,55	13,18
_067	48,30	51,35	54,68	53,58	26,41	27,51
_076	40,96	41,82	35,15	27,31	14,40	11,42
_147	47,19	47,59	47,06	47,21	22,20	22,47
_154	60,07	60,21	29,21	25,75	17,55	15,50
<b>RMSE</b>	<b>1,22</b>		<b>3,44</b>		<b>1,57</b>	

La predicción de las recuperaciones proyectadas de hierro también es considerada precisa al observar de la tabla que la recuperación global proyectada de la simulación se diferencia en promedio en 1,57% del valor obtenido del TCC experimental.

## Molibdeno

Tabla 16. Proyección metalúrgica de recuperación de molibdeno. TCC simulado y TCC experimental.

ID TEST	ROUGHER		CLEANER		GLOBAL	
	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp	TCC sim	TCC exp
_025	61,56	56,83	53,50	73,99	32,93	42,05
_029	81,12	67,74	91,92	92,76	74,57	62,83
_045	65,66	68,35	86,25	93,95	56,64	64,21
_098	68,56	74,73	79,36	92,92	54,41	69,43
_067	59,56	57,22	89,05	89,89	53,04	51,43
_076	80,58	74,98	91,04	88,61	73,36	66,44
_147	83,91	81,96	90,57	92,53	76,00	75,84
_154	86,57	80,55	91,94	92,06	79,59	74,15
<b>RMSE</b>	<b>6,36</b>		<b>9,18</b>		<b>8,55</b>	

La predicción baja considerablemente su nivel en los resultados proyectados de molibdeno. La recuperación global proyectada alcanza un valor de RMSE de 8,5% de diferencia entre los resultados para cada escenario.

Predecir resultados experimentales con cierto nivel de precisión entrega una herramienta que permite realizar una evaluación previa de aquellas condiciones operacionales que se consideran adecuadas para un óptimo desempeño del test de ciclo cerrado.

El modelo de simulación en base a Split Factor obtenido a partir de los resultados de TCA se considera una buena herramienta para tener una visión preliminar del potencial desempeño que un Test de Ciclo Cerrado experimental podría presentar para la misma muestra bajo las mismas condiciones.

La simulación representa el caso ideal en que no existe variación en la recuperación del circuito cleaner respecto a la alimentación efectiva (Concentrado rougher + recirculaciones) entre los ciclos.

Es posible dar más precisión a la simulación mientras más información se posea sobre el proceso y mientras más confiable ésta sea. Dependerá entonces de los supuestos realizados sobre el proceso y la representatividad de la información que los respalda.

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

En base a los resultados y al análisis desarrollado en el capítulo anterior se concluye lo siguiente:

- Realizar el balance de masa ciclo a ciclo permite tener una visión clara sobre el transporte de material a lo largo del proceso. Con ello, es posible detectar aquellas mediciones cuyo valor genera comportamientos anómalos en el balance, como lo es presentar valores negativos.
- Calcular el balance ciclo a ciclo permite a la vez tener una visión clara de lo que ocurre con el material recirculado a través de los ciclos, así también de lo que ocurre con las recuperaciones y la conservación de masa en ellos.
- En base a los resultados obtenidos al aplicar la metodología de reconciliación de datos experimentales se concluye lo siguiente:
  - El error relativo entre las leyes reconciliadas y medidas de relave *rougher* es mayor que el de los demás productos de las pruebas en los 3 metales, lo que se traduce en mayor error absoluto entre las recuperaciones proyectadas de dicha etapa al aplicar la metodología de reconciliación. Este comportamiento está directamente relacionado al modelo de error empleado en la reconciliación y al error relativo a la ley de cabeza. Pruebas con error relativo a la ley de cabeza de cobre menor a 5% presentan error absoluto entre proyecciones de recuperación *rougher* menor a 2% en las tres metodologías de cálculo.
  - Al ser menor el error relativo entre leyes reconciliadas y medidas en los demás productos, la recuperación proyectada del circuito *cleaner* no se ve afectada de manera significativa con la reconciliación. Esto se traduce también en un bajo impacto en la conservación de masa promedio en las pruebas. En particular, el error absoluto entre las proyecciones se encuentra dentro del rango  $\pm 1\%$ . La metodología de proyección *n-product* es la que presenta mayor sensibilidad ante la reconciliación, mientras que *SME* y *Concentrate Production* se mantienen prácticamente invariantes al aplicar la metodología.
  - La diferencia entre proyecciones metalúrgicas de recuperación global de cobre alcanza un valor máximo de  $\pm 4\%$  para pruebas con error relativo a la ley de cabeza en el rango  $\pm 10\%$  y menores a  $\pm 2\%$  para error relativo a la ley de cabeza en el rango  $\pm 5\%$ . La menor variación se encuentra en el hierro, donde un error relativo a la ley de cabeza menor a 30% genera un error absoluto en la proyección de recuperación global menor a 3%, con un máximo de 8% para error relativo a la ley de cabeza de 70%. El mayor impacto lo lleva el molibdeno, que presenta errores absolutos en el rango  $\pm 5\%$  para pruebas con error relativo de ley de cabeza menor al 10%, alcanzando incluso un 20% de error absoluto en pruebas con error relativo a la ley de cabeza de 40%.
- Se concluye que la metodología de reconciliación de datos no modifica de manera significativa la ley de los productos. En efecto, guarda estrecha relación con el modelo de error proporcionado por el laboratorio químico, el cual permite aplicar la metodología de reconciliación de datos para generar una aproximación de lo que sería el proceso al alimentar la cantidad de metal a partir de la ley medida, sin modificar las variables de manera significativa y cerrando exitosamente el balance de metales.

