



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Aseguramiento de la validez de los resultados en los métodos de análisis por espectroscopia de absorción atómica para determinar CU y MO implementados en el laboratorio químico de una empresa minera

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Pamela Jannett REÁTEGUI BENITES

ASESOR

Mg. Máximo Medardo LEYVA CABALLERO

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Reátegui, P. (2025). *Aseguramiento de la validez de los resultados en los métodos de análisis por espectroscopia de absorción atómica para determinar CU y MO implementados en el laboratorio químico de una empresa minera*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Pamela Jannett Reátegui Benites
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43493195
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Máximo Medardo Leyva Caballero
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08207414
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8082-9959
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	José Manuel García Pantigozo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	6078851
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Fernando Suca Apaza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40375320
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.28. Innovaciones de Equipo de Laboratorio en Minería
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento

Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Empresa Minera en el sur del Perú País: Perú Departamento: Moquegua Provincia: Mariscal Nieto Distrito: Torata Latitud: -17.07657 Longitud: -70.844348
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2025 – Julio 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Química analítica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.07



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "IV Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2025-I", bajo la Presidencia del Ing. José Manuel García Pantigozo; Dr. Fernando Suca Apaza (Miembro) y el Mg. Máximo Medardo Leyva Caballero (Asesor); habiendo presentado para tal efecto el **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, titulado **Aseguramiento de la validez de los resultados en los métodos de análisis por espectroscopia de absorción atómica para determinar CU y MO implementados en el laboratorio químico de una empresa minera**, después de **SUSTENTADO Y APROBADO** el Trabajo de Suficiencia Profesional elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **REÁTEGUI BENITES, PAMELA JANNETT**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarla con la **NOTA** de:

Dieciocho
(LETRAS)

19
(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 16 de agosto del 2025


Ing. JOSÉ MANUEL GARCÍA PANTIGOZO
Presidente


Dr. FERNANDO SUCA APAZA
Miembro


Mg. MÁXIMO MEDARDO LEYVA CABALLERO
Asesor


Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química



CERTIFICADO DE SIMILITUD

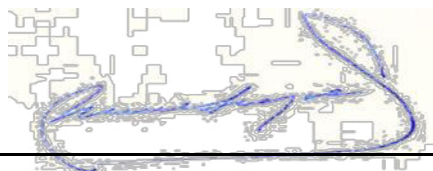
Yo, **Máximo Medardo Leyva Caballero** en mi condición de asesor con el Dictamen N°000001-2025-EPIQ-FQIQ/UNMSM del Trabajo de Suficiencia Profesional, cuyo título es: **Aseguramiento de la validez de los resultados en los métodos de análisis por espectroscopia de absorción atómica para determinar CU y MO implementados en el laboratorio químico de una empresa minera**, presentado por la bachiller: **Reátegui Benites, Pamela Jannett**, para optar el título Profesional de Ingeniera Química.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 26 de agosto del 2025

Firma del Asesor



Nombres y Apellidos del asesor Máximo Medardo Leyva Caballero

DNI: 08207414

DEDICATORIA

A mis padres Ronald e Irene, por ser mis ejemplos de perseverancia que me han guiado siempre; a mi esposo Gian, por acompañarme con paciencia, amor, aliento y confianza en cada paso que doy; y a mi hija Yaretzi, por ser mi fuerza y mi mayor fuente de inspiración para alcanzar mis metas.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
I. DATOS DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ EL TRABAJO.....	2
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO ..	3
2.1. Planteamiento del problema.....	3
2.2. Justificación	4
2.3. Objetivos.....	5
2.3.1 Objetivo general	5
2.3.2 Objetivos específicos	5
III. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	7
3.1. Antecedentes	7
3.2. Marco teórico.....	9
3.2.1. Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS).....	9
3.2.2. Control de calidad en laboratorios analíticos.....	10

3.2.3 Organización Internacional de la Normalización (ISO).....	11
3.2.3.1. ISO 17025	12
3.2.4. Aseguramiento de la validez de los resultados	12
3.2.5 Materiales de Referencia Certificados (MRC) en AAS	13
3.2.6. Monitoreo del desempeño analítico	14
3.2.6.1 Gráficos de control - Control estadístico de calidad.....	15
IV. PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN.....	17
V. PROCEDIMIENTO	18
VI. RESULTADOS	28
6.1 Veracidad.....	28
6.1.1. Gráficos de control.....	36
6.1.2 Análisis de t-student	66
6.1.3 Sesgo	68
6.2 Precisión	69
VII. CONCLUSIONES	87
VIII. RECOMENDACIONES.....	89
IX. LITERATURA CITADA	91
X. ANEXOS.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de espectroscopia óptica	10
Figura 2. Diagrama de preparación, análisis por AAS y desempeño analítico.....	19
Figura 3. Diagrama de preparación y análisis químico por AAS	23
Figura 4. Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel bajo.....	44
Figura 5. Gráfica de control %Mo para MRC de nivel bajo.....	45
Figura 6. Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel medio.....	53
Figura 7. Gráfica de control de %Mo para MRC de nivel medio.....	54
Figura 8. Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel alto.....	62
Figura 9. Gráfica de control de %Mo para MRC de nivel alto.....	63
Figura 10. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel bajo	76
Figura 11. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel bajo	76
Figura 12. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel bajo	77
Figura 13. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel bajo	77
Figura 14. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel medio	78
Figura 15. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel medio	79
Figura 16. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel medio	79
Figura 17. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel medio	80
Figura 18. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel alto	81
Figura 19. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel alto	81
Figura 20. Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel alto	82
Figura 21. Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel alto	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información técnica de AAS para análisis de Cu	21
Tabla 2. Información técnica de AAS para análisis de Mo	22
Tabla 3. Base de datos del %Cu y %Mo a nivel bajo	28
Tabla 4. Análisis de %Cu y %Mo a nivel bajo por turnos	30
Tabla 5. Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel bajo	30
Tabla 6. Base de datos del %Cu y %Mo a nivel medio	31
Tabla 7. Análisis de %Cu y %Mo a nivel medio por turnos	33
Tabla 8. Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel medio	33
Tabla 9. Base de datos del %Cu y %Mo a nivel alto	34
Tabla 10. Análisis de %Cu y %Mo a nivel alto por turnos	35
Tabla 11. Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel alto	36
Tabla 12. Cálculos de data de veracidad para OREAS 501-d.....	38
Tabla 13. Cálculos de data de veracidad para OREAS 503-d.....	47
Tabla 14. Cálculos de data de veracidad para OREAS 504-d.....	56
Tabla 15. RSD Horwitz para MRC de nivel bajo.....	64
Tabla 16. RSD Horwitz para MRC de nivel medio	65
Tabla 17. RSD Horwitz para MRC de nivel alto	65
Tabla 18. Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel bajo	70
Tabla 19. Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel medio	70
Tabla 20. Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel alto.....	70
Tabla 21. Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel bajo	71
Tabla 22. Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel medio.....	73
Tabla 23. Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel alto.....	74
Tabla 24. Valores críticos de Mandel	75

Tabla 25. Cálculo de Mandel de nivel bajo.....	75
Tabla 26. Cálculo de Mandel de nivel medio	78
Tabla 27. Cálculo de Mandel de nivel alto.....	81
Tabla 28. Valores críticos de Cochran.....	84
Tabla 29. Análisis de Cochran a nivel bajo	84
Tabla 30. Análisis de Cochran a nivel medio	85
Tabla 31. Análisis de Cochran a nivel alto	86

RESUMEN

Los laboratorios químicos enfrentan el reto constante de mantener la confiabilidad de sus resultados analíticos, particularmente cuando emplean técnicas sofisticadas como la espectroscopia de absorción atómica (AAS), problemática que adquiere especial relevancia en el contexto peruano donde la minería representa un sector estratégico. El objetivo fue asegurar la validez de los métodos AAS mediante la evaluación de la precisión y veracidad. La metodología incluyó preparación de muestras geológicas por digestión ácida, calibrándose el equipo de absorción atómica diariamente con estándares primarios de Cu y Mo y realizando evaluaciones en tres niveles de concentración (MRC). Los resultados mostraron sesgos inferiores a 0.06% en todos los niveles y valores experimentales dentro de los límites de control de ± 3 desviaciones estándar, sin tendencias ni valores atípicos; asimismo, la comparación de los RSD experimentales con los criterios de Horwitz demostró que el método supera ampliamente los requisitos internacionales, validando su exactitud. Para evaluar precisión, las condiciones de repetibilidad arrojaron desviaciones estándar relativas (RSD) entre 0.39 % y 0.76 % para Cu y entre 0.75 % y 1.59 % para Mo y las condiciones de reproducibilidad intralaboratorio resultaron en desviaciones estándar relativas (RSD) entre 0.42 % y 0.93 % para Cu y entre 0.96 % y 1.61 % para Mo; mientras que las pruebas de Mandel h y k revelaron diferencias inter-analista inferiores al 95 % de los valores críticos, y las pruebas de Cochran confirmaron la homogeneidad de las varianzas y la ausencia de datos con variación muy alta, con valores de C muy por debajo del límite crítico. En conclusión, el método AAS para Cu y Mo es robusto, exacto y preciso, y se recomienda para el control de calidad rutinario en laboratorios mineros.

Palabras clave: validez de resultado, espectroscopia de absorción atómica, precisión, veracidad.

ABSTRACT

Chemical laboratories face the constant challenge of maintaining the reliability of their analytical results, particularly when using sophisticated techniques such as atomic absorption spectroscopy (AAS). This issue is particularly relevant in Peru, where mining represents a strategic sector. The objective was to ensure the validity of AAS methods by assessing their precision and accuracy. The methodology included preparing geological samples by acid digestion, with the equipment calibrated daily with primary Cu and Mo standards and performing evaluations at three concentration levels (MRC). The results showed biases less than 0.06% at all levels and experimental values within control limits of ± 3 standard deviations, with no trends or outliers. Furthermore, comparison of experimental RSDs with the Horwitz criteria demonstrated that the method far exceeds international requirements, validating its accuracy. To assess precision, repeatability conditions yielded relative standard deviations (RSDs) between 0.39 % and 0.76 % for Cu and between 0.75 % and 1.59 % for Mo and intralaboratory reproducibility conditions resulted in relative standard deviations (RSDs) between 0.42 % and 0.93 % for Cu and between 0.96 % and 1.61 % for Mo. Mandel h and k tests revealed inter-analyst differences less than 95% of the critical values, and Cochran tests confirmed the homogeneity of variances and the absence of data with very high variation, with C values well below the critical limit. In conclusion, the AAS method for Cu and Mo is robust, accurate, and precise, and is recommended for routine quality control in mining laboratories.

Keywords: result validity, atomic absorption spectroscopy, precision, veracity.

INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio Químico de una empresa minera dedicada a la extracción de cobre (Cu) y molibdeno (Mo), el análisis de muestras geológicas es fundamental para garantizar la calidad y confiabilidad de los procesos. Estos análisis se rigen por los protocolos establecidos en el Manual de Políticas y Procedimientos Unificados y los Procedimientos Escritos de Trabajo Seguro, los cuales han sido validados y se aplican de manera rutinaria. Sin embargo, dado que los resultados obtenidos influyen directamente en la toma de decisiones operativas y comerciales, es esencial demostrar la validez y precisión de los métodos empleados.

El presente estudio se centra en evaluar la confiabilidad de los ensayos químicos realizados mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS), técnica ampliamente utilizada para la determinación de Cu y Mo. Para ello, se implementaron estrategias de control de calidad, como el uso de Materiales de Referencia Certificados (MRC), seleccionados por su concordancia con los rangos de concentración analizados y su certificación confiable. Además, se incluyeron análisis de repeticiones (duplicados) para evaluar la precisión del método.

La metodología empleada combina herramientas estadísticas, como pruebas T-Student, gráficos de control y cálculos de sesgo, junto con evaluaciones de repetibilidad y reproducibilidad utilizando herramientas estadísticas de Mandel h-k y Cochran. Estos procedimientos permitirán verificar la ausencia de sesgos sistemáticos y la consistencia de los resultados bajo diferentes condiciones. Los hallazgos de este estudio no solo validarán los métodos analíticos del laboratorio, sino que también contribuirán al cumplimiento de estándares industriales y normativos, asegurando la trazabilidad y confianza en los datos reportados. Es así que, este trabajo busca garantizar que los resultados obtenidos por AAS sean precisos, exactos y confiables, reforzando así la calidad de los procesos analíticos en el ámbito minero.

I. DATOS DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ EL TRABAJO

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el laboratorio químico de una empresa minera dedicada a la extracción y procesamiento de minerales, principalmente cobre (Cu) y molibdeno (Mo). La empresa opera bajo estándares internacionales, enfocándose en la producción de concentrados de alta pureza para su comercialización en el mercado global.

La investigación se basó en la experiencia laboral adquirida durante 15 años de trabajo en el laboratorio químico de la empresa, donde se realizaron análisis mediante espectroscopía de absorción atómica para la determinación de Cu y Mo, entre otros elementos.

La empresa minera tiene como finalidad principal la explotación, procesamiento y comercialización de minerales, con especial énfasis en la producción de cobre y molibdeno.

El laboratorio químico juega un papel fundamental en el aseguramiento de la calidad, siendo responsable de la validación de los métodos analíticos y la emisión de resultados confiables para la toma de decisiones operativas y comerciales.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

2.1. Planteamiento del problema

En la industria minera, la exactitud y precisión de los análisis químicos constituyen un pilar fundamental para garantizar la eficiencia operativa, el cumplimiento normativo (Wessels, 2024) y la rentabilidad económica de los proyectos (Onifade et al., 2023). A nivel global, los laboratorios químicos enfrentan el reto constante de mantener la confiabilidad de sus resultados analíticos (Ménard & Trant, 2019), particularmente cuando se emplean técnicas sofisticadas como la espectroscopia de absorción atómica (AAS) (Carter et al., 2020). Esta problemática adquiere especial relevancia en el contexto peruano, donde la minería representa un sector estratégico para la economía nacional (Bazan, 2020) y donde la calidad de los análisis influye directamente en la toma de decisiones técnicas y comerciales (Hilario et al., 2024).

Este reto adquiere especial relevancia en regiones mineras del país, donde la exactitud en la determinación de metales es fundamental para la toma de decisiones operativas y estratégicas (Apaza et al., 2022; Valladares et al., 2024). El laboratorio químico de una empresa minera, busca implementar mejoras continuas en sus procesos analíticos para alcanzar niveles óptimos de precisión y eficiencia en la determinación de Cu y Mo mediante AAS.

Un análisis del sistema actual revela varios factores que limitan la eficiencia del laboratorio; la espectroscopia de absorción atómica (AAS) presenta desafíos como son las interferencias físicas, interferencias por efecto matriz (Apaza et al., 2022), contaminación de muestras, desviación de lecturas y resultados, así como también problemas en la preparación de muestras en el laboratorio químico (Bacon et al., 2021). El programa de mantenimiento y calibración de equipos podría ser más eficiente mediante la implementación de protocolos más avanzados (Evans et al., 2021).

Otro factor crítico es la aplicación irregular de los controles de calidad, como la falta del uso de Materiales de Referencia Certificados (MRC) (Sishi & Telukdarie, 2020). Las consecuencias de esta situación son significativas y multidimensionales; pues, técnicamente, se compromete la confiabilidad de los informes geológicos y metalúrgicos, fundamentales para la planificación minera y el diseño de procesos (Ghorbani & Nwaila, 2022; Smee et al., 2024). Económicamente, generan costos adicionales por reprocesos analíticos y potenciales pérdidas por decisiones basadas en datos inexactos. Por ende, es necesario la integración sistemática de Materiales de Referencia Certificados (MRC) y análisis de repeticiones o duplicados de muestras dado que representaría una valiosa herramienta para monitorear y mejorar continuamente la precisión analítica (Smee et al., 2024).

2.2. Justificación

La espectroscopia de absorción atómica (AAS) es una técnica analítica fundamental en la industria minera, ya que permite la determinación precisa de metales como el cobre (Cu) y el molibdeno (Mo), elementos críticos en los procesos de extracción y beneficio de minerales; sin embargo, la confiabilidad de los resultados obtenidos depende directamente de la validación rigurosa de los métodos analíticos empleados. Este estudio se justifica, en primer lugar, por la necesidad de implementar un sistema de aseguramiento de la calidad que garantice que los resultados cumplan con estándares internacionales, tales como ISO/IEC 17025, asegurando su trazabilidad, exactitud y repetibilidad.

La exactitud de los análisis químicos es crucial para la toma de decisiones operativas, ya que influye en la planificación minera, el control de leyes de mineral y la optimización de procesos metalúrgicos. Un error analítico podría generar pérdidas económicas significativas, ya sea por subestimación de reservas o por incumplimiento de especificaciones en productos comerciales. Asimismo, los resultados deben ajustarse a normativas ambientales y de

seguridad, dado que concentraciones incorrectas de metales en efluentes o relaves podrían derivar en sanciones regulatorias o impactos ecológicos.

Además, este estudio adquiere relevancia estratégica al alinearse con las políticas de la empresa, las cuales buscan fortalecer la calidad técnica de sus laboratorios para mantener su competitividad en el sector minero. La implementación de protocolos estandarizados no solo minimiza riesgos operativos, sino que también facilita la comparabilidad de resultados con otros laboratorios, proyectos o auditorías externas, reforzando la credibilidad institucional.

Finalmente, la investigación generará evidencia científica que permitirá optimizar los procedimientos internos del laboratorio, promoviendo buenas prácticas en el uso de AAS. Los hallazgos servirán como base para futuros desarrollos metodológicos y contribuirán a la mejora continua de los procesos analíticos, consolidando al laboratorio como un referente en calidad y precisión dentro de la industria minera.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Evaluar y garantizar la validez de los resultados obtenidos mediante los métodos de espectroscopía de absorción atómica (AAS) para la determinación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en el laboratorio químico de una empresa minera

2.3.2. Objetivos específicos

Comprobar la veracidad del método mediante el análisis de Materiales de Referencia Certificados (MRC), aplicando pruebas estadísticas (T-Student, sesgo porcentual) y gráficos de control para garantizar la ausencia de sesgos sistemáticos.

Determinar la precisión del método a través de pruebas de repetibilidad y reproducibilidad, utilizando herramientas estadísticas (Mandel h-k, Cochran) y cálculo de desviaciones estándar.

III. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

En primer lugar, Balaram & Satyanarayanan (2022) tuvieron como objetivo principal actualizar las tendencias actuales en el análisis geoquímico elemental e isotópico, estableciendo protocolos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) para lograr datos precisos y confiables en investigaciones tanto básicas como aplicadas. Para ello, se adoptó una metodología integral que incluyó la recolección adecuada de muestras, su preparación cuidadosa mediante trituration y pulverización, y la aplicación de métodos de disolución optimizados, combinados con la calibración instrumental utilizando materiales de referencia certificados (MRC). Este enfoque permitió minimizar las interferencias de la matriz y mejorar la trazabilidad de los resultados. Se emplearon técnicas analíticas avanzadas, tales como ICP-MS, HR-ICP-MS y MC-ICP-MS, en conjunto con estrategias de validación mediante réplicas y duplicados, que posibilitaron precisiones relativas (RSD) de hasta 1,0% en concentraciones elevadas (por ejemplo, 1000 µg/g) y que aumentaron a aproximadamente 11,3% en niveles ultra-traza (0,1 µg/g). Entre los resultados destacados, se obtendrá una notable consistencia en la determinación de elementos traza y en los análisis comparativos interlaboratorio, donde muestras de oro arrojaron valores en el rango de 3,20 a 4,34 µg/g, demostrando la eficacia de los protocolos implementados. En conclusión, la integración de tecnologías instrumentales de última generación y la utilización de MRC para la calibración aseguran la obtención de datos reproducibles y confiables, fundamentales para la interpretación geológica, la exploración mineral y la toma de decisiones en el ámbito ambiental.