- Efectivamente es posible evaluar el criterio de validación de resultados asociado al error relativo a la ley de cabeza al observar la diferencia absoluta entre las proyecciones metalúrgicas luego de imponer como restricción en la reconciliación que el error relativo a la ley de cabeza sea cero. Es posible establecer un criterio a partir de la diferencia entre las proyecciones metalúrgicas del el cálculo con las mediciones sin reconciliar y con los datos reconciliados. Para que el escenario reconciliado sea considerado válido, se debe definir previamente y con especial precisión el modelo de error a utilizar al aplicar la metodología.
- El estado estacionario corresponde a un criterio fundamental que respalda la validez de las proyecciones metalúrgicas a un circuito continuo. Pruebas en el rango de  $100\% \pm 2\%$  en conservación de masa de los tres metales presentan diferencias absolutas entre las proyecciones metalúrgicas menores a 2%. Se concluye que es posible establecer un criterio en base a la diferencia absoluta tolerable entre las proyecciones metalúrgicas, producto de la inestabilidad presentada en el test.
- Es posible alcanzar con mayor facilidad la conservación de masa en un test cuando la recuperación del circuito *cleaner* se mantiene estable a través de los ciclos. Pruebas con mayor desviación estándar en la recuperación de la etapa de limpieza suelen no alcanzar el estado estacionario. Pruebas con desviación estándar de recuperación de cobre en el circuito cleaner menor a 3% presentan conservación de masa mayor a 98%. La proyección metalúrgica de la etapa *rougher* no se ve afectada por la conservación de masa. Aun así, se recomienda mantener una variabilidad o desviación estándar reducida.
- Respecto a la predicción de resultados, la simulación de resultados de TCC experimental basada en la técnica de Split Factor entrega una aproximación precisa de las masas y leyes que resultan de un test de ciclo experimental.
- Es posible evaluar condiciones de operación mediante esta herramienta, pues al ejecutar TCA a diferentes condiciones permitiría simular los resultados de un TCC experimental en diferentes escenarios, previo a su ejecución, a modo de análisis preliminar de las condiciones y variables consideradas en la mineralogía de la muestra.