En Perú, Carhuaz (2024) tuvo como objetivo implementar un procedimiento de aseguramiento y control de calidad en el laboratorio químico de la empresa Ecoservicios e Ingeniería Limpia S.A.C., enfocado en ensayos fisicoquímicos para garantizar la validez de los resultados. La metodología incluyó la preparación mecánica de muestras, ensayos al fuego para

determinar contenido de oro y plata, y espectroscopía de absorción atómica para análisis de cobre, plomo y zinc. Se aplicaron controles rigurosos como duplicados, materiales de referencia internos (MRI) y certificados (MRC), además de gráficos para evaluar precisión y exactitud. Los resultados mostraron que en el análisis granulométrico se logró un control eficiente en mallas ASTM ¼” (chancado primario), N° 10 (chancado secundario) y N° 140 (pulverizado). En el ensayo al fuego, la desviación promedio en la determinación de oro fue inferior al 2%, mientras que la precisión en el análisis de plata alcanzó un coeficiente de variación del 1.8%. En espectroscopía, las concentraciones promedio obtenidas fueron 0.45 ppm para cobre, 0.32 ppm para plomo y 0.28 ppm para zinc, con una desviación estándar menor al 5%. En conclusión, los procedimientos implementados mejoraron significativamente la confiabilidad de los resultados analíticos del laboratorio, optimizando los estándares de calidad y reduciendo errores sistemáticos y aleatorios en los procesos; esto fortalece la capacidad del laboratorio para cumplir con normativas internacionales como ISO/IEC 17025:2017.

En Apurímac, Farfan (2024) validó un método de espectroscopia de absorción atómica para cuantificar calcio en muestras geoquímicas, asegurando su confiabilidad analítica mediante parámetros estandarizados. La metodología implicó dos enfoques experimentales: primero, tres analistas realizaron 20 repeticiones cada uno con un patrón estándar internacional de 21.4% de calcio, evaluando consistencia y precisión mediante análisis estadísticos con Minitab y Excel. Segundo, se analizaron tres materiales de referencia certificados (MRC) con concentraciones variables: 8.72% (baja), 21.4% (media) y 34.6% (alta), para verificar la veracidad en diferentes rangos. Los resultados demostraron un límite de detección de 4.506 ppm y un límite de cuantificación de 6.088 ppm, con una desviación estándar relativa (RSD) del 0.68% en repetibilidad y 1.02% en reproducibilidad, indicando alta precisión. La recuperación promedio en los MRC fue de 99.8% (baja), 100.1% (media) y 99.6% (alta), validando la exactitud del método. El análisis de normalidad mediante la prueba de Anderson-

Darling mostró un valor $p > 0.05$, confirmando distribución gaussiana en los datos. La conclusión establece que el método cumple con los criterios de la norma ISO/IEC 17025, demostrando linealidad ($R^2=0.999$), sensibilidad adecuada (0.0125 abs/ppm) y especificidad frente a interferencias comunes, lo que garantiza resultados confiables para el control de calidad en laboratorios mineros. Estos hallazgos respaldan la implementación rutinaria del protocolo validado, optimizando el análisis de elementos metálicos en exploración geoquímica.

3.2. Marco teórico

3.2.1. Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS)

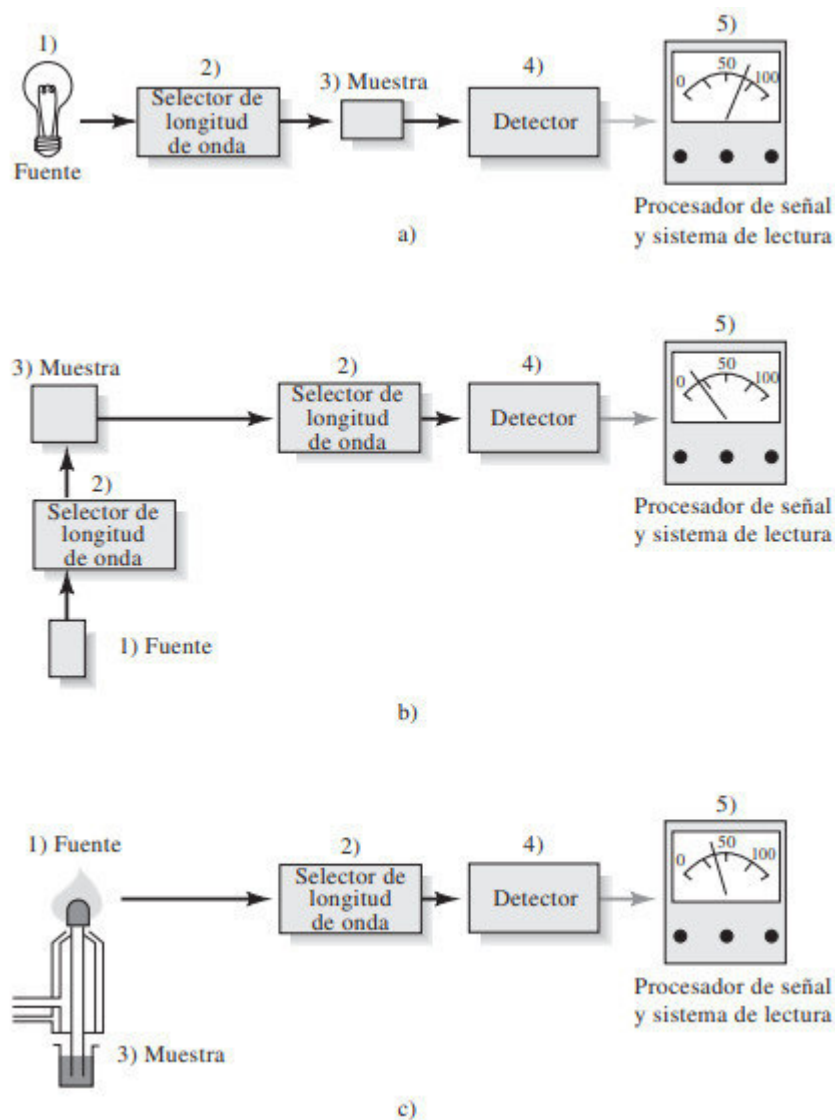
El método analítico conocido como espectroscopia de absorción atómica (AAS) se basa en la medición de la cantidad de radiación electromagnética absorbida por los átomos, tanto en su estado gaseoso como fundamental (Castellanos et al., 2018). La ley de Beer-Lambert, que establece que la absorbancia de una especie atómica es exactamente proporcional a su concentración en la muestra proporciona la base teórica para ello (Chandra & Naiker, 2022) :

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot C$$

El espectrofotómetro de absorción atómica es un sistema integrado por componentes clave que trabajan de manera coordinada para lograr la atomización y medición precisa de los elementos analíticos (Carter et al., 2017). La configuración estándar de un equipo espectroscópico incluye las siguientes cinco partes (Figura 1): 1) fuente de energía; 2) herramienta para enfocar la luz en un área específica del espectro para la medición; 3) recipiente transparente para contener la muestra; 4) Un detector de radiación para transformar la luz en una señal eléctrica; y 5) dispositivo para procesar y mostrar las señales, como un medidor digital, una escala de medición o una pantalla de computadora, para representar la señal del transductor (Skoog et al., 2008).

Figura 1.

Componentes de espectroscopia óptica



Nota: Skoog et al. (2008)

3.2.2. Control de calidad en laboratorios analíticos

El control de calidad respecto a los laboratorios analíticos garantiza resultados correctos y fiables mediante un completo sistema de control de calidad (Broadhurst et al., 2018; Moreno, 2018). En el contexto de laboratorios químicos mineros, este sistema comprende todas las actividades que permiten monitorear y mantener la calidad técnica de los análisis, desde la recepción de muestras hasta la emisión de resultados (Almanza, 2023; Carrion, 2023).

Los objetivos fundamentales del control de calidad incluyen asegurar que los datos generados cumplan con los requisitos de calidad establecidos (Yalico, 2024), detectar y corregir oportunamente desviaciones en los procesos analíticos (Mitra, 2016), validar los métodos de análisis empleados, y demostrar la competencia técnica del laboratorio (Carrion, 2023; Yalico, 2024). En la práctica minera, donde decisiones operativas y comerciales dependen directamente de los resultados analíticos, el control de calidad adquiere especial relevancia para minimizar riesgos técnicos y económicos asociados a datos erróneos (Demattê et al., 2019; Muñoz, 2022).

3.2.3. *Organización Internacional de la Normalización (ISO)*

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es una entidad no gubernamental independiente, que se encarga de desarrollar y promover estándares internacionales para garantizar la calidad, seguridad, eficiencia y compatibilidad de productos, servicios y sistemas en diversos sectores industriales y tecnológicos (Marsden & Shahtout, 2024; Schonrock, 2023). Con sede en Ginebra, Suiza, ISO agrupa a más de 160 organismos nacionales de normalización y opera bajo un sistema de consenso entre expertos, gobiernos y partes interesadas (Zhao et al., 2020); siendo su principal función establecer normas técnicas basadas en las mejores prácticas globales, facilitando el comercio internacional, la innovación y el desarrollo sostenible (Ceko, 2023).

Las normas ISO cumplen funciones clave como la estandarización de procesos, la mejora continua y la armonización de criterios técnicos entre países (Marsden & Shahtout, 2024), lo que permite reducir barreras comerciales y asegurar la confiabilidad de los resultados en áreas como la manufactura, la tecnología, la salud y el medio ambiente (Ikram et al., 2020; Zhao et al., 2020). Aunque no son obligatorias por sí mismas, muchas industrias y gobiernos las adoptan como requisito para certificaciones, auditorías y cumplimiento regulatorio (Tayo

et al., 2018); dado su enfoque sistemático ayuda a las organizaciones a optimizar sus operaciones, minimizar riesgos y aumentar la satisfacción de los clientes mediante procesos verificables y repetibles a nivel internacional (Marsden & Shahtout, 2024).

3.2.3.1. *ISO 17025*

Los laboratorios analíticos modernos basan sus sistemas de calidad en normativas internacionales que establecen requisitos técnicos y de gestión (Almanza, 2023); donde la norma ISO/IEC 17025 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración" representa el estándar más reconocido a nivel global (Duarte, 2018). Esta norma establece criterios para la validación de métodos, calibración de equipos, cualificación del personal y trazabilidad metrológica, siendo particularmente relevante para laboratorios que requieren acreditación (Panagiotidou et al., 2024; Sieber, 2020). En el sector minero, la implementación de esta norma permite demostrar la competencia técnica ante clientes y autoridades reguladoras (Carlos et al., 2019).

Además, las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) establecen las directrices sobre cómo y dónde deben planificarse, realizarse, rastrearse, registrarse e informarse los estudios de laboratorio (Brooks et al., 2015). A diferencia de la norma ISO/IEC 17025, que prioriza la experiencia técnica, las BPL enfatizan la integridad de los datos y la documentación exhaustiva de cada proceso (Dwivedi, 2025; Hernández, 2024). La adopción conjunta de estas normas ayuda a los laboratorios mineros a establecer sistemas robustos para los componentes de gestión técnica y de calidad, garantizando así resultados precisos, exactos y debidamente registrados que puedan validarse (Balaram & Subramanyam, 2022).

3.2.4. *Aseguramiento de la validez de los resultados*

El aseguramiento de la validez de los resultados analíticos es un proceso sistemático que integra diversas estrategias para garantizar la confiabilidad continua de los datos generados

(Manobanda et al., 2025). Este enfoque se sustenta en cuatro pilares fundamentales: (1) la implementación de controles internos de calidad, que incluyen el uso rutinario de materiales de control como materiales de referencia certificados (MRC) y réplicas analíticas; (2) la participación en programas de comparación interlaboratorio, que permiten evaluar el desempeño del laboratorio frente a pares; (3) la validación periódica de los métodos analíticos mediante estudios de exactitud, precisión y robustez; y (4) el mantenimiento de un sistema documental completo que asegure la trazabilidad de todas las etapas del proceso analítico (INACAL, 2018). Estas estrategias combinadas permiten detectar y corregir oportunamente cualquier desviación en los procedimientos, asegurando que los resultados cumplan con los requisitos de calidad establecidos (Perugachi & Albán, 2015).

Un aspecto crítico del aseguramiento de la validez es la evaluación continua del sesgo, el cual se determina mediante comparaciones con valores de referencia certificados (MRC) (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2018). Adicionalmente, se implementan protocolos para la verificación del desempeño de los equipos, la cualificación del personal técnico y el control de las condiciones ambientales del laboratorio; estos elementos, integrados en un sistema de gestión de calidad robusto, proporcionan evidencia objetiva de que los resultados analíticos son técnicamente válidos y metrológicamente trazables, cumpliendo así con los estándares internacionales de calidad y las necesidades específicas de los usuarios de los datos (Delgado & Salazar, 2023).

3.2.5. *Materiales de Referencia Certificados (MRC) en AAS*

Los Materiales de Referencia Certificados (MRC) son sustancias caracterizadas mediante procedimientos metrológicamente válidos, con valores de propiedad certificados y asociados a una incertidumbre definida (Beauchamp et al., 2020; Breja, 2022). En el análisis por AAS, los MRC cumplen un rol fundamental como patrones de comparación para validar

métodos y garantizar la exactitud de los resultados (Bacon et al., 2021). Los MRC pueden presentarse en diferentes formas físicas (polvos, soluciones, sólidos) y deben acompañarse de un certificado que incluya: valores certificados, incertidumbre expandida, métodos de caracterización y condiciones de almacenamiento (Kestens & Koeber, 2022).

En el análisis AAS, los Materiales de Referencia Certificados (MRC) son esenciales ya que ofrecen trazabilidad metrológica de los resultados al Sistema Internacional de Unidades (SI), un requisito clave según la norma ISO/IEC 17025 (Carrion, 2023; Sanmiguel & Guerrero, 2017). Su implementación sistemática permite validar la exactitud de los métodos analíticos mediante la comparación de los valores obtenidos con los valores certificados, asegurando recuperaciones dentro de rangos aceptables (Raposo & Ibelli, 2020). Además, los MRC son herramientas críticas para identificar y corregir sesgos matriciales en muestras geológicas complejas (Hernández, 2018), donde la composición de la matriz puede afectar significativamente los resultados (Balaram & Satyanarayanan, 2022).

En la práctica analítica, el uso regular de MRC como parte del control de calidad interno permite monitorear el desempeño del sistema mediante cartas de control, detectando oportunamente desviaciones en la calibración o funcionamiento instrumental (Breja, 2022; Westgard & Westgard, 2016). Asimismo, facilitan la comparabilidad interlaboratorio, siendo particularmente valiosos en la industria minera donde la consistencia de resultados entre diferentes laboratorios es crucial para procesos como el balance metalúrgico o el control de calidad de concentrados (Koepke et al., 2017; Thabit, 2024).

3.2.6. *Monitoreo del desempeño analítico*

El control de calidad en laboratorios analíticos emplea herramientas estadísticas fundamentales para garantizar la confiabilidad de los resultados (Yalico, 2024). Entre estas destacan los gráficos de control, los análisis de veracidad (exactitud) y los estudios de precisión

(repetibilidad y reproducibilidad), que en conjunto permiten evaluar el desempeño de los métodos analíticos (Joachim, 2025; Tsachouridis, 2017).

La veracidad o exactitud de un método analítico se refiere al grado de concordancia entre el valor medido y el valor de referencia aceptado (Céspedes et al., 2022).

Se evalúa principalmente mediante dos enfoques: el análisis de materiales de referencia certificados y el método de adición estándar; el primero permite calcular el porcentaje de recuperación (Condori, 2016), mientras que el segundo es particularmente útil para identificar y corregir efectos matriciales (Wieczorek et al., 2017).

La precisión, por su parte, comprende dos componentes principales, la repetibilidad, que cuantifica la variabilidad obtenida cuando el análisis se realiza en condiciones idénticas (mismo operador, mismo equipo y en un corto intervalo de tiempo) (Campos et al., 2018); y la reproducibilidad, que evalúa la variabilidad bajo condiciones cambiantes (diferentes operadores, equipos o días) (De La O Franco, 2025).

Estos parámetros se expresan comúnmente como desviación estándar o desviación estándar relativa (%RSD), y su determinación sigue protocolos estandarizados que incluyen diseños experimentales específicos (Peris et al., 2015; Raposo & Ibelli, 2020). La integración sistemática de estas herramientas estadísticas en los protocolos de control de calidad permite no solo validar los métodos analíticos, sino también mantener un monitoreo constante de su desempeño, asegurando la confiabilidad continua de los resultados generados en el laboratorio (Westgard & Westgard, 2016).

3.2.6.1. *Gráficos de control – Control estadístico de la calidad*

Los gráficos de control, basados en principios estadísticos, son instrumentos esenciales para el monitoreo continuo de los procesos analíticos (Sałaciński et al., 2023), del cual permiten identificar variaciones en los procesos, distinguiendo entre causas comunes (aleatorias) y

causas especiales (asignables); entre los tipos más comunes se encuentran los gráficos de control por variables, como los gráficos X-barra y R, que analizan la media y el rango de los datos, respectivamente, y los gráficos por atributos (Walpole et al., 2012).

Las herramientas estadísticas empleadas incluyen el cálculo de la media, que representa el valor central de los datos; la moda, que indica el valor más frecuente; y el rango, que mide la dispersión entre los valores máximos y mínimos (Walpole et al., 2012). Además, los límites de control superior e inferior (LCS y LCI) que definen el rango de variación aceptable; en caso de que los datos cayeran fuera de estos se considera que el proceso está fuera de control y requiere intervención (Ćidić, 2024). Por ende, estos gráficos no solo ayudan a mantener la calidad del producto, sino que también facilitan la identificación de tendencias o patrones que podrían indicar problemas potenciales antes de que afecten la producción (Aykroyd et al., 2019).

IV. PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN

El control de calidad en laboratorios analíticos constituye un sistema integral que abarca cuatro actividades fundamentales interrelacionadas: planificación de la calidad, control de la calidad, aseguramiento de la calidad y perfeccionamiento de la calidad. La planificación de la calidad constituye la base del sistema, donde se definen los objetivos, métodos validados y protocolos estandarizados para cada análisis, incluyendo criterios de aceptación claros.

El control de calidad representa la ejecución práctica de los procesos de verificación, donde se implementan herramientas como análisis de duplicados y materiales de referencia certificados (MRC) para monitorear el desempeño analítico del método mientras se encuentra en uso. Estas actividades permiten detectar desviaciones en los resultados, asegurando que cada medición cumpla con los límites de precisión y exactitud establecidos.

En el presente trabajo de suficiencia profesional, se desarrollará un planteamiento para garantizar la validez de los resultados obtenidos mediante espectroscopia de absorción atómica (AAS) para la determinación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en muestras de geología. Para ello, se implementarán estrategias de evaluación de veracidad y precisión, utilizando materiales de referencia certificados (MRC) y repeticiones de muestras bajo condiciones controladas. La metodología se basa en el procedimiento estándar del laboratorio y en normativas reconocidas para el control de calidad analítica.

V. PROCEDIMIENTO

A diario y en cada turno de trabajo, las muestras de geología preparadas, pulverizadas y homogeneizadas por la Sala de Muestras de Metalurgia son entregadas al Laboratorio Químico. Estas muestras de geología llegan al Laboratorio en sobres rotulados con códigos de barras e identificados con la numeración del nivel y hueco de perforación en la Mina (Ver Anexo 1).

El analista encargado realiza la recepción de las muestras mediante el escaneo del código de barras con un lector que identifica cada muestra de geología entregada, por el departamento de Metalurgia, en el programa SIO (Sistema Integral de Operaciones), con el fin de registrar las muestras que ingresan al Laboratorio.

Posteriormente, se genera la hoja de trabajo con las muestras de geología numeradas y se procede con el análisis químico correspondiente. Primero se realiza el pesado de las muestras, luego, el ataque químico, tratamiento post- ataque y se procede a realizar el análisis de las muestras por espectroscopia de absorción atómica (AAS). Con los resultados obtenidos de los análisis por AAS, se procede a reportar los resultados en la hoja de trabajo creada en el programa SIO y finaliza el trabajo realizando labores de orden y limpieza.

Para asegurar la validez de los resultados en los métodos de análisis por AAS para determinar cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en muestra de geología, se desarrollará la evaluación de veracidad mediante el análisis de materiales de referencia certificados (MRC) y precisión a través del análisis de duplicados de muestras.

El procedimiento de preparación, análisis por AAS y desempeño analítico se esquematiza en la figura 2:

Figura 2.

Diagrama de preparación, análisis por AAS y desempeño analítico



Para el presente estudio, se utilizaron los siguientes equipos y reactivos, conforme al procedimiento establecido e indicado en la Figura 3:

- Espectrofotómetro de absorción atómica (Agilent 200 Series AA). Ver Anexo 7
- Balanza analítica certificada Mettler Toledo (sensibilidad 0,1 mg). Ver Anexo 2
- QBlock Heating block para ataque químico. Ver Anexo 3
- Reactivos: Ácido nítrico (67-69%), ácido clorhídrico (37-38%), clorato de potasio, solución de floculante (0,06%), y agua destilada/desionizada.
- Materiales de referencia certificados (MRC): OREAS 501-d, OREAS 503-d y OREAS 504-d.
- Muestras de geología para análisis químicos. Ver Anexo 1

La secuencia a seguir en el procedimiento es:

a. Preparación de muestras

- i. **Pesado:** Tomar 0.5000 g de muestra geológica y colocarla en tubos de ataque de 50 ml.

- ii. **Ataque químico:** Ver Anexo 4

- Adicionar 10 ml de ácido nítrico con clorato de potasio al 5%.
- Agregar 10 ml de ácido clorhídrico
- Calentar y atacar las muestras en el QBlock a 120 °C durante 110 minutos.

- iii. **Tratamiento post-ataque:** Ver Anexo 5

- Añadir 2 ml de floculante.
- Trasvasar a fiolas de 200 ml y aforar con agua destilada.
- Filtrar si es necesario para eliminar sólidos en suspensión

b. Análisis por AAS: Ver Anexo 6

Lecturas en el espectrofotómetro de absorción atómica de las concentraciones de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en las muestras de geologías.

Para determinar las concentraciones de Cu y Mo por AAS, se debe considerar los siguientes parámetros:

Tabla 1.

Información técnica de AAS para análisis de Cu

Corriente de lámpara	4 mA
Fuente espectral	lámpara de cátodo hueco de Cu
Longitud de onda	327.4 nm
Tipo de llama	aire/acetileno
Slit	0.2 nm
Concentración para 0.1 abs.	1.5 mg/l
Aire	seco
Acetileno	>99,5% de pureza
Flujo de oxidante	11 – 20 l/min
Flujo de combustible	1.5 – 8.0 l/min
Salida de acetileno	11-15 psi
Entrada de aire	50-60 psi

Tabla 2.
Información técnica de AAS para análisis de Mo

Corriente de lámpara	7 mA
Fuente espectral	lámpara de cátodo hueco de Mo
Longitud de onda	313.3 nm
Tipo de llama	acetileno/óxido nitroso
Slit	0.5 nm
Concentración para 0.1 abs.	7.5 mg/l
Aire	seco
Acetileno-óxido nitroso	>99,5% de pureza
Flujo de oxidante	11 – 20 l/min
Flujo de combustible	1.5 – 8.0 l/min
Salida de acetileno	11-15 psi
Entrada de aire	50-60 psi

- **Calibración del equipo:** Usar estándares primarios (Cu: 0.400%, 0.800%, 1.200%; Mo: 0.019%, 0.038%, 0.057%).
- **Parámetros de medición:**
 - Longitud de onda: 327.4 nm (Cu) y 313.3 nm (Mo)
 - Tipo de llama: Aire/acetileno para análisis de Cu y Acetileno/Óxido nitroso para análisis de Mo.
 - Flujos: Oxidante (11–20 L/min), combustible (1.5–8.0 L/min).
 - Optimización de señal con solución de Cu 1.5 ppm (absorbancia objetivo: 0.100)
 - Optimización de señal con solución de Mo 7.5 ppm (absorbancia objetivo: 0.100)

c. Registro de datos

Se procede a ingresar los datos analizados de %Cu y %Mo en la hoja de trabajo previamente creada en el programa SIO a fin de que todos los usuarios involucrados puedan visualizar la información solicitada.

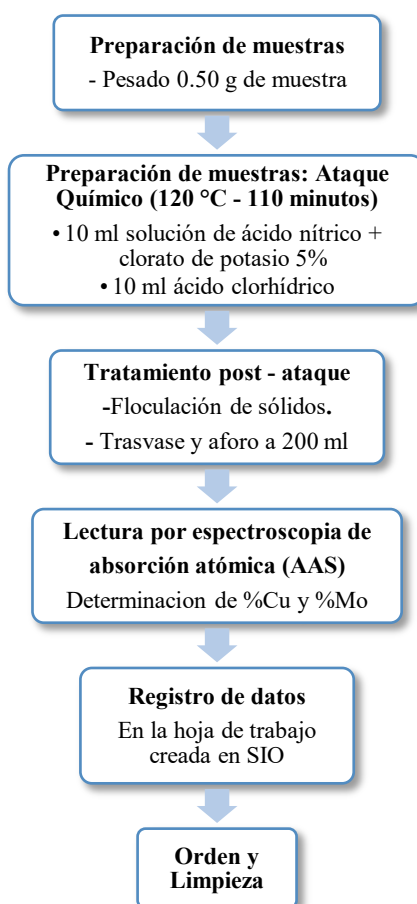
d. Orden y Limpieza

Al finalizar el análisis por AAS, se realizan actividades de limpieza de materiales utilizados y ordenar todos los materiales, reactivos y muestras utilizadas.

El procedimiento de preparación y análisis químico por AAS se esquematiza en la figura 3:

Figura 3.

Diagrama de preparación y análisis químico por AAS



e. Evaluación de la veracidad

La veracidad se refiere a la proximidad de los resultados experimentales a los valores de referencia certificados, para su evaluación, se implementaron las siguientes estrategias:

- Análisis de MRC: Diariamente, durante 30 días y por cada turno de trabajo, se analizaron los tres MRC de nivel bajo, medio y alto, junto con las muestras geológicas. Los resultados se compararon con los valores certificados para verificar su concordancia.
- Herramientas de evaluación:
 - Gráficos de control: Se elaboraron cartas de control para monitorear que los resultados de los MRC se mantuvieran dentro de los límites de control (± 3 desviaciones estándar), identificando tendencias o desviaciones sistemáticas.
 - Prueba T-Student: Se aplicó para detectar sesgos significativos entre la media experimental (X) y el valor certificado (xa); del cual permitieron detectar y corregir sesgos sistemáticos. La fórmula utilizada fue:

$$t_{cal} = \frac{|X - xa|}{S/\sqrt{n}}$$

Donde: X = promedio medias

xa = ley MRC

S = Desviación estándar

n = número de observaciones

Si $t_{cal} > t_{tab}$ (valor crítico), se rechaza la hipótesis nula, indicando un sesgo estadísticamente significativo.

- Cálculo del sesgo: Se determinó la diferencia entre el resultado esperado de un ensayo y el valor certificado del MRC.

$$Sesgo = X - xa$$

Para evaluar el sesgo, se efectuó la prueba T-Student

$$t_{cal} = \frac{|xa - X|}{S \times \sqrt{n}}$$

Donde:

X = promedio medias

xa = ley MRC

S = Desviación estándar

n = número de observaciones

f. Evaluación de la precisión

La precisión, que evalúa la reproducibilidad y repetibilidad del método, se analizó mediante:

- Condiciones de repetibilidad: Se analizaron repeticiones de muestras geológicas en un corto intervalo de tiempo, por el mismo analista y utilizando el mismo equipo.

$$T_1 = \sum n_i \times \bar{x}_i \quad T_2 = \sum n_i \times \bar{x}_i^2$$

$$T_3 = \sum n_i \quad T_4 = \sum n_i^2$$

$$T_5 = \sum (n_i - 1)S_i^2$$

Varianza de repetibilidad (S_r^2)

$$S_r^2 = \frac{T_5}{T_3 - p}$$

Varianza entre analistas (S_L^2)

$$S_L^2 = \left[\left[\frac{T_2 T_3 - T_1^2}{T_3(p-1)} - S_R^2 \right] \times \left[\frac{T_3(p-1)}{T_3^2 - T_4} \right] \right]$$

- Condiciones de reproducibilidad intralaboratorio: Se variaron los analistas y los días de análisis para evaluar la consistencia de los resultados bajo diferentes condiciones.

Varianza de reproducibilidad (S_R^2)

$$S_R^2 = S_r^2 + S_L^2$$

Donde: x_i = promedio análisis

x_i = número de observaciones

S_i = Desviación estándar

- Herramientas estadísticas:
 - Pruebas de Mandel h y k: Se calcularon los estadísticos de consistencia h y k con el fin de identificar la existencia de inconsistencias entre analistas o lotes y tomar decisiones en base a los resultados obtenidos.

$$h_1 = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{Y}_1 - \bar{Y})^2}}$$

$$k_1 = \frac{s_1 \sqrt{p}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p S_1^2}}$$

Donde:

$\bar{Y}_1$ = media por analista

$\bar{Y}$ = media total

P = número de analistas

s_1 = Desviación estándar por analista

S_1^2 = Varianza por analista

- Prueba de Cochran: Para validar la homogeneidad de las varianzas, es decir, para identificar una variación significativamente alta dentro de los datos analizados.

$$C = \frac{s_1^2 \max}{\sum_{i=1}^p S_1^2}$$

- Desviaciones estándar relativa: Se calcularon las desviaciones estándar de repetibilidad y reproducibilidad para cuantificar la precisión del método.

$$RSD_R = \left(S_R / m \right) \times 100\%$$

$$RSD_r = \left(S_r / m \right) \times 100\%$$

Donde: m = promedio de medias de análisis

g. Control de calidad y validación

- Calibración diaria: Verificar con estándares antes de cada jornada.
- Blancos de reactivos: Incluir en cada lote para detectar contaminación.
- Documentación: Registrar todos los datos en hojas de cálculo con cálculos estadísticos correspondientes.

VI. RESULTADOS

6.1.Veracidad

Los resultados obtenidos en la evaluación de veracidad mediante materiales de referencia certificados (MRC) en tres niveles de concentración (bajo, medio y alto) demuestran una buena exactitud del método de espectroscopia de absorción atómica implementado en el laboratorio.

Para el nivel bajo (OREAS 501-d), se observó que para el cobre con un valor certificado de 0.272%, se obtuvo una media experimental de 0.273%, con un sesgo de 0.055%; similarmente, para el molibdeno con un valor certificado de 0.0095%, se obtuvo una media experimental de 0.0095%, con un sesgo mínimo de 0.003%. Estos resultados evidencian que el método mantiene su exactitud en concentraciones bajas.

Tabla 3.

Base de datos del %Cu y %Mo a nivel bajo

OREAS 501-d (%Cu = 0.272 %Mo = 0.0095)			
MRC de nivel bajo			
Fecha análisis	Turno	%Cu analizado	%Mo analizado
01/05/2025	A	0.279	0.0097
	B	0.273	0.0095
02/05/2025	A	0.271	0.0096
	B	0.272	0.0095
03/05/2025	A	0.274	0.0094
	B	0.273	0.0093
04/05/2025	A	0.272	0.0095
	B	0.279	0.0098
05/05/2025	A	0.274	0.0094
	B	0.274	0.0095
06/05/2025	A	0.275	0.0096
	B	0.272	0.0095

07/05/2025	A	0.274	0.0094
	B	0.278	0.0096
08/05/2025	A	0.272	0.0098
	B	0.276	0.0096
09/05/2025	A	0.272	0.0096
	B	0.273	0.0095
10/05/2025	A	0.274	0.0094
	B	0.272	0.0096
11/05/2025	A	0.272	0.0094
	B	0.280	0.0095
12/05/2025	A	0.272	0.0098
	B	0.274	0.0095
13/05/2025	A	0.271	0.0094
	B	0.273	0.0099
14/05/2025	A	0.272	0.0094
	B	0.272	0.0096
15/05/2025	A	0.276	0.0095
	B	0.273	0.0099
16/05/2025	A	0.274	0.0095
	B	0.272	0.0095
17/05/2025	A	0.273	0.0094
	B	0.280	0.0095
18/05/2025	A	0.276	0.0095
	B	0.272	0.0094
19/05/2025	A	0.271	0.0095
	B	0.274	0.0096
20/05/2025	A	0.279	0.0094
	B	0.274	0.0095
21/05/2025	A	0.273	0.0095
	B	0.275	0.0095
22/05/2025	A	0.274	0.0096
	B	0.272	0.0094
23/05/2025	A	0.277	0.0099
	B	0.273	0.0095
24/05/2025	A	0.278	0.0096
	B	0.272	0.0095
25/05/2025	A	0.277	0.0094
	B	0.274	0.0096
26/05/2025	A	0.272	0.0096
	B	0.272	0.0094

27/05/2025	A	0.272	0.0098
	B	0.276	0.0095
28/05/2025	A	0.281	0.0096
	B	0.274	0.0095
29/05/2025	A	0.275	0.0095
	B	0.272	0.0094
30/05/2025	A	0.278	0.0092
	B	0.273	0.0095

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.

Análisis de %Cu y %Mo a nivel bajo por turnos

	%Cu		%Mo	
	A	B	A	B
Media	0.274	0.273	0.0095	0.0095
Desviación estándar	0.0027	0.0024	0.00015	0.00013
Mínimo	0.271	0.272	0.0092	0.0093
Máximo	0.281	0.280	0.0099	0.0099
Rango	0.010	0.008	0.0007	0.0006

Tabla 5.

Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel bajo

OREAS 501-d: MRC de nivel bajo			
	Valor Certificado (%)	Media experimental	Sesgo
Cu	0.272 %	0.273 %	0.055
Mo	0.0095 %	0.0095 %	0.003

En el nivel medio (OREAS 503-d), los resultados confirmaron nuevamente la robustez del método. El cobre registró un valor certificado de 0.524%, con un sesgo de 0.043%; mientras que el molibdeno fue de 0.0348% con un sesgo mínimo de -0.002%, demostrando consistencia en concentraciones intermedias.

Tabla 6.

Base de datos del %Cu y %Mo a nivel medio

OREAS 503-d (%Cu = 0.524 %Mo = 0.0348)			
MRC de nivel medio			
Fecha análisis	Turno	%Cu analizado	%Mo analizado
01/05/2025	A	0.525	0.0345
	B	0.524	0.0346
02/05/2025	A	0.524	0.0348
	B	0.526	0.0347
03/05/2025	A	0.523	0.0348
	B	0.524	0.0348
04/05/2025	A	0.524	0.0348
	B	0.523	0.0347
05/05/2025	A	0.526	0.0347
	B	0.527	0.0348
06/05/2025	A	0.526	0.0349
	B	0.527	0.0347
07/05/2025	A	0.526	0.0346
	B	0.527	0.0347
08/05/2025	A	0.523	0.0345
	B	0.525	0.0348
09/05/2025	A	0.523	0.0349
	B	0.526	0.0347
10/05/2025	A	0.526	0.0348
	B	0.522	0.0346
11/05/2025	A	0.524	0.0342
	B	0.526	0.0344
12/05/2025	A	0.525	0.0346
	B	0.524	0.0347
13/05/2025	A	0.524	0.0348

	B	0.524	0.0349
14/05/2025	A	0.526	0.0347
	B	0.527	0.0343
15/05/2025	A	0.526	0.0351
	B	0.528	0.0349
16/05/2025	A	0.525	0.0350
	B	0.524	0.0347
17/05/2025	A	0.526	0.0348
	B	0.527	0.0347
18/05/2025	A	0.523	0.0349
	B	0.526	0.0348
19/05/2025	A	0.529	0.0345
	B	0.525	0.0343
20/05/2025	A	0.525	0.0344
	B	0.525	0.0347
21/05/2025	A	0.524	0.0348
	B	0.527	0.0348
22/05/2025	A	0.526	0.0346
	B	0.527	0.0347
23/05/2025	A	0.526	0.0349
	B	0.525	0.0350
24/05/2025	A	0.524	0.0348
	B	0.524	0.0344
25/05/2025	A	0.528	0.0345
	B	0.524	0.0346
26/05/2025	A	0.526	0.0345
	B	0.527	0.0347
27/05/2025	A	0.524	0.0351
	B	0.525	0.0348
28/05/2025	A	0.522	0.0345
	B	0.523	0.0350
29/05/2025	A	0.529	0.0346
	B	0.527	0.0347
30/05/2025	A	0.526	0.0348
	B	0.524	0.0348

Nota: Elaboración propia

Tabla 7.

Análisis de %Cu y %Mo a nivel medio por turnos

	%Cu		%Mo	
	A	B	A	B
Media	0.525	0.525	0.0347	0.0347
Desviación estándar	0.0016	0.0015	0.00021	0.00017
Mínimo	0.522	0.522	0.0342	0.0343
Máximo	0.529	0.528	0.0351	0.0350
Rango	0.007	0.006	0.0009	0.0007

Tabla 8.

Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel medio

OREAS 503-d: MRC de nivel medio			
	Valor Certificado (%)	Media experimental	Sesgo
Cu	0.524 %	0.524 %	0.043
Mo	0.0348 %	0.0348 %	-0.002

Para el nivel alto (OREAS 504-d), el cobre presentó una diferencia mínima (1.101% experimental vs 1.100% certificado) con sesgo de 0.057%, mientras el molibdeno registró valores de 0.0507% y sesgo de -0.003%; manteniéndose dentro del rango de trabajo analítico.

Tabla 9.