## Recomendaciones

- Al considerar como ley de alimentación la ley de cabeza calculada, el balance de finos cierra para cada metal. Se asume que los datos medidos no están sujetos a error y que el valor reportado es el correcto. Bajo este supuesto, es la ley medida aquella sujeta a error de medición, lo cual se contradice fuertemente con la práctica. En efecto, no es recomendable considerar como input un valor obtenido como resultados del test.
- Integrar en las planillas el balance de mineral y de cada metal ciclo a ciclo, permitiría detectar aquéllos que presenten valores negativos. Incluir junto a él la recuperación de cada etapa y la conservación de masa ciclo a ciclo para caracterizar de mejor manera la prueba.
- Se recomienda integrar en el reporte de resultados leyes reconciliadas que cierran el balance para la ley de cabeza medida, junto a las proyecciones metalúrgicas para comparar con las proyecciones realizadas a partir de los datos medidos.
- Sugerencias al modelo de error: utilizar técnicas de análisis químico con mayor precisión en mediciones de ley de hierro y de molibdeno. Utilizar el modelo de error asociado a ellas como criterio.
- Para el cálculo de las proyecciones metalúrgicas, se recomienda utilizar las metodologías *SME* o *Concentrate Production*.

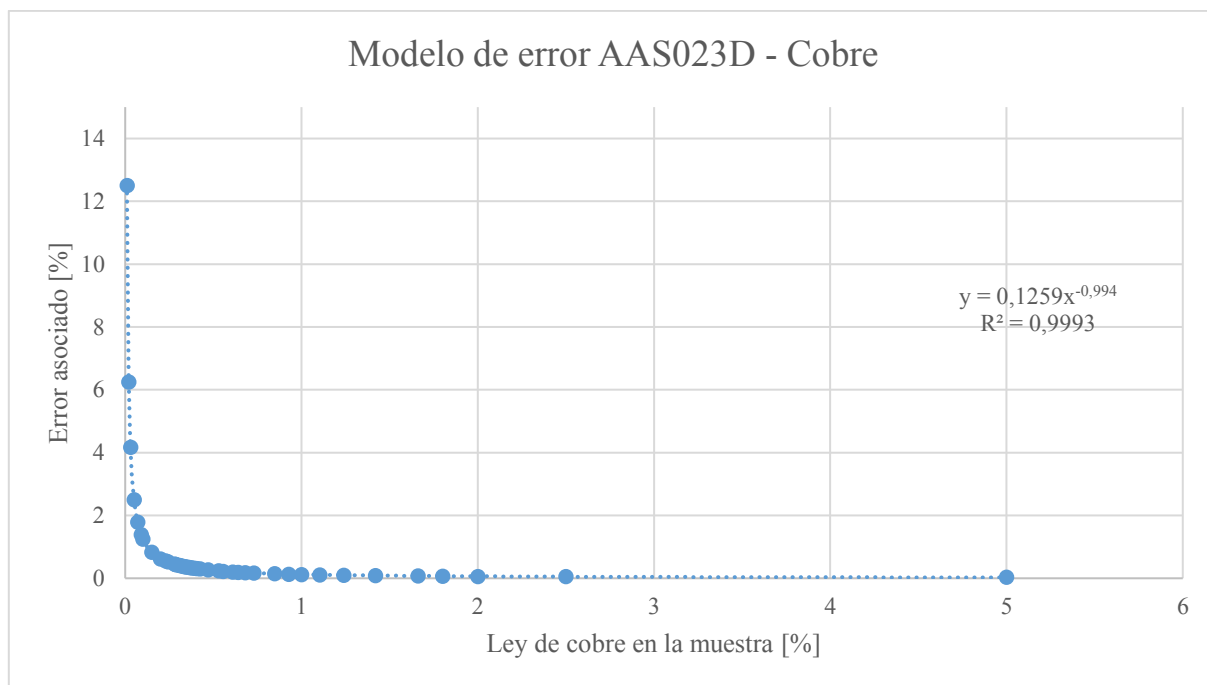
- Se recomienda, previo a la ejecución de un test de ciclo cerrado, realizar un test de ciclo abierto. Con los resultados de éste, simular los resultados de un test de ciclo cerrado para predecir estimaciones de lo que un eventual test de ciclo experimental a dichas condiciones podría entregar.