Base de datos del %Cu y %Mo a nivel alto

OREAS 504-d (%Cu = 1.100 %Mo = 0.0507)			
MRC de nivel alto			
Fecha análisis	Turno	%Cu analizado	%Mo analizado
01/05/2025	A	1.102	0.0506
	B	1.104	0.0515
02/05/2025	A	1.104	0.0502
	B	1.108	0.0510
03/05/2025	A	1.107	0.0506
	B	1.108	0.0507
04/05/2025	A	1.098	0.0509
	B	1.107	0.0508
05/05/2025	A	1.104	0.0504
	B	1.096	0.0509
06/05/2025	A	1.097	0.0510
	B	1.099	0.0507
07/05/2025	A	1.103	0.0508
	B	1.108	0.0499
08/05/2025	A	1.109	0.0506
	B	1.100	0.0512
09/05/2025	A	1.104	0.0504
	B	1.095	0.0508
10/05/2025	A	1.100	0.0499
	B	1.102	0.0507
11/05/2025	A	1.109	0.0507
	B	1.102	0.0506
12/05/2025	A	1.100	0.0505
	B	1.108	0.0498
13/05/2025	A	1.107	0.0507
	B	1.102	0.0508
14/05/2025	A	1.100	0.0508
	B	1.107	0.0509
15/05/2025	A	1.096	0.0505
	B	1.095	0.0510
16/05/2025	A	1.100	0.0507
	B	1.104	0.0504
17/05/2025	A	1.096	0.0508
	B	1.102	0.0509
18/05/2025	A	1.107	0.0510
	B	1.105	0.0503
19/05/2025	A	1.096	0.0507

	B	1.104	0.0515
20/05/2025	A	1.106	0.0505
	B	1.107	0.0503
21/05/2025	A	1.094	0.0507
	B	1.104	0.0509
22/05/2025	A	1.108	0.0510
	B	1.106	0.0499
23/05/2025	A	1.097	0.0507
	B	1.106	0.0508
24/05/2025	A	1.102	0.0509
	B	1.098	0.0504
25/05/2025	A	1.096	0.0498
	B	1.107	0.0506
26/05/2025	A	1.099	0.0505
	B	1.102	0.0507
27/05/2025	A	1.102	0.0507
	B	1.107	0.0506
28/05/2025	A	1.094	0.0508
	B	1.099	0.0509
29/05/2025	A	1.098	0.0510
	B	1.102	0.0509
30/05/2025	A	1.100	0.0508
	B	1.101	0.0505

Nota: Elaboración propia

Tabla 10.

Análisis de %Cu y %Mo a nivel alto por turnos

	%Cu		%Mo	
	A	B	A	B
Media	1.101	1.103	0.0506	0.0507
Desviación estándar	0.0045	0.0039	0.00029	0.00040
Mínimo	1.094	1.095	0.0498	0.0498
Máximo	1.109	1.108	0.0510	0.0515
Rango	0.015	0.013	0.0012	0.0017

Tabla 11.

Comparación del Cu y Mo con MRC de nivel alto

OREAS 504-d: MRC de nivel alto			
	Valor Certificado (%)	Media experimental	Sesgo
Cu	1.100 %	1.101 %	0.057
Mo	0.0507 %	0.0507 %	-0.003

La consistencia de los resultados a través de los tres niveles de concentración (sesgos < 0.06% en todos los casos) valida estadísticamente el método, cumpliendo con los criterios de calidad establecidos en normas internacionales como la ISO 17025. La ausencia de sesgos significativos sugiere que el sistema analítico está correctamente calibrado y que no existen interferencias matriciales relevantes.

6.1.1. Gráficos de control

En otra instancia, se realizó los gráficos de control correspondientes a los análisis de cobre y molibdeno en materiales de referencia certificados (MRC) de nivel bajo, en el caso del cobre, en la figura 4 muestra estabilidad en las mediciones realizadas.

La línea central, que representa el valor promedio de las determinaciones, se ubica en 0.273%, muy cercano al valor certificado de 0.272%. La dispersión de los datos es mínima, con la mayoría de las mediciones situadas dentro del rango de ± 1 desviación estándar y ninguna sobre de ± 3 desviación estándar. Este comportamiento confirma que el sistema de medición opera dentro de parámetros de control estadístico, sin presentar variaciones significativas que puedan afectar la confiabilidad de los resultados. La ausencia de tendencias ascendentes o

descendentes, así como la falta de puntos fuera de los límites de control, refuerzan la conclusión de que el proceso analítico para la determinación de cobre en bajas concentraciones se encuentra controlado.

La figura 5 correspondiente al molibdeno revela que la media experimental se acerca al valor certificado de 0.0095%. La escala reducida del gráfico pone en evidencia la capacidad del método para mantener una buena exactitud incluso en el rango de concentraciones muy bajas, donde normalmente se esperaría una mayor variabilidad relativa. Asimismo, la mayoría de los puntos se concentran estrechamente alrededor de la línea central, sin superar los límites de ± 3 desviación estándar, lo que confirma la reproducibilidad del método.

Tabla 12.

Cálculos de data de veracidad para OREAS 501-d

%Cu							
%Cu analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LC-1DESV.STD	LC-2DESV.STD	LC-3DESV.STD
0.269	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.268	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.275	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.279	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.269	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.275	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.278	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.276	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265

0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.271	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.276	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.271	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.275	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265

0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.270	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.269	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.277	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.267	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.276	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.269	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.274	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.275	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.272	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.269	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265
0.273	0.273	0.275	0.277	0.280	0.270	0.268	0.265

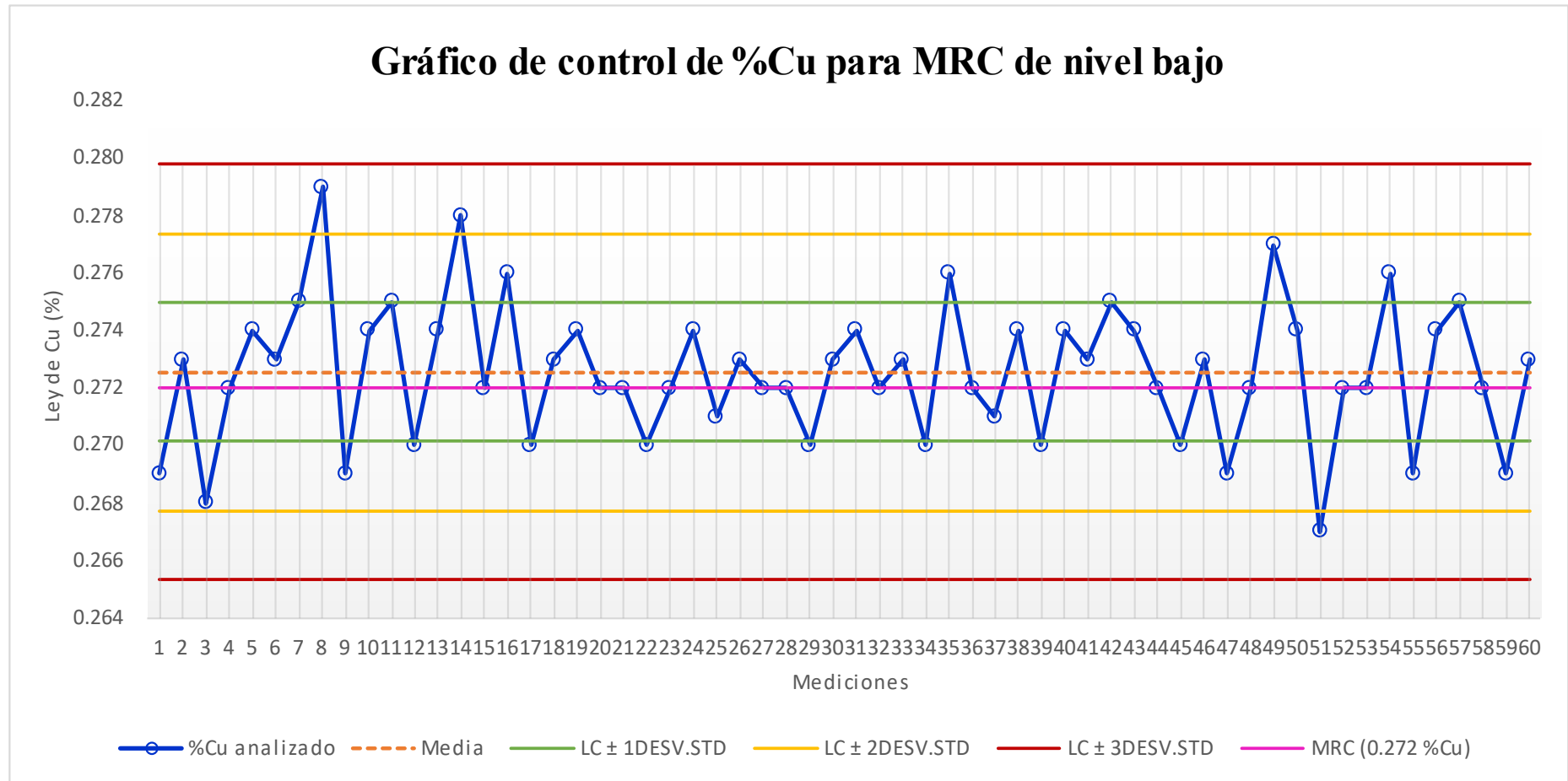
%Mo							
%Mo analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LIM INF -1	LIM INF -2	LIM INF -3
0.0097	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0093	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0098	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0098	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091

[illegible]

0.0099	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0098	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0096	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0094	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0092	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091
0.0095	0.0095	0.0097	0.0098	0.0100	0.0094	0.0093	0.0091

Figura 4.

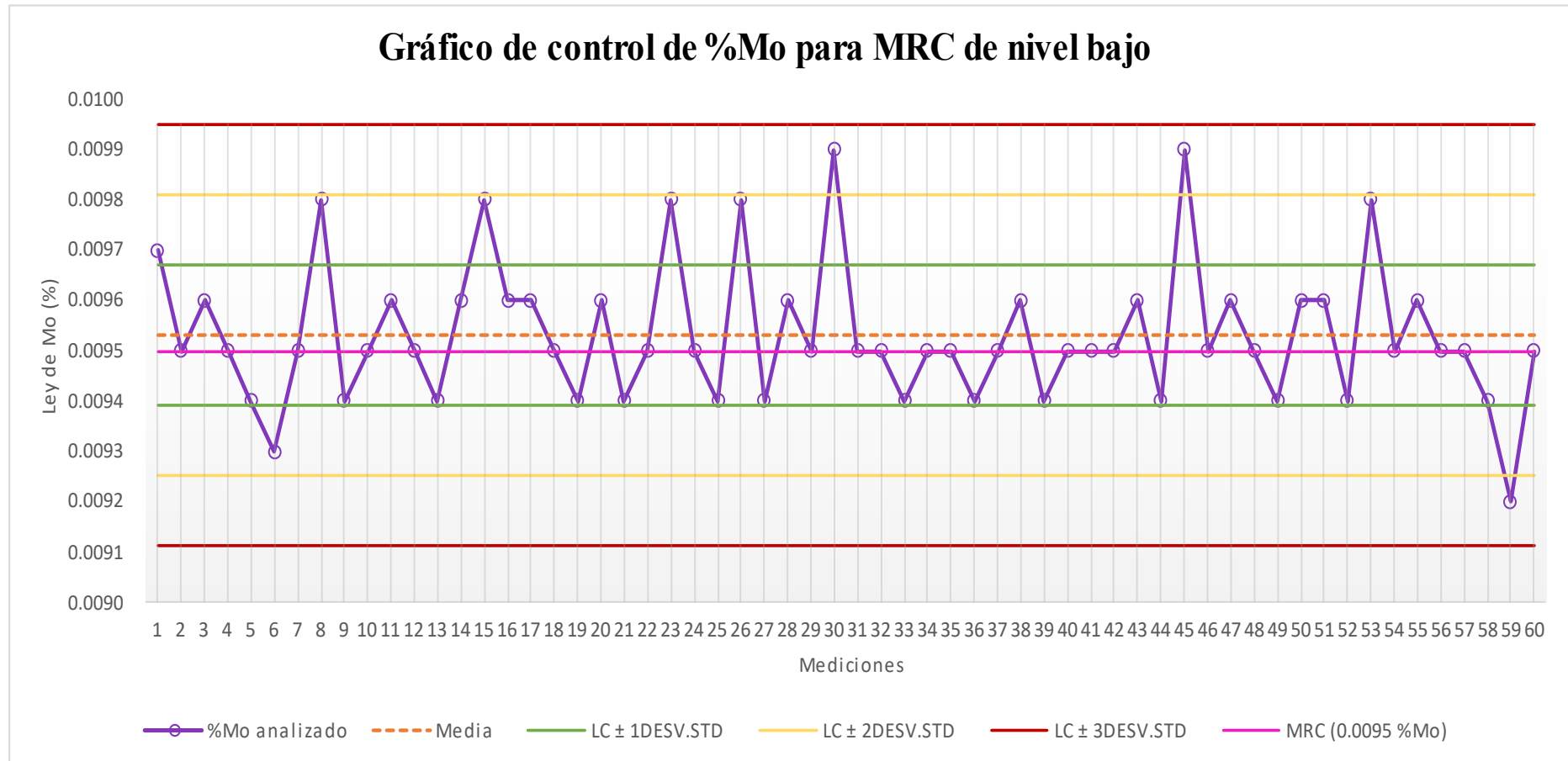
Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel bajo



Nota: Elaboración propia

Figura 5.

Gráfica de control de %Mo para MRC de nivel bajo



Nota: Elaboración propia

Los gráficos de control correspondientes a los materiales de referencia certificados (MRC) de nivel medio para cobre y molibdeno demuestran un buen desempeño del método analítico implementado en el laboratorio. Estos resultados confirman la robustez del sistema de medición en el rango de concentraciones medias, complementando los hallazgos previamente obtenidos para bajas concentraciones.

En el caso del cobre, Figura 6, el gráfico de control muestra un comportamiento estable a lo largo de las 60 mediciones realizadas. La línea central, que representa el valor promedio de las determinaciones, se mantiene constante en 0.524%, acercándose mucho al valor certificado del material de referencia. Este nivel de exactitud es particularmente relevante, ya que demuestra la capacidad del método para proporcionar resultados confiables en concentraciones medias, donde muchos sistemas analíticos suelen presentar mayores variaciones. La dispersión de los datos es mínima, con todas las mediciones situadas dentro del rango de ± 3 desviación estándar. No se observan patrones de comportamiento anómalos, como tendencias ascendentes o descendentes, ni agrupamientos de puntos que pudieran indicar problemas en el proceso de medición.

El gráfico correspondiente al molibdeno, Figura 7, revela que la media experimental de 0.0348% está muy próximo al valor certificado. Además, la mayoría de los puntos se distribuyen estrechamente alrededor de la línea central, sin superar los límites de ± 3 desviación estándar, lo que confirma la reproducibilidad del método en condiciones rutinarias de trabajo.

Tabla 13.

Cálculos de data de veracidad para OREAS 503-d

%Cu							
%Cu analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LC-1DESV.STD	LC-2DESV.STD	LC-3DESV.STD
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519

0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.521	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.520	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519

0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.520	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.525	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.523	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.522	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.527	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.526	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519
0.524	0.524	0.526	0.528	0.530	0.523	0.521	0.519

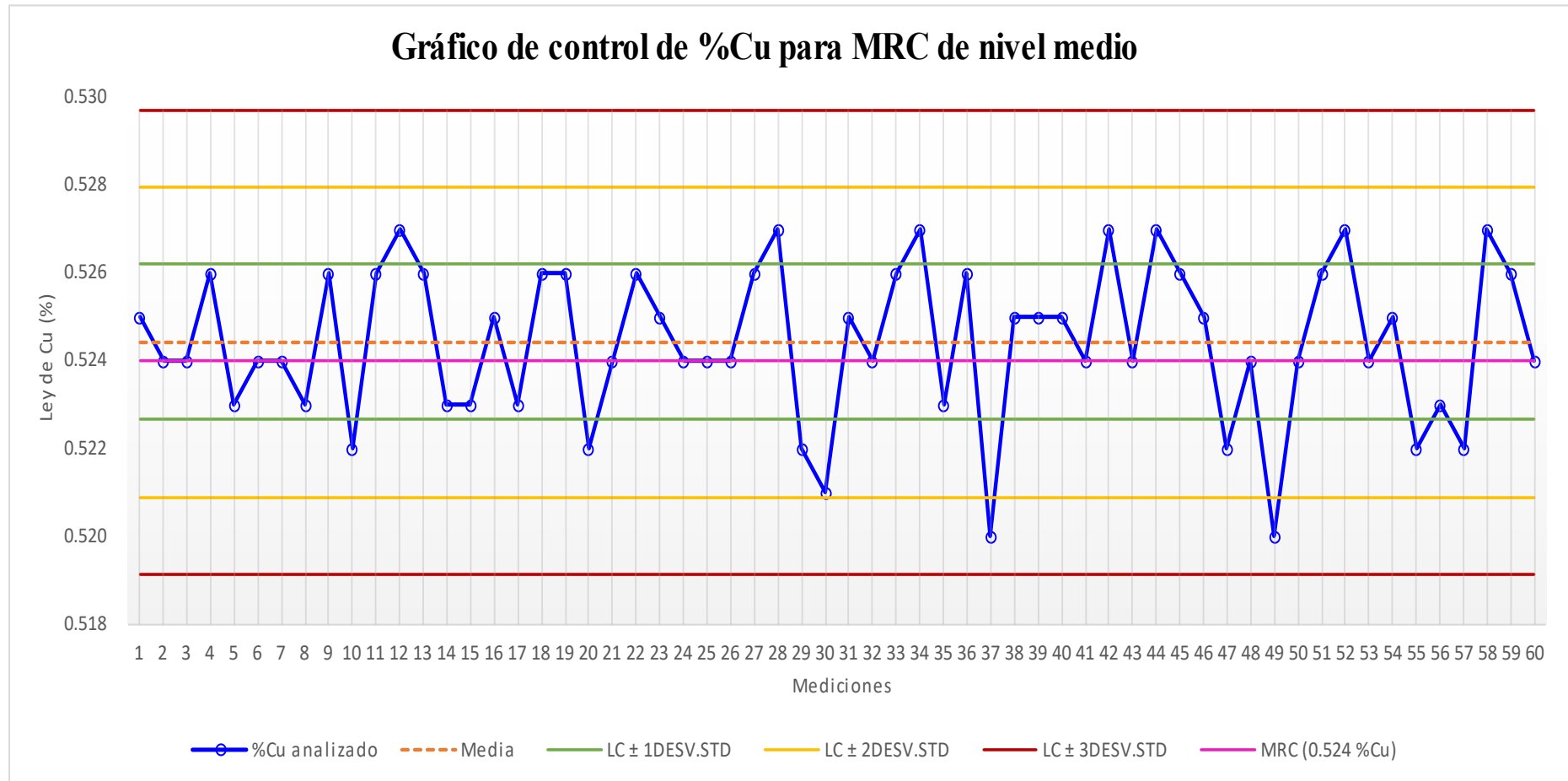
%Mo							
%Mo analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LIM INF -1	LIM INF -2	LIM INF -3
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0345	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344

0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0351	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344

0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0345	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0346	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0345	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0345	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0350	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0349	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0347	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344
0.0348	0.0348	0.0349	0.0351	0.0352	0.0346	0.0345	0.0344

Figura 6.

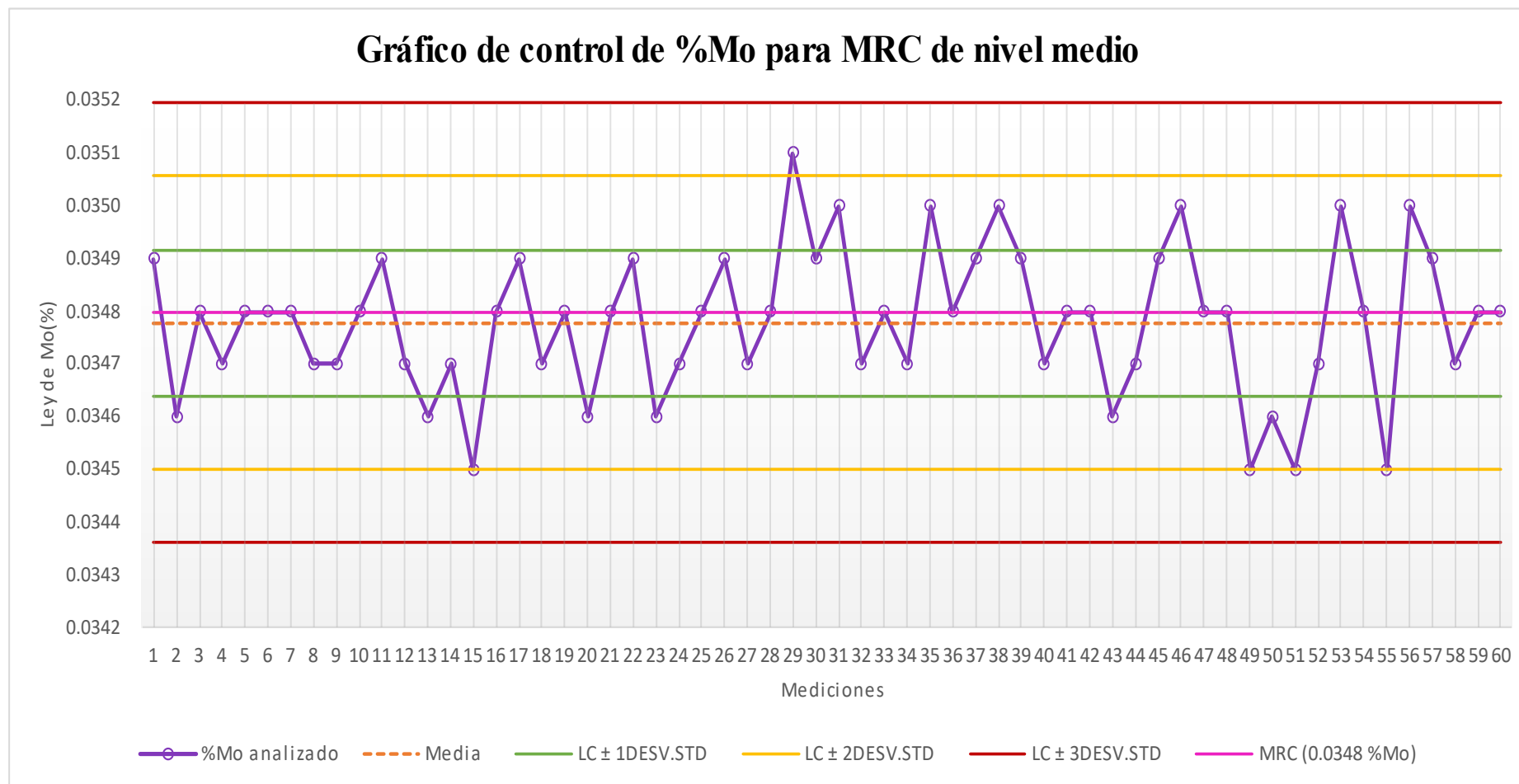
Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel medio



Nota: Elaboración propia

Figura 7.

Gráfica de control de %Mo para MRC de nivel medio



Nota: Elaboración propia

Los gráficos de control correspondientes a los materiales de referencia certificados (MRC) de nivel alto para cobre y molibdeno completan la evaluación del desempeño analítico en todo el rango de concentraciones de trabajo. Estos resultados finales confirman la robustez y confiabilidad del método de espectroscopia de absorción atómica implementado en el laboratorio.

Para el cobre (Figura 8), el gráfico de control muestra un comportamiento consistente con lo observado en los niveles bajo y medio. La línea central se mantiene estable en 1.101%, además la dispersión de los datos es mínima, con todas las mediciones dentro del rango de ± 2 desviación estándar, demostrando que el método conserva su precisión incluso en el extremo superior del rango de trabajo. Particularmente relevante es la ausencia de efectos de matriz en estas concentraciones más elevadas, que suelen presentar mayores desafíos analíticos. No se observan patrones de variación sistemática ni puntos fuera de control, lo que valida la estabilidad del sistema de medición a lo largo del tiempo.

El gráfico correspondiente al molibdeno (Figura 9) revela resultados igualmente satisfactorios. La media experimental es de 0.0505% mientras que el valor certificado de 0.0507% demuestra una variabilidad reducida. Todos los puntos se mantienen dentro de los límites de ± 3 desviación estándar, confirmando la precisión del método. Este desempeño es especialmente significativo considerando que el molibdeno en altas concentraciones puede presentar mayores dificultades analíticas debido a posibles interferencias espectrales. La estabilidad demostrada a lo largo de las 60 mediciones evidencia que el método ha sido adecuadamente optimizado para superar estos desafíos.

Tabla 14.

Cálculos de data de veracidad para OREAS 504-d

%Cu							
%Cu analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LC-1DESV.STD	LC-2DESV.STD	LC-3DESV.STD
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.104	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.108	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.107	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.108	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.098	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.095	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.104	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.097	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.099	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.103	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.108	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.109	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088

1.095	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.092	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.108	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.097	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.107	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.095	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.097	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.105	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.104	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.106	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.107	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.094	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088

1.104	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.106	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.097	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.106	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.098	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.096	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.098	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.099	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.099	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.094	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.099	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.098	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.102	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.100	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088
1.095	1.101	1.105	1.109	1.113	1.096	1.092	1.088

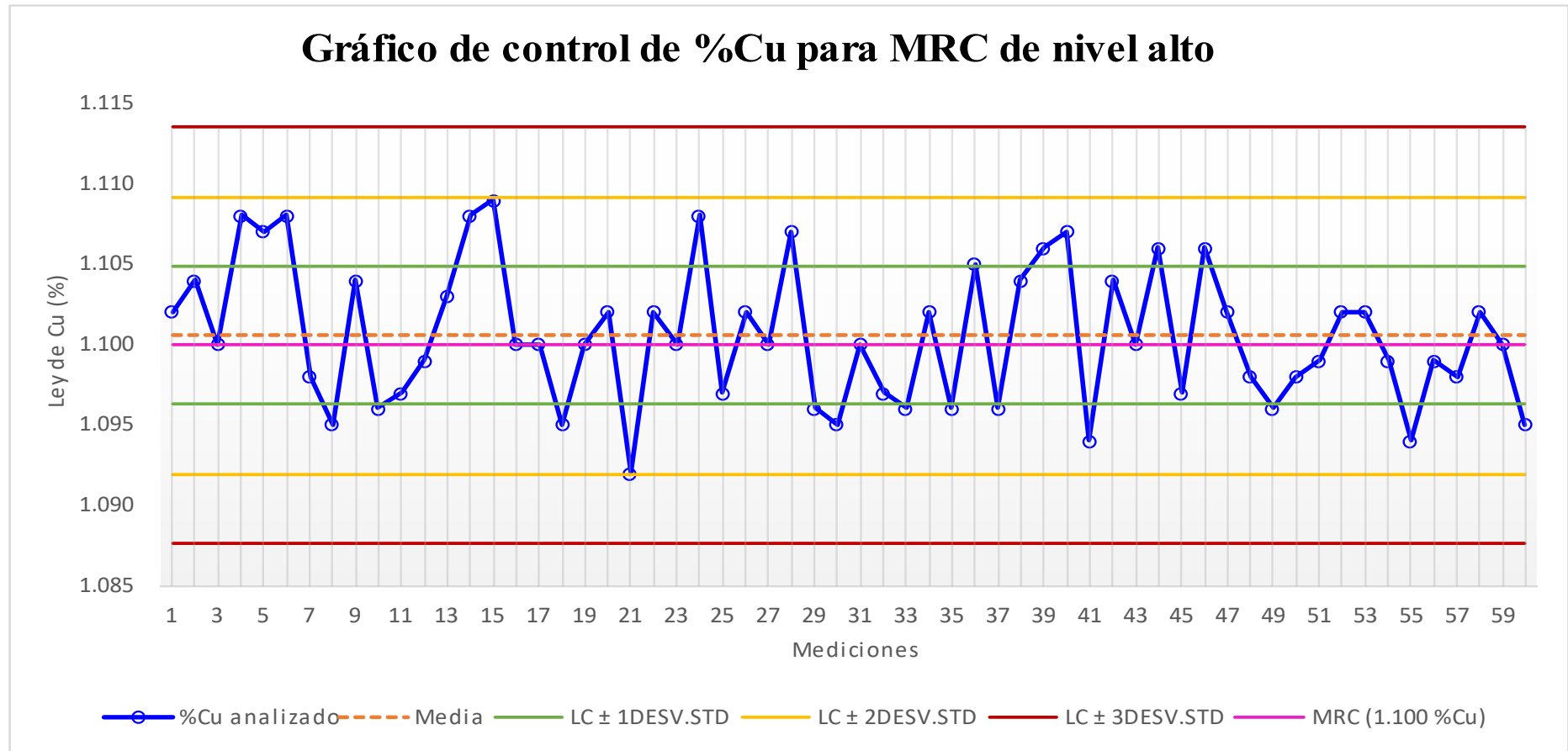
%Mo							
%Mo analizado	Media	LC ± 1DESV.STD	LC ± 2DESV.STD	LC ± 3DESV.STD	LIM INF -1	LIM INF -2	LIM INF -3
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0515	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0502	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0504	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0499	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0512	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0504	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0499	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496

0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0505	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0498	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0505	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0504	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0503	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0515	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0505	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0503	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0499	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496

0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0504	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0498	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0505	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0507	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0506	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0510	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0509	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0508	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496
0.0505	0.0507	0.0510	0.0514	0.0517	0.0503	0.0500	0.0496

Figura 8.

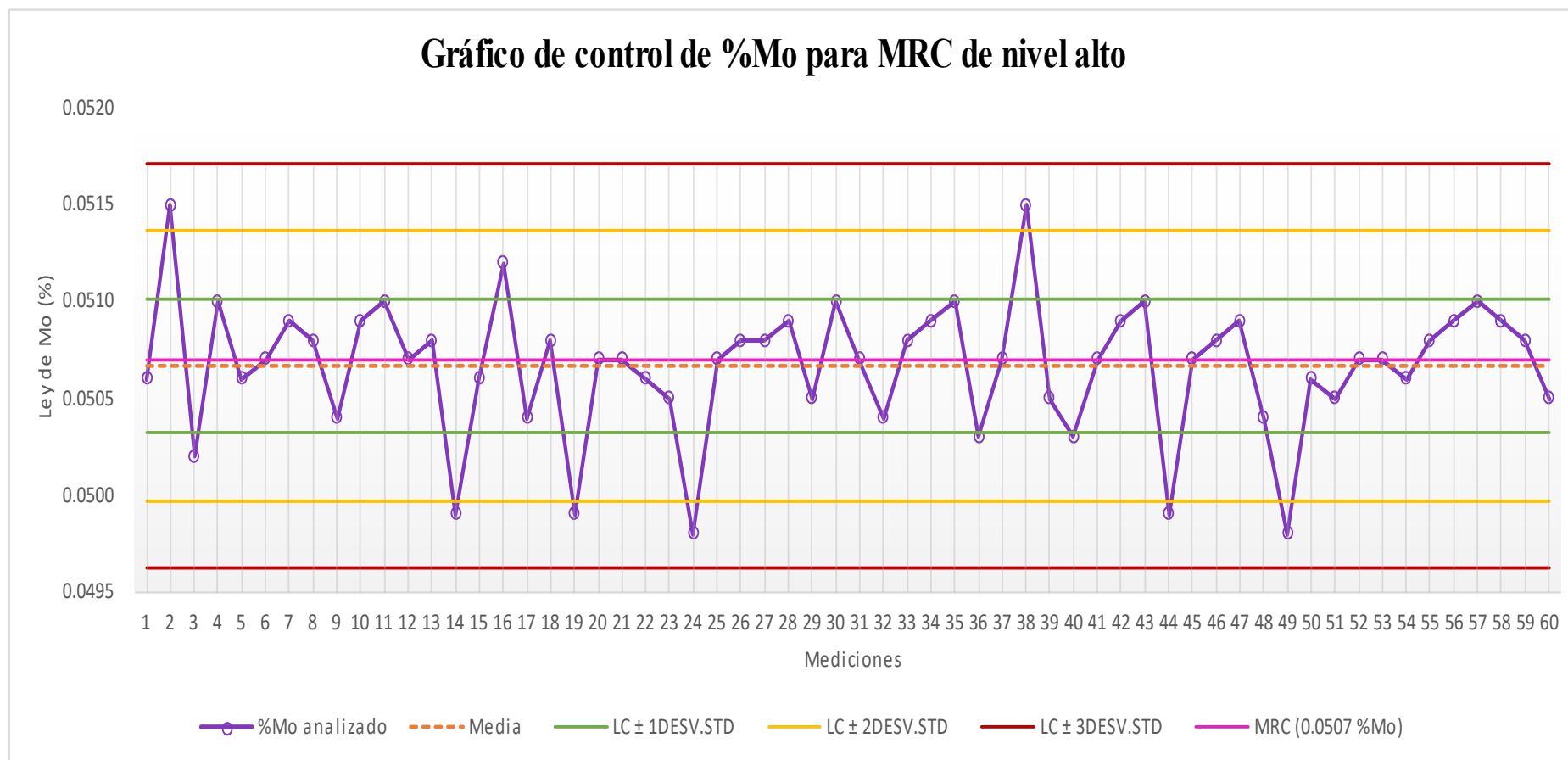
Gráfica de control de %Cu para MRC de nivel alto



Nota: Elaboración propia

Figura 9.

Gráfica de control de %Mo para MRC de nivel alto



Nota: Elaboración propia

Como parte fundamental de la validación metodológica, se evaluó la precisión del análisis de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) mediante la comparación del coeficiente de variación relativo (RSD) experimental con los valores teóricos establecidos por la ecuación de Horwitz. Este criterio internacional permite determinar si la variabilidad observada en los resultados se encuentra dentro de los límites esperados para cada nivel de concentración analizado.

En primer lugar, para el cobre en el material de referencia OREAS 501-d para nivel bajo (0.272%), se obtuvo un RSD experimental de 0.89%, el cual resulta significativamente inferior al valor Horwitz de 4.86%. Esta diferencia, equivalente a una quinta parte del límite teórico, demuestra que el método mantiene la precisión incluso en bajas concentraciones, donde normalmente se esperaría mayor variabilidad analítica.

Tabla 15.

RSD Horwitz para MRC de nivel bajo

OREAS 501-d: MRC de nivel bajo				
	Desv. Estándar	Promedio (%Cu)	% RSD experimental	% RSD Horwitz
Cu	0.0024	0.273	0.89	4.86
Mo	0.0001	0.0095	1.46	8.06

Al analizar los resultados para concentraciones medias (OREAS 503-d) con referencia de 0.524% Cu se registra un RSD experimental de 0.34% frente al 4.41% de Horwitz. Esta relación, que muestra una variabilidad trece veces menor que el límite teórico, confirma la robustez del método en este rango de concentración. Cabe destacar que, para el nivel alto (OREAS 504-d, 1.100% Cu), se mantiene esta tendencia con un RSD de 0.39%, diez veces menor que el valor Horwitz de 3.94%, evidenciando consistencia en todo el rango de trabajo.

Por otro lado, los resultados para molibdeno presentan un comportamiento similar. En el nivel bajo (0.0095% Mo), el RSD experimental de 1.46% representa aproximadamente la quinta parte del valor Horwitz (8.06%), mostrando precisión considerando las mayores dificultades analíticas que presenta este elemento. Sin embargo, es en las concentraciones medias y altas donde el método alcanza su mejor desempeño para Mo, con RSD experimentales de 0.40% y 0.69% respectivamente, que equivalen a menos del 10% de los valores teóricos esperados.

Tabla 16.

RSD Horwitz para MRC de nivel medio

OREAS 503-d: MRC de nivel medio				
	Desv. Estándar	Promedio (%Cu)	% RSD experimental	% RSD Horwitz
Cu	0.0018	0.524	0.34	4.41
Mo	0.0001	0.0348	0.40	6.63

Tabla 17.

RSD Horwitz para MRC de nivel alto

OREAS 504-d: MRC de nivel alto				
	Desv. Estándar	Promedio (%Cu)	% RSD experimental	% RSD Horwitz
Cu	0.0043	1.101	0.39	3.94
Mo	0.0003	0.0507	0.69	6.27

6.1.2. *Análisis de t-Student*

Para complementar la evaluación del desempeño analítico, se aplicó la prueba t-Student a los resultados obtenidos con el material de referencia certificado OREAS 501-d (nivel bajo), con el objetivo de determinar estadísticamente si existen diferencias significativas entre los valores experimentales y los valores certificados para cobre (Cu) y molibdeno (Mo). Esta prueba constituye una herramienta fundamental para validar la veracidad del método con un 95% de confianza.

En el caso del cobre (valor certificado: 0.272%), el análisis estadístico reveló un valor t calculado de 1.762, el cual resultó inferior al valor t crítico de 2.000 y un nivel de confianza del 95%. Esta relación permite aceptar la hipótesis nula, que establece que no existen diferencias significativas entre la media experimental (0.273%) y el valor certificado. Cabe destacar que, aunque se observa una mínima diferencia numérica (0.001%), esta no resulta estadísticamente significativa, lo que confirma la exactitud del método para la determinación de Cu en bajas concentraciones. Para el molibdeno (valor certificado: 0.0095%), los resultados mostraron un comportamiento similar. El valor t calculado (1.757) fue nuevamente inferior al valor crítico (2.000), lo que lleva a la misma conclusión de aceptar la hipótesis nula. Es particularmente relevante que, a pesar de tratarse de concentraciones considerablemente más bajas que en el caso del Cu, el método demostró igual capacidad para generar resultados veraces, con una media experimental de 0.0095% que no difiere significativamente del valor certificado.

La prueba t-Student al material de referencia certificado OREAS 503-d (nivel medio), respecto al análisis de cobre (valor certificado: 0.524%), se obtuvo un valor t calculado de 1.897, el cual se encuentra por debajo del valor t crítico de 2.000 (para 59 grados de libertad y $\alpha=0.05$). La media experimental de 0.524% mostró una diferencia mínima de solo 0.0004%

respecto al valor certificado. Esta diferencia, aunque numéricamente detectable, no resulta estadísticamente significativa, lo que permite aceptar la hipótesis nula (H_0) de igualdad entre las medias. Estos resultados demuestran que el método mantiene su exactitud en concentraciones medias de Cu, con una variabilidad controlada ($S = 0.0018$).

Para el molibdeno (valor certificado: 0.0348%), los resultados fueron aún más concluyentes. El valor t calculado (1.206) fue considerablemente menor que el valor crítico (2.000), con una muy baja desviación estándar ($S=0.0001$). La media experimental de 0.0348% presenta una mínima diferencia de 0.00002% respecto al valor certificado. Esta concordancia refuerza la confiabilidad del método para la determinación de Mo en concentraciones medias.

El análisis estadístico mediante la prueba t -Student para el material de referencia certificado OREAS 504-d (nivel alto) completa la validación de la veracidad del método en todo el rango de concentraciones. En el caso del cobre (valor certificado: 1.100%), el análisis estadístico reveló un valor t calculado de 1.019, significativamente inferior al valor crítico de 2.000 (para 59 grados de libertad y $\alpha=0.05$). La media experimental de 1.101% presenta una diferencia mínima de solo 0.0006% respecto al valor certificado. Esta concordancia, con una desviación estándar de 0.0043, permite aceptar con alta confianza la hipótesis nula (H_0), confirmando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos y los certificados. Para el molibdeno (valor certificado: 0.0507%), los resultados fueron aún más concluyentes. El valor t calculado de 0.705 es considerablemente menor que el valor crítico con una desviación estándar del método ($S=0.0003$). La media experimental de 0.0507% muestra una mínima diferencia de 0.00003% respecto al valor de referencia. Este desempeño demuestra que el método mantiene su exactitud incluso en concentraciones altas de Mo, donde podrían esperarse mayores efectos de interferencia.

6.1.3. Sesgo

El análisis del sesgo en los materiales de referencia certificados de nivel bajo constituye un aspecto fundamental para validar la exactitud del método analítico.