## 7 Bibliografía

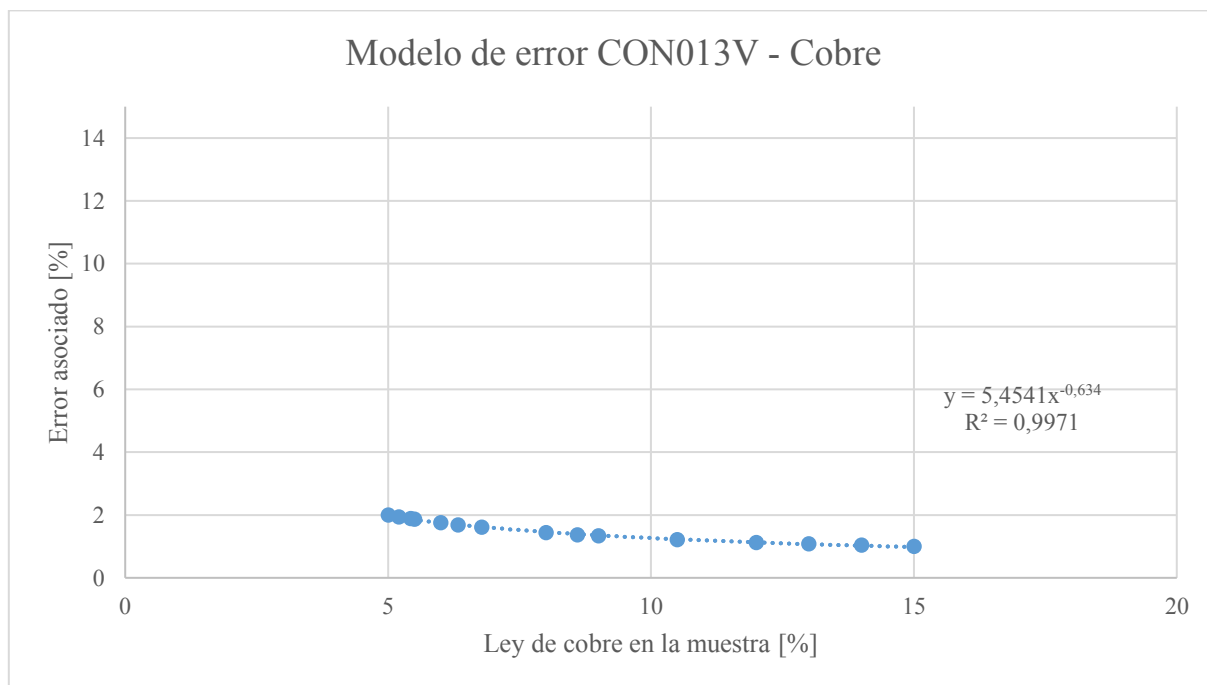
- Agar, G. E. (2000). Calculation of Locked Cycle Flotation Test Results. *Minerals Engineering*.
- Finch, J., & Wills, B. A. (2015). Froth Flotation. En J. Finch, & B. A. Wills, *Wills' Mineral Processing Technology, 8th Edition*.
- Kracht G., W. (2011). *Apunte del curso MI5021 Ingeniería del procesamiento de minerales*.
- Michaud, D. (17 de Julio de 2015). *911metallurgist.com*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/blog/pruebas-de-ciclo-cerrado-y-su-procedimiento>
- Narasinham, S., & Jordache, C. (2000). The Importance of Data Reconciliation and Gross Error Detection. En S. Narasinham, & C. Jordache, *Data Reconciliation & Gross Error Detection*.
- Nishimura, S., Hirosuke, H., & Jinnai, K. (1989). Analytical Evaluation of Locked Cycle Flotation Tests. *International Journal of Mineral Processing*.
- Ounpuu, M. (2001-15). *Was that locked cycle test any good?*
- SGS.cl. (Abril de 2018). Obtenido de <https://www.sgs.cl/es-es/mining/metallurgy-and-process-design/unit-operations-and-metallurgical-services/flotation/locked-cycle-test>
- Teorías modernas de flotación. (1986). En J. Sepúlveda, & L. Gutiérrez, *Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática* (pág. 186). Santiago, Chile.
- Vinnett, L., Jaques, A., Alvarez-Silva, M., & Waters, K. (2018). Incorporating the covariance effect in modelling batch flotation kinetics. *Minerals Engineering*, 26-37.