En este contexto, se evaluó estadísticamente la magnitud y significancia de las diferencias entre los valores experimentales y los valores certificados para cobre (Cu) y molibdeno (Mo), utilizando como criterio la prueba t-Student.

Para el elemento Cu (valor certificado: 0.272%), se obtuvo un valor t calculado de 0.029, considerablemente inferior al valor t crítico de 2.000 (para 59 grados de libertad y $\alpha=0.05$). La media experimental de 0.273% presentó un sesgo relativo de 0.055%, confirmando que el sesgo del método es aceptable para este elemento en concentraciones bajas. En el caso del Mo (valor certificado: 0.0095%), los resultados fueron aún más concluyentes. El valor t calculado de 0.029 (sesgo relativo de 0.0032%) demostró nuevamente la ausencia de sesgo significativo. La precisión del método ($S = 0.0001$) en este rango de concentración refuerza la confiabilidad de los resultados, particularmente relevante considerando las mayores dificultades analíticas que suelen presentarse en la determinación de Mo en bajas concentraciones.

Mientras que para el análisis del sesgo en materiales de referencia certificados de nivel medio completa la evaluación de la exactitud metodológica en el rango intermedio de concentraciones. Esta validación resulta particularmente relevante por tratarse de valores cercanos a los límites de cuantificación habituales, donde los métodos analíticos suelen presentar mayor sensibilidad a posibles interferencias. En la determinación de Cu (valor certificado: 0.524%), el análisis estadístico reveló un valor t calculado de 0.032, significativamente inferior al valor crítico de 2.000 ($\alpha = 0.05$). La media experimental de 0.524% un sesgo relativo de 0.043 y una desviación estándar experimental de 0.0018; estos

resultados no solo carecen de significancia estadística, sino que se encuentra muy por debajo de los límites aceptables según criterios internacionales. Para Mo (valor certificado: 0.0348%), el valor t calculado de 0.020, asociado a un sesgo relativo de 0.002%, demuestra una concordancia con el valor certificado. La precisión del método ($S = 0.0001$) en este rango resulta especialmente valiosa considerando que las concentraciones medias de Mo suelen presentar mayores desafíos analíticos que las altas concentraciones.

El análisis del sesgo en materiales de referencia de alta concentración (OREAS 504-d) completa la validación metodológica en todo el rango de trabajo analítico. Esta evaluación resulta crucial ya que las altas concentraciones pueden presentar efectos de matriz más pronunciados y desafíos adicionales en la precisión analítica. Para el Cu (valor certificado: 1.100%), se obtuvo un valor t calculado de 0.017, significativamente inferior al valor crítico de 2.000 ($\alpha=0.05$, 59 gl). La media experimental de 1.101% demostró un sesgo relativo de 0.057% con una desviación estándar experimental (0.0043). En el caso del Mo (valor certificado: 0.0507%), el valor t calculado de 0.012 con sesgo relativo de 0.003%, confirma la exactitud del método. Particularmente destacable es la precisión mantenida ($S=0.0003$) a pesar de tratarse de concentraciones elevadas, donde normalmente se podrían esperar mayores variaciones.

6.2. Precisión

En consiguiente, para realizar el análisis de precisión se utilizó las siguientes bases de datos presentados en las tablas 18, 19 y 20.

Tabla 18.

Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel bajo

Analistas	Muestras de ley baja							
	%Cu				%Mo			
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
1	0.332	0.329	0.333	0.329	0.0281	0.0278	0.0272	0.0282
2	0.330	0.331	0.334	0.335	0.0279	0.0283	0.0275	0.0288
3	0.335	0.335	0.328	0.333	0.0283	0.0277	0.0276	0.0279
4	0.328	0.325	0.330	0.329	0.0287	0.0282	0.0282	0.0283

Tabla 19.

Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel medio

Analistas	Muestras de ley media							
	%Cu				%Mo			
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
1	0.745	0.748	0.742	0.741	0.0401	0.0399	0.0408	0.0413
2	0.749	0.747	0.742	0.747	0.0397	0.0395	0.0395	0.0407
3	0.746	0.744	0.742	0.746	0.0404	0.0394	0.0409	0.0405
4	0.749	0.750	0.750	0.743	0.0405	0.0402	0.0399	0.0389

Tabla 20.

Base de datos para precisión del %Cu y %Mo a nivel alto

Analistas	Muestras de ley alta							
	%Cu				%Mo			
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
1	1.081	1.090	1.072	1.094	0.0561	0.0569	0.0565	0.0559
2	1.090	1.081	1.093	1.089	0.0558	0.0551	0.0560	0.0552
3	1.075	1.082	1.081	1.085	0.0559	0.0552	0.0560	0.0561
4	1.098	1.079	1.090	1.089	0.0562	0.0568	0.0563	0.0559

Los resultados obtenidos en la evaluación de precisión para los elementos Cu y Mo en niveles bajos de concentración demuestran un comportamiento consistente y confiable del

método analítico empleado. En el caso del cobre (Cu), se observó una varianza de repetibilidad (S_r^2) de 6.375×10^{-6} , acompañada de una desviación estándar de repetibilidad (S_r) de 0.0025, lo que indica una consistencia en las mediciones realizadas bajo condiciones controladas. La reproducibilidad mostró valores igualmente bajos, con S_R de 0.0031, siendo ligeramente superior a S_r como era de esperarse, ya que incorpora mayores fuentes de variabilidad. Los coeficientes de variación relativa ($RSD_r = 0.76\%$ y $RSD_R = 0.93\%$) se mantuvieron muy por debajo del 5%, umbral típicamente aceptado en métodos analíticos, confirmando la precisión del método. Los límites de repetibilidad ($r = 0.0071$) y reproducibilidad ($R = 0.0087$) calculados al 95% de confianza refuerzan esta conclusión, ya que establecen márgenes de variación aceptables para el método.

Para el molibdeno (Mo) se obtuvieron una varianza de repetibilidad (S_r^2) de 1.660×10^{-7} y una desviación estándar (S_r) de 0.0004, valores bajos que reflejan una mínima dispersión en las mediciones. La reproducibilidad ($S_R = 0.0004$) fue muy similar a la repetibilidad, lo que sugiere que las condiciones entre analistas y días de trabajo no introdujeron variabilidad adicional significativa. Los RSD para Mo ($RSD_r = 1.45\%$ y $RSD_R = 1.53\%$) fueron superiores a los de Cu, pero aún dentro de rangos aceptables, confirmando la robustez del método. Los límites de repetibilidad ($r = 0.0011$) y reproducibilidad ($R = 0.0012$) calculados para Mo indica una adecuada precisión en la determinación de este elemento.

Tabla 21.

Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel bajo

Nivel bajo – OREAS 501-d							
	S_r^2	S_L^2	S_R^2	S_r	S_R	RSD_R	RSD_r
Cu	6.375E-06	3.198E-06	9.573E-06	0.0025	0.0031	0.93%	0.76%
Mo	1.660E-07	1.740E-08	1.834E-07	0.0004	0.0004	1.53%	1.45%

Los resultados obtenidos para la evaluación de precisión en nivel medio de concentración tanto para cobre (Cu) como para molibdeno (Mo) confirman la robustez y confiabilidad del método analítico implementado. Para el caso del Cu, se observó una varianza de repetibilidad (S_r^2) de 8.479×10^{-6} , con una desviación estándar de repetibilidad (S_r) de 0.0029, valores que indican consistencia en las mediciones realizadas bajo condiciones controladas. La desviación estándar de reproducibilidad ($S_R = 0.0031$) mostró un ligero incremento respecto a S_r , como es esperable al incorporar variables como diferentes analistas y días de trabajo, aunque esta diferencia resulta mínima (0.0031 vs 0.0029). Los coeficientes de variación ($RSD_r = 0.39\%$ y $RSD_R = 0.42\%$) se mantuvieron significativamente por debajo del 5%, umbral establecido como aceptable en métodos analíticos, lo que reafirma la alta precisión del método. Los límites de repetibilidad ($r = 0.0082$) y reproducibilidad ($R = 0.0087$) calculados al 95% de confianza demuestran márgenes de variación sumamente estrechos, validando la consistencia del método en la determinación de Cu a concentraciones medias.

Para el molibdeno (Mo), los resultados fueron igualmente satisfactorios, con una varianza de repetibilidad (S_r^2) de 4.088×10^{-7} , valor muy bajo que se tradujo en una desviación estándar (S_r) de 0.0006. La reproducibilidad ($S_R = 0.0006$) evidencia que las variaciones entre analistas y días no introdujeron dispersión adicional significativa en los resultados. Los RSD para Mo ($RSD_r = 1.59\%$ y $RSD_R = 1.61\%$) fueron ligeramente superiores a los observados para Cu, pero se mantuvieron dentro del rango, confirmando la precisión del método. Los límites calculados de repetibilidad ($r = 0.00179$) y reproducibilidad ($R = 0.00181$) indican una alta reproducibilidad en la determinación de Mo a concentraciones medias.

Tabla 22.

Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel medio

Nivel medio – OREAS 503-d							
	S_r^2	S_L^2	S_R^2	S_r	S_R	RSD_R	RSD_r
Cu	8.479E-06	1.188E-06	9.667E-06	0.0029	0.0031	0.42%	0.39%
Mo	4.088E-07	7.188E-09	4.160E-07	0.0006	0.0006	1.61%	1.59%

Los resultados obtenidos para las determinaciones de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en niveles altos de concentración demuestran un buen desempeño del método analítico empleado. Para el Cu, se registró una varianza de repetibilidad (S_r^2) de 5.019×10^{-5} , con una desviación estándar de repetibilidad (S_r) de 0.0071, valores que indican una dispersión mínima en las mediciones realizadas bajo condiciones controladas. La desviación estándar de reproducibilidad ($S_R = 0.0072$) mostró una diferencia mínima respecto a S_r (0,0072 vs 0,0071), evidenciando que las variaciones entre analistas y días de trabajo no introdujeron dispersión adicional relevante. Los coeficientes de variación ($RSD_r = 0.65\%$ y $RSD_R = 0.67\%$) se mantuvieron bajos, muy por debajo del umbral del 5% establecido como aceptable en métodos analíticos, confirmando la precisión del método incluso en concentraciones elevadas. Los límites de repetibilidad ($r = 0.0198$) y reproducibilidad ($R = 0.0202$) calculados al 95% de confianza, validan la consistencia del método en la determinación de Cu en este rango de concentración.

En el caso del Mo la varianza de repetibilidad ($S_r^2 = 1.748 \times 10^{-7}$) generó una desviación estándar (S_r) de apenas 0.0004, mientras que la reproducibilidad ($S_R = 0.0005$) mostró una diferencia mínima respecto a la repetibilidad. Los coeficientes de variación para Mo ($RSD_r = 0.75\%$ y $RSD_R = 0.96\%$), aunque ligeramente superiores a los del Cu, se mantuvieron en rangos excelentes, confirmando la robustez del método. Los límites de repetibilidad ($r = 0.0012$) y

reproducibilidad ($R = 0.0015$) calculados para Mo en nivel alto resultaron particularmente estrechos, evidenciando precisión en la determinación de este elemento incluso a elevadas concentraciones.

Tabla 23.

Varianza y desviación estándar de Cu y Mo a nivel alto

Nivel alto – OREAS 504-d							
	S_r^2	S_L^2	S_R^2	S_r	S_R	RSD_R	RSD_r
Cu	5.019E-05	2.094E-06	5.228E-05	0.0071	0.0072	0.67%	0.65%
Mo	1.748E-07	1.156E-07	2.904E-07	0.0004	0.0005	0.96%	0.75%

La comparación de estos resultados con los obtenidos en niveles bajos y medios revela consistencia en el desempeño del método a lo largo de todo el rango de concentraciones analizado. Las mínimas diferencias observadas entre S_r y S_R , junto con los bajos valores de RSD (todos inferiores al 1% para Cu y menores al 1% para Mo), confirman que el método presenta precisión tanto en condiciones de repetibilidad como de reproducibilidad, independientemente del nivel de concentración analizado. Esta performance analítica cumple ampliamente con los requisitos establecidos en normativas internacionales como la ISO 5725, garantizando la confiabilidad de los resultados para la toma de decisiones técnicas en el ámbito minero. La consistencia observada entre diferentes analistas y días de trabajo valida la robustez del procedimiento analítico y la adecuada estandarización de los protocolos en el laboratorio, asegurando la generación de datos confiables para la cuantificación rutinaria de Cu y Mo en muestras geológicas en todo el rango de concentraciones evaluado.

Como parte del análisis y escrutinio de los datos obtenidos y recolectados en los tres niveles de concentración analizados, se evalúa la posibilidad que existan concentraciones analizadas inconsistentes con todos los demás resultados obtenidos. Por consiguiente, se

emplea la técnica gráfica de consistencia utilizando las medidas de estadísticos h y k de Mandel. De encontrar hallazgos de datos inconsistentes, se tendría que evaluar las posibilidades de continuar con los resultados obtenidos, planificar la repetición del análisis de las muestras involucradas o retirar los datos de análisis inconsistentes.

Tabla 24.

Valores críticos de Mandel

Nivel de confianza	MANDEL	
	h	k
99%	1.49	1.60
95%	1.42	1.44

Nota: ISO (2023)

A continuación, se presentan los gráficos de los resultados de la prueba de Mandel aplicada a las determinaciones de cobre y molibdeno, evaluando la consistencia entre los cuatro analistas (1, 2, 3 y 4).

Tabla 25.

Cálculo de Mandel de nivel bajo

Analistas	hi %Cu	ki %Cu	hi %Mo	ki %Mo
1	-0.114	0.816	-0.901	1.104
2	0.685	0.943	0.335	1.365
3	0.799	1.309	-0.695	0.760
4	-1.370	0.856	1.262	0.584

Figura 10.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel bajo

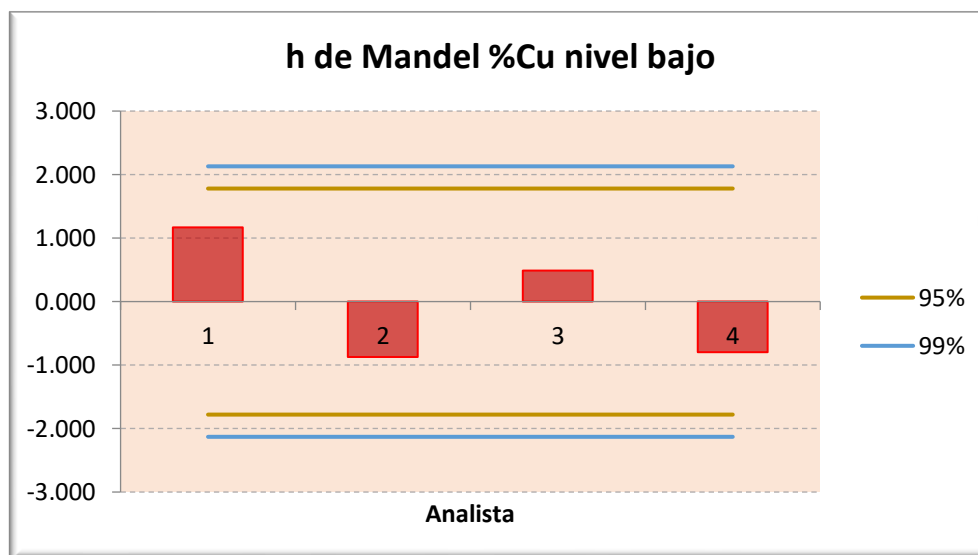


Figura 11.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel bajo

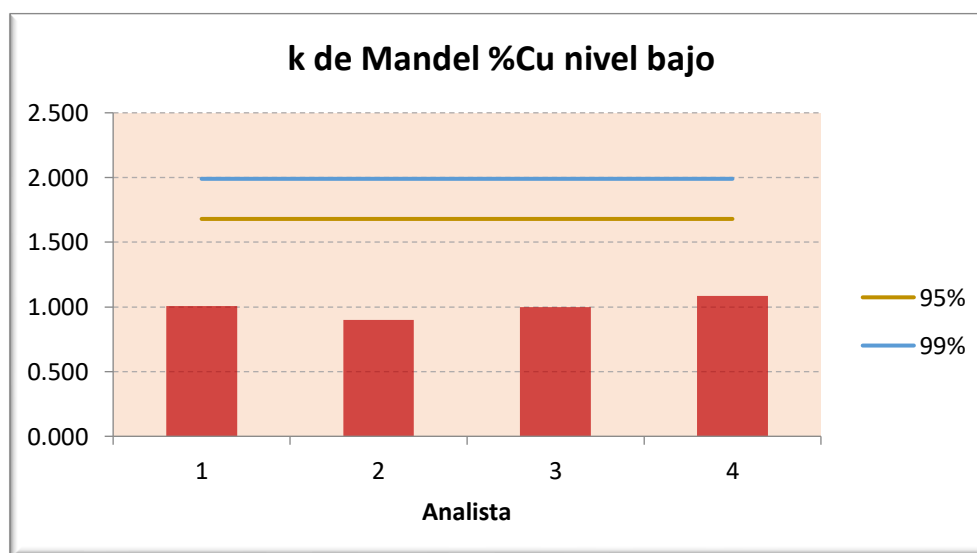


Figura 12.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel bajo

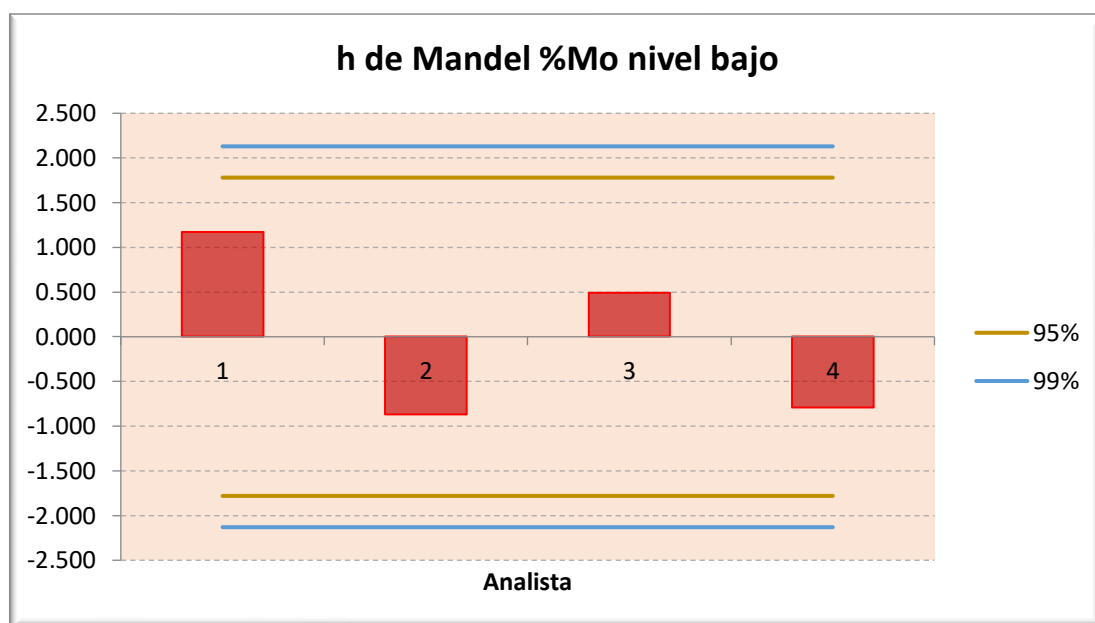
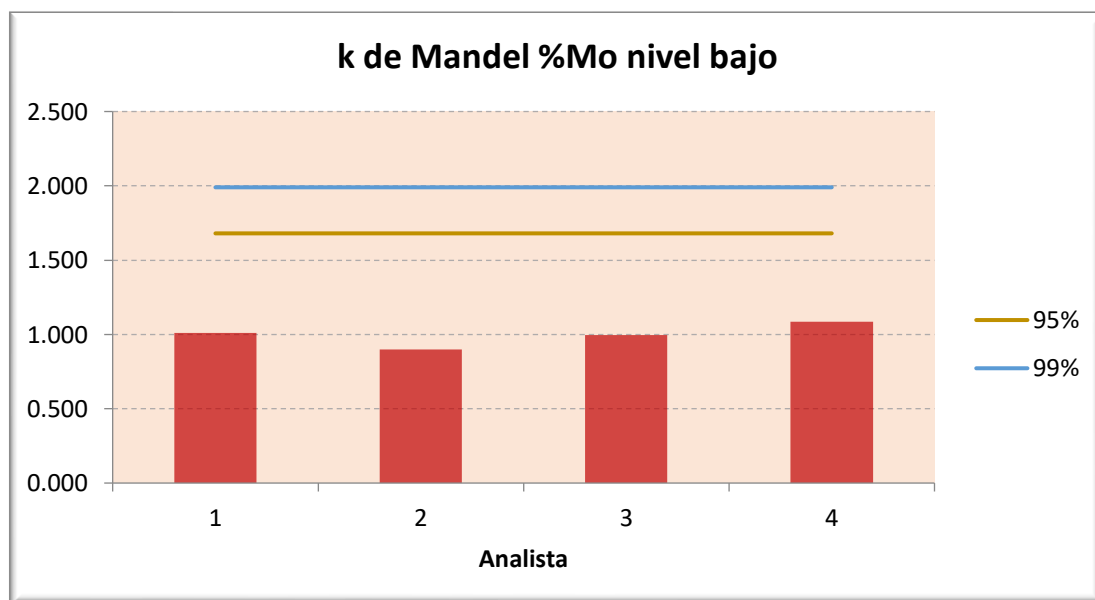


Figura 13.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel bajo



En el caso del cobre (Cu) para nivel bajo, los resultados de las pruebas de Mandel h y k para evaluar la concordancia entre analistas en la determinación de cobre y molibdeno demuestran un buen desempeño del método analítico empleado. Los valores obtenidos en la

prueba de Mandel h oscilaron entre -1.370 y 0.685, encontrándose todos significativamente por debajo de los valores críticos de referencia (1.42 para un nivel de confianza del 95% y 1.49 para el 99%). La media global fue de 0.331 con una desviación estándar mínima de 0.00216, lo que indica una escasa variabilidad entre los resultados de los diferentes analistas. La prueba de Mandel k mostró valores entre 0.816 y 1.309, confirmando que no existen diferencias significativas en la precisión entre los operadores. Para el molibdeno (Mo) se observó un comportamiento similar, con valores h entre -0.901 y 1.262 y valores k entre 0.584 y 1.365, todos dentro de los límites aceptables. La media global fue de 0.0280 con una desviación estándar de 0.00024, demostrando una mínima dispersión entre los resultados.

Tabla 26.

Cálculo de Mandel de nivel medio

Analistas	hi %Cu	ki %Cu	hi %Mo	ki %Mo
1	-0.928	1.086	1.172	1.009
2	0.309	1.025	-0.869	0.899
3	-0.653	0.658	0.491	0.997
4	1.272	1.156	-0.794	1.086

Figura 14.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel medio

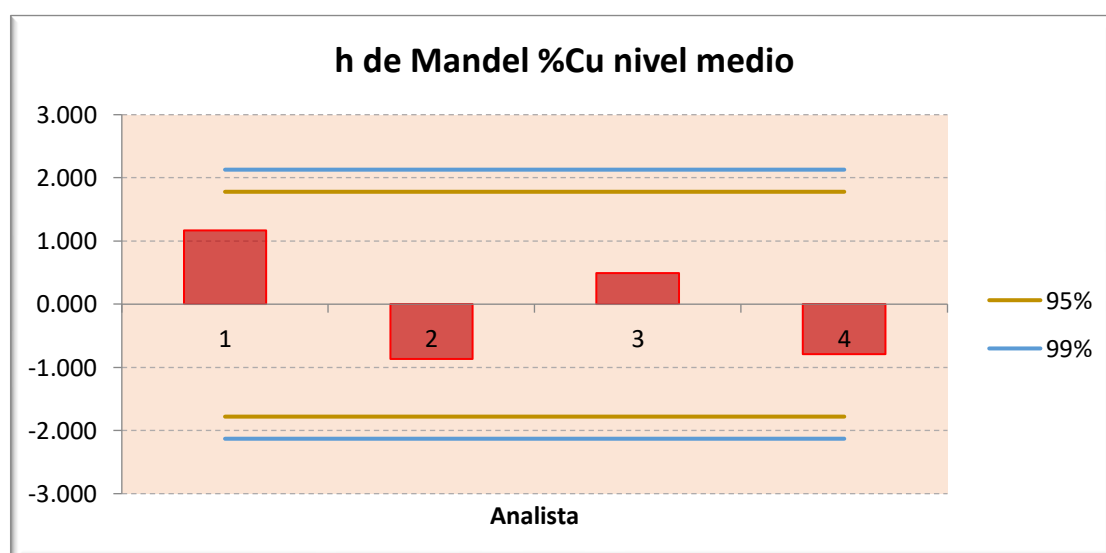


Figura 15.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel medio

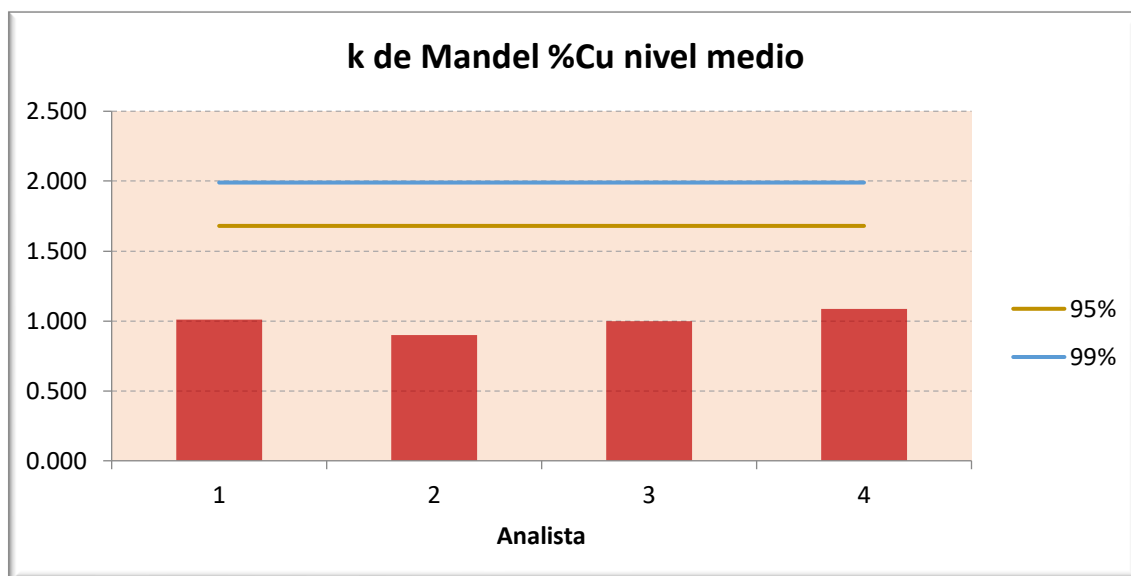


Figura 16.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel medio

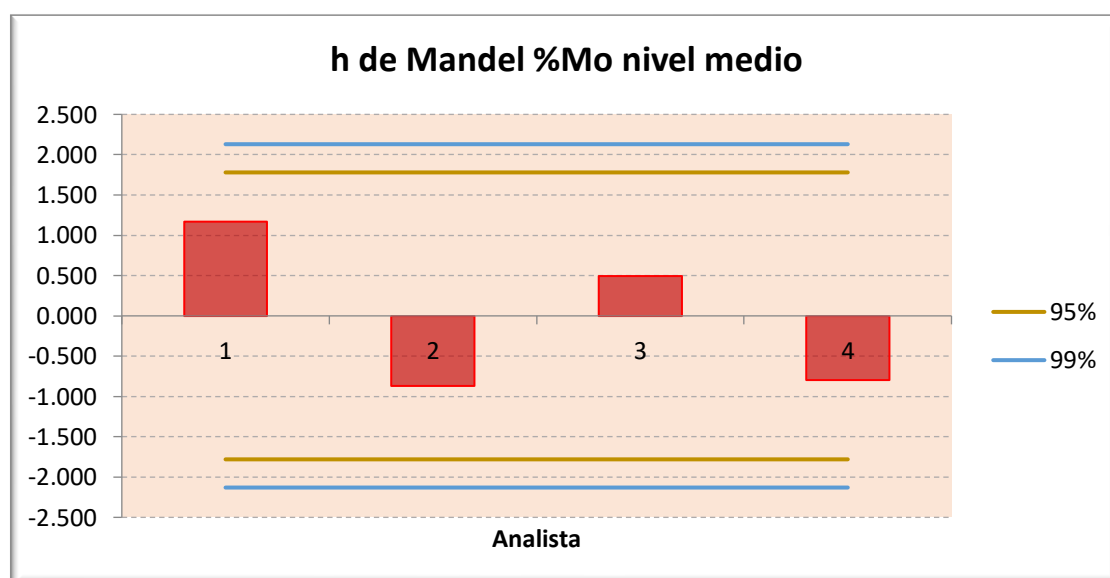
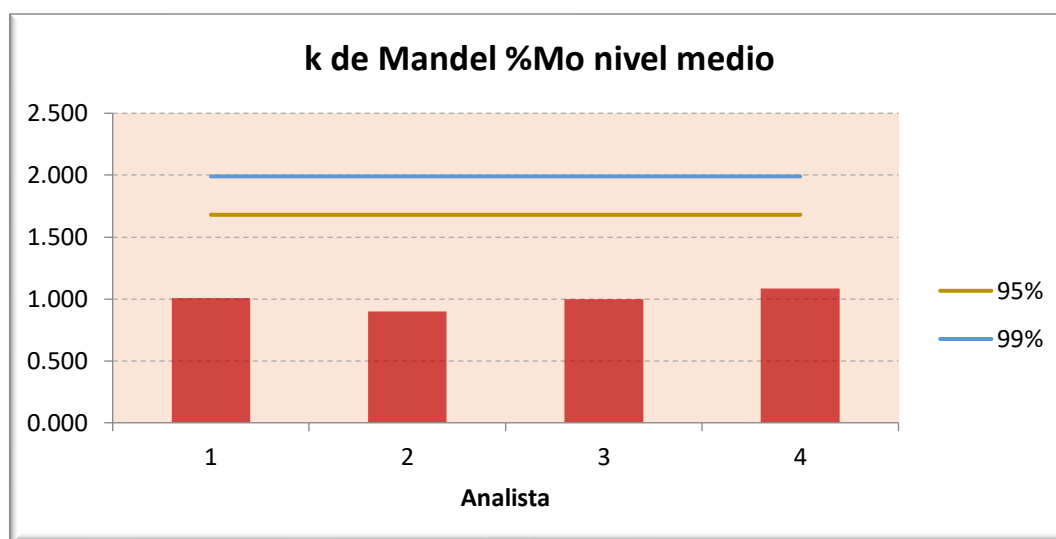


Figura 17.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel medio



Respecto a los niveles medios, para el cobre (Cu), se tiene una media global de 0.746 y desviación estándar de 0.00182 entre promedios, los valores h oscilaron entre -0.928 y 1.272, significativamente inferiores a los valores críticos de referencia (1.42 al 95% y 1.49 al 99% de confianza). Esta variación representa apenas el 65% del límite máximo permisible, evidenciando consistencia en las mediciones. Los resultados de la prueba k , comprendidos entre 0.658 y 1.156, se mantuvieron consistentemente por debajo del umbral crítico de 1.44, confirmando la homogeneidad en la precisión analítica entre operadores. En el caso del molibdeno (Mo), se observó un comportamiento similar, aunque con mayor dispersión relativa. La media global de 0.0401 presentó una desviación estándar baja (0.00033), con valores h entre -0.869 y 1.172. Este último valor, aunque el más alto registrado, apenas alcanza el 82% del valor crítico máximo. Los resultados k , en el rango de 0.899 a 1.086, demuestran la precisión y consistencia de las mediciones, donde el valor más alto representa solo el 70% del límite establecido.

Tabla 27.

Cálculo de Mandel de nivel alto

Analistas	hi %Cu	ki %Cu	hi %Mo	ki %Mo
1	-0.343	1.385	0.893	1.061
2	0.702	0.723	-1.174	1.058
3	-1.258	0.592	-0.485	0.976
4	0.898	1.099	0.767	0.895

Figura 18.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Cu de nivel alto

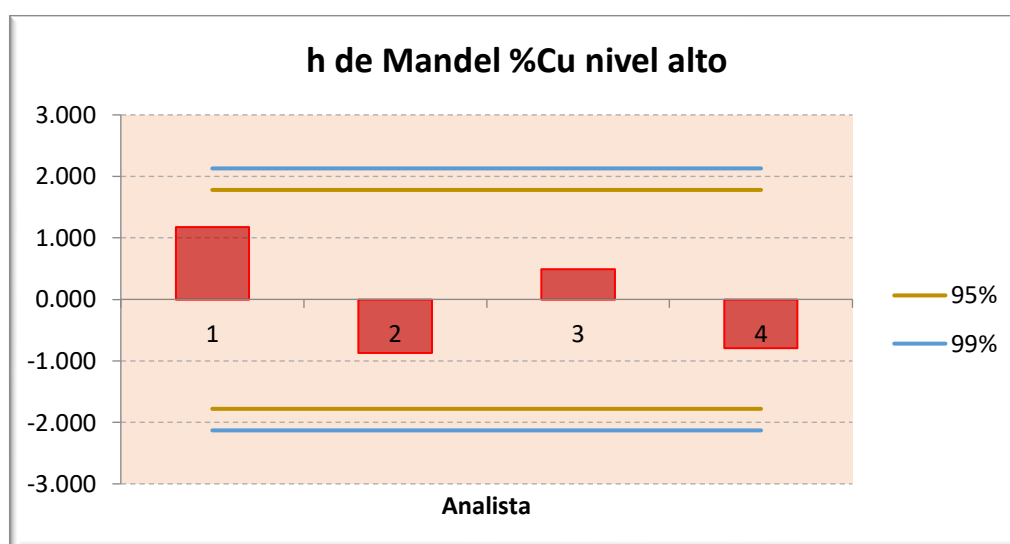


Figura 19.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Cu de nivel alto

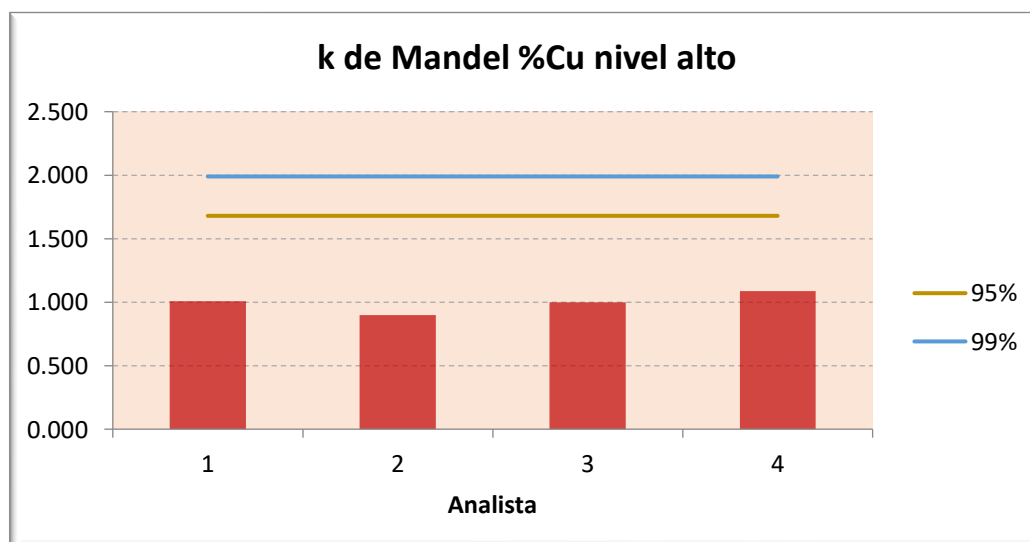


Figura 20.

Gráfica de consistencia de h de Mandel %Mo de nivel alto

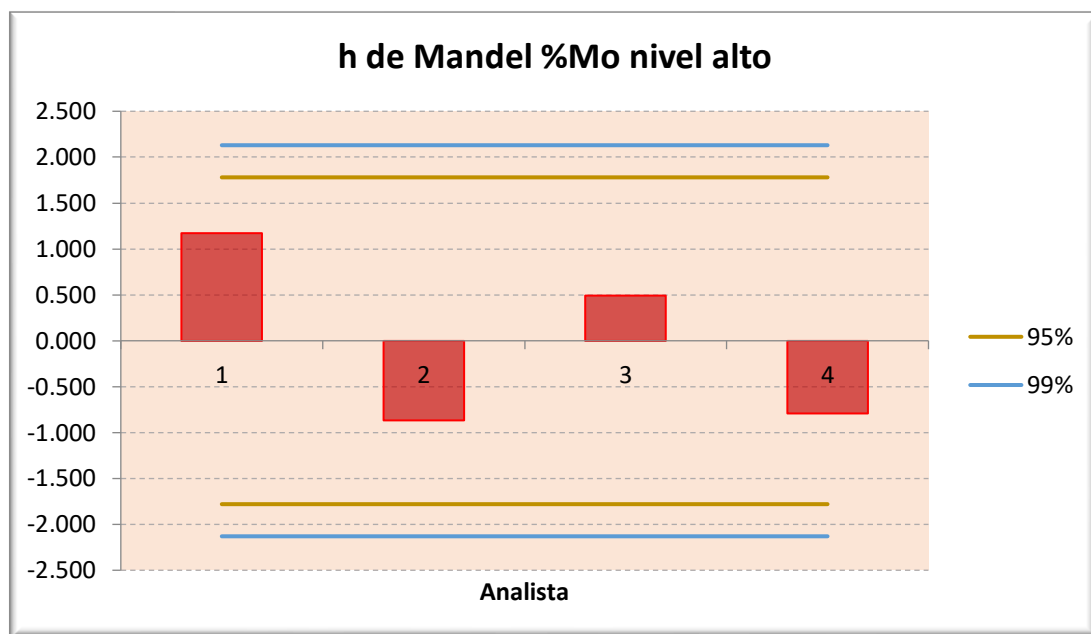
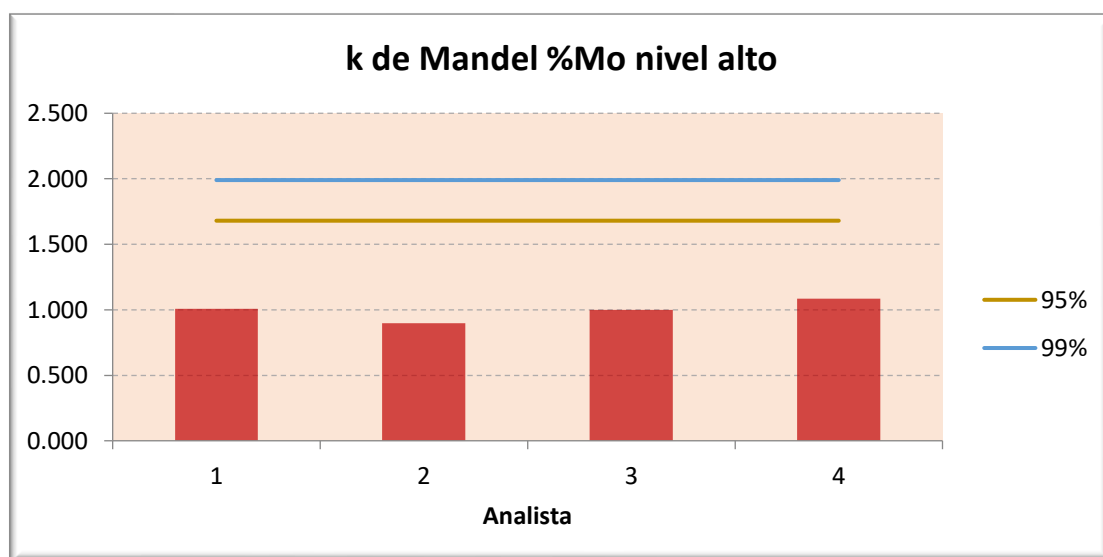


Figura 21.