## 8 Anexo

### Modelo de error

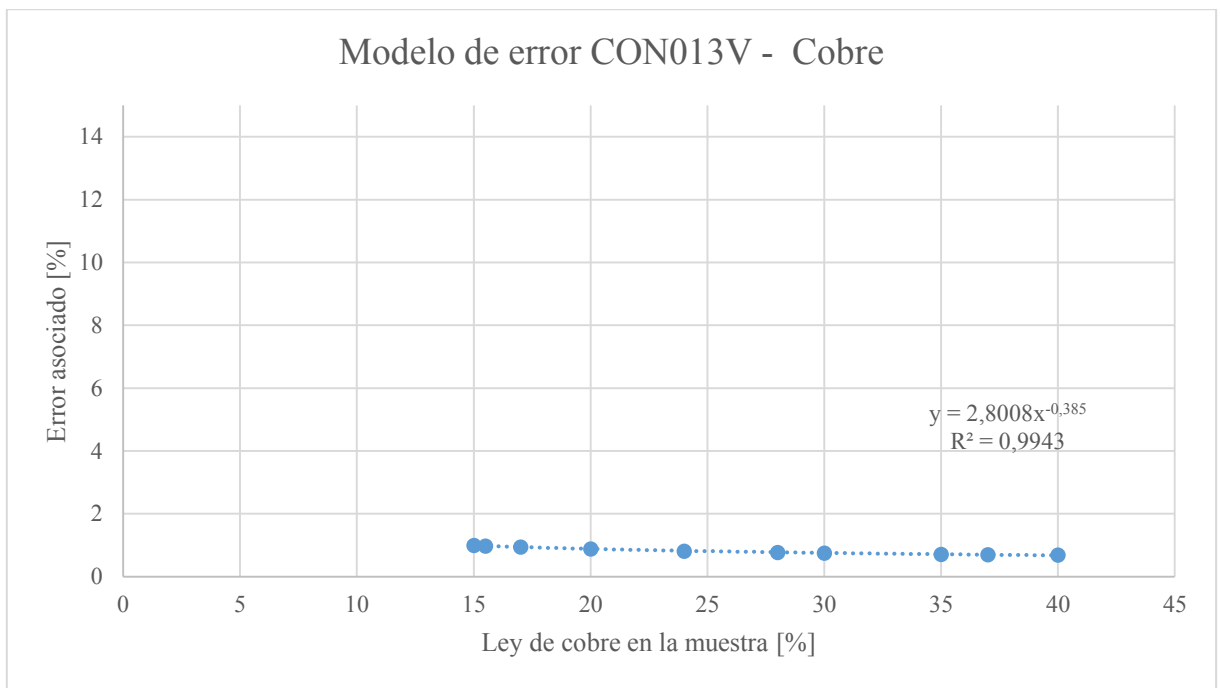


Anexo 1. Modelo de error para análisis de leyes de cobre menores a 5%.

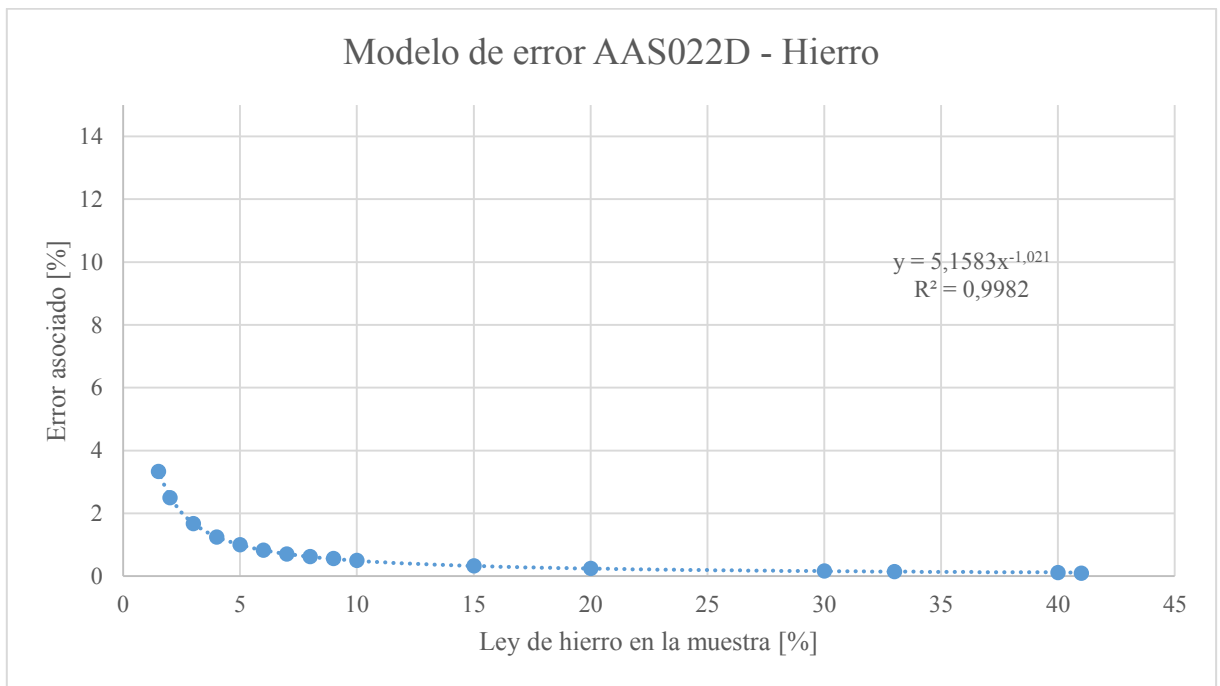


Anexo 2. Modelo de error para análisis de leyes de cobre entre 5% y 15%.

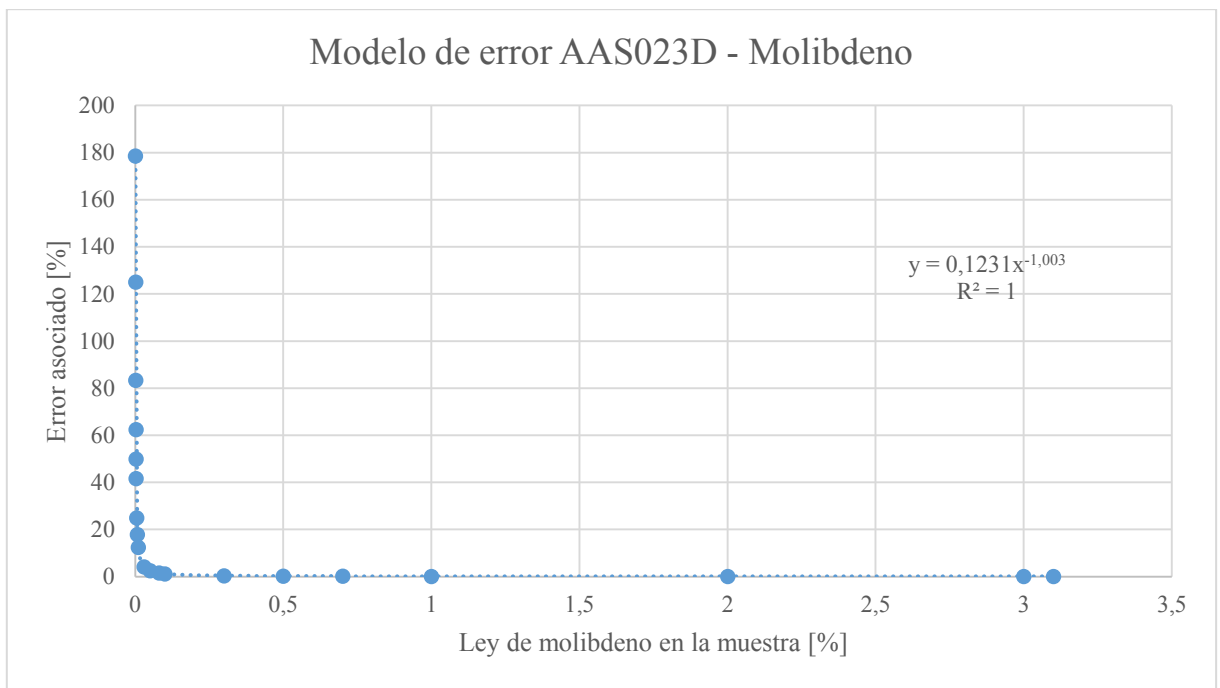




*Anexo 3. Modelo de error para análisis de leyes de cobre mayores a 15%.*



*Anexo 4. Modelo de error para análisis de leyes de hierro.*



Anexo 5. Modelo de error para análisis de leyes de molibdeno.