Gráfica de consistencia de k de Mandel %Mo de nivel alto



Los resultados de las pruebas estadísticas de Mandel para evaluar la consistencia entre analistas en niveles altos de concentración demuestran un comportamiento preciso del método analítico, para el cobre (Cu), con una media global de 1.086 y desviación estándar de 0.0038, los valores h oscilaron entre -1.258 y 0.898, todos significativamente inferiores a los valores críticos de referencia (1.42 al 95% y 1.49 al 99% de confianza). La prueba k mostró resultados entre 0.592 y 1.385, donde el valor máximo representa el 96% del límite crítico superior (1.44), confirmando la homogeneidad en la precisión analítica entre operadores. En el caso del molibdeno (Mo), con una media de 0.0560 y desviación estándar de 0.0004 entre promedios, los valores h variaron entre -1.174 y 0.893, manteniéndose dentro del 85% del valor crítico máximo. Los resultados k se situaron en el rango de 0.895 a 1.061, alcanzando como máximo el 74% del límite establecido, lo que evidencia una excelente concordancia en la precisión.

En el marco de la validación metodológica para la determinación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) mediante espectroscopía de absorción atómica, la evaluación de la precisión entre analistas constituye un aspecto crítico para garantizar la confiabilidad de los resultados. Las pruebas de Cochran, diseñadas específicamente para identificar una variación alta en conjuntos de datos interlaboratorios y la homogeneidad de varianzas, permiten determinar si existen diferencias en la precisión entre operadores. El estadístico C de Cochran, calculado a partir de la razón entre la varianza máxima observada y la suma total de varianzas, se contrasta con los valores críticos tabulados para un nivel de confianza del 95% y 99% (Tabla 28); este análisis no solo valida la consistencia interna del método, sino que también verifica la adecuada estandarización de los protocolos y la competencia técnica de los operadores.

Tabla 28.

Valores críticos de Cochran

Nivel de confianza	COCHRAN
	Valores críticos
99%	0.781
95%	0.684

Los resultados de las pruebas de Cochran realizadas entre analistas en la determinación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en niveles bajos de concentración confirman la precisión del método analítico implementado. Para el caso del cobre, el valor calculado del estadístico C (0.428) se encuentra sustancialmente por debajo de los valores críticos de referencia, lo que permite aceptar la confiabilidad estadística la hipótesis nula de que todos los analistas obtienen resultados precisos. Este resultado se obtuvo considerando una desviación estándar máxima observada de 0.00330 entre los cuatro operadores evaluados, lo que representa una variabilidad baja en el contexto de las concentraciones analizadas. En el caso del molibdeno, los resultados fueron muy concluyentes, con un valor C de 0.465 que representa apenas el 68% del valor crítico al 95% de confianza; la desviación estándar máxima registrada fue de solo 0.00056, demostrando una concordancia en los resultados obtenidos por los diferentes analistas. Estos valores evidencian que las posibles diferencias en precisión entre operadores son mínimas y carecen de significancia estadística.

Tabla 29.

Análisis de Cochran a nivel bajo

OREAS 501-d: MRC de nivel bajo		
	S _{max}	Cochran (C)
Cu	0.00330	0.428
Mo	0.00056	0.465

Los resultados de las pruebas de Cochran en niveles medios de concentración demuestran la consistencia del método analítico para ambos elementos; en el caso del cobre (Cu), el valor calculado del estadístico C (0.334) se sitúa notablemente por debajo de los valores críticos de referencia, representando apenas el 49% del límite crítico al 95% de confianza. Este resultado, obtenido con una desviación estándar máxima de 0.00337 entre los cuatro analistas, permite aceptar la hipótesis nula de precisión consistente entre operadores. Para el molibdeno (Mo), los resultados fueron aún más concluyentes, con un valor C de 0.295 que equivale solo al 43% del valor crítico al 95% de confianza. Esta evidencia estadística, combinada con la baja desviación estándar máxima observada, confirma que las diferencias en precisión entre analistas son insignificantes desde el punto de vista metodológico.

Tabla 30.

Análisis de Cochran a nivel medio

OREAS 503-d: MRC de nivel medio		
	S_{max}	Cochran (C)
Cu	0.00337	0.334
Mo	0.00069	0.295

Los resultados obtenidos en las pruebas de Cochran para evaluar la precisión del método en altas concentraciones de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) demuestran un buen desempeño analítico. Para el caso del Cu, el valor calculado del estadístico C fue de 0.479, significativamente inferior a los valores críticos de referencia (0.684 para un 95% y 0.781 para un 99% de confianza). Este resultado, obtenido con una desviación estándar máxima de 0.00981 entre los cuatro analistas evaluados, permite aceptar la hipótesis nula de que todos los operadores obtienen resultados precisos. En el análisis de Mo, los resultados fueron aún más concluyentes, con un valor C de 0.281 que equivale a solo el 41% del valor crítico al 95% de

confianza; mientras que la desviación estándar máxima registrada fue de apenas 0.00044, demostrando una concordancia en los resultados obtenidos por los diferentes analistas. Estos valores evidencian que las posibles diferencias en precisión entre operadores son insignificantes desde el punto de vista estadístico y metodológico.

Tabla 31.

Análisis de Cochran a nivel alto

OREAS 504-d: MRC de nivel alto		
	S_{max}	Cochran (C)
Cu	0.00981	0.479
Mo	0.00044	0.281

VII. CONCLUSIONES

El presente estudio cumplió satisfactoriamente con el objetivo evaluar y garantizar la validez de los resultados obtenidos mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS) para la determinación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) en el laboratorio químico de la empresa minera. El estudio comprobó satisfactoriamente la veracidad del método AAS mediante el análisis de Materiales de Referencia Certificados (MRC). Los gráficos de control evidenciaron un desempeño óptimo, con todas las mediciones de Cu y Mo dentro de los límites de $\pm 3\sigma$ en los tres niveles de concentración, sin tendencias o valores atípicos. La prueba t-Student confirmó la exactitud del método, con valores calculados (Cu: 1.019 - 1.762; Mo: 0.705 - 1.757) inferiores al crítico ($t = 2.000$), validando una concordancia del 95% con los valores certificados; mientras que los sesgos porcentuales ($<0.1\%$) demostraron variaciones mínimas, reforzando la ausencia de errores sistemáticos. Esta consistencia se atribuye al riguroso protocolo de calibración y control de calidad implementado, cumpliendo con estándares internacionales como ISO 5725.

La evaluación de precisión mediante pruebas de repetibilidad y reproducibilidad demostró la robustez del método AAS. Las RSD se mantuvieron $<2\%$ para Cu y Mo en todos los niveles superando ampliamente los requisitos teóricos. Las pruebas de *Mandel h-k* ($h < 1.5$) y Cochran ($C < 0.7$) validaron la homogeneidad entre analistas y la ausencia de variaciones sistemáticas. Estos resultados confirman que el método genera datos confiables independientemente del operador o condiciones de análisis, cumpliendo con normativas como ISO 17025; es así que la implementación de estos protocolos asegura la trazabilidad y comparabilidad de resultados, fundamentales para la toma de decisiones técnicas en la industria minera. En conclusión, este estudio no solo valida el método AAS para la determinación de Cu

y Mo, sino que también establece un referente para la implementación de protocolos de calidad en laboratorios mineros. Los resultados respaldan la adopción de estas prácticas como parte de un sistema de gestión de calidad integral, asegurando la trazabilidad, confiabilidad y comparabilidad de los datos en el sector, futuras investigaciones podrían ampliar este enfoque a otros elementos de interés minero, consolidando así la excelencia analítica en la industria.

VIII. RECOMENDACIONES

Los excelentes resultados obtenidos tanto en la evaluación de veracidad como de precisión del método de espectroscopia de absorción atómica para Cu y Mo, que cumplen con los más altos estándares de exactitud y reproducibilidad en los tres niveles de concentración analizados, fundamentan las siguientes recomendaciones integradas para garantizar la sostenibilidad y optimización del desempeño analítico.

Se recomienda establecer un programa de monitoreo continuo que combine análisis periódicos de Materiales de Referencia Certificados (MRC) con evaluaciones estadísticas trimestrales. Este programa debería incluir la generación automática de gráficos de control con umbrales de alerta predefinidos (sesgo $>0.5\%$, RSD $>1.6\%$), utilizando software especializado para garantizar una detección temprana de posibles desviaciones. Los MRC deben seleccionarse en tres niveles de concentración y matrices similares a las muestras rutinarias del laboratorio.

Es fundamental optimizar los protocolos analíticos, implementando un procedimiento estandarizado de calibración que incluya verificaciones diarias con estándares primarios y curvas de calibración con al menos tres puntos de estándares primarios. Se deben desarrollar guías operativas detalladas para la preparación de muestras, especificando parámetros críticos como tiempos de ataque químico (110 ± 5 minutos a 120°C) y volúmenes exactos de reactivos (HCl y HNO_3 : 10.0 ± 0.1 ml). Estas medidas ayudarán a minimizar variaciones interanalista.

Complementariamente, se propone un plan de capacitación continua para los analistas enfocado en los puntos críticos identificados como el manejo de concentraciones y preparación de muestras complejas, junto con estudios específicos para validar el desempeño del método ante matrices reales con potenciales interferentes como los altos contenidos de hierro o sulfuros no evaluados en los MRC analizados.

Finalmente, estos hallazgos deben integrarse formalmente al sistema de gestión de calidad mediante la documentación completa de los parámetros de validación obtenidos, acompañada de auditorías internas periódicas que verifiquen el cumplimiento de los protocolos y actualicen los procedimientos según las mejores prácticas internacionales, asegurando así la mejora continua y manteniendo el excelente nivel de calidad analítica demostrado en todas las condiciones de operación.

IX. LITERATURA CITADA

- Almanza, W. (2023). *Propuesta de Mejora para la gestión de la información del Laboratorio Químico del Proyecto Minero Anama de la empresa Anabi Sac*. [Tesis de maestría, Escuela de Posgrado Newman]. <https://repositorio.epnewman.edu.pe/handle/20.500.12892/722>
- Apaza, R., Mendoza, E., & Ancca, S. (2022). Physical and Chemical Study of Water from the Underground of Ichuña, Moquegua, Peru. *American Journal of Environmental Science and Engineering 2022, Volume 6, Page 44, 6(1)*, 44–50. <https://doi.org/10.11648/J.AJESE.20220601.16>
- Aykroyd, R., Leiva, V., & Ruggeri, F. (2019). Recent developments of control charts, identification of big data sources and future trends of current research. *Technological Forecasting and Social Change, 144*, 221–232. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2019.01.005>
- Bacon, J., Butler, O., Cairns, W., Cavoura, O., Cook, J., Davidson, C., & Mertz-Kraus, R. (2021). Atomic spectrometry update – a review of advances in environmental analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 36(1)*, 10–55. <https://doi.org/10.1039/D0JA90074E>
- Balaram, V., & Satyanarayanan, M. (2022). Data Quality in Geochemical Elemental and Isotopic Analysis. *Minerals 2022, Vol. 12, Page 999, 12(8)*, 999. <https://doi.org/10.3390/MIN12080999>
- Balaram, V., & Subramanyam, K. (2022). Sample preparation for geochemical analysis: Strategies and significance. *Advances in Sample Preparation, 1*, 100010. <https://doi.org/10.1016/J.SAMPRE.2022.100010>

- Bazan, W. (2020). *La gestión estratégica de costos y su influencia en los costos de operación de la Compañía Minera Atacocha S.A.A. – 2016* [Tesis de título, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1990>
- Beauchamp, C., Camara, J., Carney, J., Choquette, S., Cole, K., DeRose, P., Duewer, D., Epstein, M., Kline, M., Lippa, K., Lucon, E., Phinney, K., Polakoski, M., Possolo, A., Sharpless, K., Sieber, J. R., Toman, B., Winchester, M., & Windover, D. (2020). *Metrological Tools for the Reference Materials and Reference Instruments of the NIST Material Measurement Laboratory*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.260-136-2020>
- Breja, S. (2022). Role of Certified Reference Materials (CRMs) in Standardization, Quality Control, and Quality Assurance. *Handbook of Metrology and Applications*, 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1550-5_29-1
- Broadhurst, D., Goodacre, R., Reinke, S., Kuligowski, J., Wilson, I., Lewis, M., & Dunn, W. (2018). Guidelines and considerations for the use of system suitability and quality control samples in mass spectrometry assays applied in untargeted clinical metabolomic studies. *Metabolomics*, 14(6), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S11306-018-1367-3/FIGURES/6>
- Brooks, A., Koch, M., Wathen, A., & Valley, T. (2015). Good Laboratory Practices (GLPs). *Research Regulatory Compliance*, 277–295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420058-6.00011-3>
- Campos, H., Sande-Cladera, C., & Díaz, L. (2018). *Evaluación de las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad en la producción de discos de antibióticos*

- elaborados por los laboratorios EMES C.A. y MLAB C.A.* [Tesis de título, Universidad Central de Venezuela]. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/19462>
- Carhuaz, R. (2024). *Aseguramiento y control de calidad en laboratorio químico de la empresa Ecoservicios e Ingeniería Limpia S.A.C.* [Tesis de título, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7197>
- Carlos, L., Fatima, M., Habibie, M., Kresiani, R., Riset S., P., Standardisasi, B., Puspitpek, K., & Selatan, T. (2019). Implementation of PDCA Cycle in Calibration and Testing Laboratory Based on ISO/IEC 17025:2017. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 598(1), 012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012108>
- Carrion, L. (2023). *Plan de negocio de un laboratorio químico acreditado en mina* [Tesis de título, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/668889>
- Carter, S., Clough, R., Fisher, A., Gibson, B., Russell, B., & Waack, J. (2020). Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(11), 2410–2474. <https://doi.org/10.1039/D0JA90067B>
- Carter, S., Fisher, A., Gibson, B., Marshall, J., Russell, B., & Whiteside, I. (2017). Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(11), 2068–2117. <https://doi.org/10.1039/C7JA90046E>
- Castellanos, I., Velandia, J., González, M., Varela, D., & Ramirez, E. (2018). Aplicaciones y generalidades de un espectrofotómetro de absorción atómica

- AA-700 de Shimadzu. *Universidad EAN, I*(Biblioteca Universidad EAN), 73.
<https://doi.org/10.57793/9789587565959>
- Ceko, E. (2023). On the Relationship Between ISO Standards and Sustainable Development. *Problemy Ekorozwoju*, 18(2), 148–158.
<https://doi.org/10.35784/PREKO.3953>
- Céspedes, M., Gondres, K., Cuadra, Y., & Mora, C. (2022). Guía práctica para el perfeccionamiento del control interno de calidad en el laboratorio clínico. *MEDISAN*, 26(2), 455–474.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192022000200455&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Chandra, S., & Naiker, M. (2022). Applications of infrared spectroscopy in environmental contamination. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 98, 77–90.
<https://doi.org/10.1016/bs.coac.2020.08.003>
- Ćidić, E. (2024). *Process capability and control charts analysis for process improvement* [Lahti University of Technology LUT].
<https://lutpub.lut.fi/handle/10024/168286>
- Condori, W. (2016). *Validación de un método para la determinación de cobre, cromo, manganeso y níquel en suelo por absorción atómica de flama* [Tesis de título, Universidad Nacional Federico Villarreal].
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/1486>
- De La O Franco, L. (2025). *La búsqueda de la mejora continua a través del control estadístico de procesos en el departamento de calidad* [Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México].
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/8992>

- Delgado, G., & Salazar-Casco, J. (2023). Implementación De La Calidad En Los Laboratorios De Ensayos (ISO/IEC 17025:2017). *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 9(17), 2029–2047. <https://doi.org/10.5377/RIBCC.V9I17.15150>
- Demattê, J., Dotto, A., Bedin, L., Sayão, V., & Souza, A. (2019). Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma*, 337, 111–121. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.09.010>
- Duarte, M. (2018). *Desarrollar una Metodología de Implementación de la Norma NTP-ISO/IEC 17025:2017 para la Acreditación de Laboratorios de Ensayo de Suelos, Concretos y Pavimentos en Universidades Privadas del Perú - 2018* [Tesis de maestría, Universidad Privada de Tacna]. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/643>
- Dwivedi, A. (2025). Laboratory Accreditation: Evolution and Development. *Handbook of Quality System, Accreditation and Conformity Assessment*, 1–18. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4637-2_26-1
- Evans, E., Pisonero, J., Smith, C., & Taylor, R. (2021). Atomic spectrometry update: review of advances in atomic spectrometry and related techniques. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(5), 868–891. <https://doi.org/10.1039/D1JA90016A>
- Farfan, A. (2024). *Análisis químico de muestras geoquímicas por absorción atómica en el laboratorio ALS Perú S.A. Cotabambas – Apurímac* [Tesis de título, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8799>

- Ghorbani, Y., & Nwaila, G. (2022). Systematic Framework toward a Highly Reliable Approach in Metal Accounting. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1784164>
- Hernández, C. (2018). *Aplicaciones de las técnicas de espectrometría de masas al estudio elemental e isotópico de lantánidos como trazadores naturales de procesos contaminantes* [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/16166>
- Hernández, J. (2024). *Propuesta de implementación de los requisitos contenidos en la norma NTC ISO/IEC 17025:2017 como herramienta para la acreditación de los ensayos realizados en el laboratorio de química inorgánica de la Universidad de América* [Tesis de maestría, Universidad de América]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9500>
- Hilario, D., Mariluz, C., Camborda, G., & Cárdenas, D. (2024). Gestión empresarial y competitividad de empresas de supervisión y análisis químico al sector minero del Perú, año 2022. *Industrial Data*, 27(1), 137–156. <https://doi.org/10.15381/IDATA.V27I1.25801>
- Ikram, M., Sroufe, R., Rehman, E., Shah, S., & Mahmoudi, A. (2020). Do Quality, Environmental, and Social (QES) Certifications Improve International Trade? A Comparative Grey Relation Analysis of Developing vs. Developed Countries. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 545, 123486. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2019.123486>
- INACAL. (2018). *Norma Técnica Peruana NTP-ISO/IEC 17025 - 2017*. <https://transparencia.produce.gob.pe/images/stories/Repositorio/transparencia/>

proyectos-de-inversion/niveles-de-
servicio/2021/ITP/NC/NTP_ISO_IEC_17025_2017.pdf

ISO. (2023). *ISO 5725-1:2023 - Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions*.
<https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/94/69418.html?browse=tc>

Joachim, P. (2025). Monitoring of Analytical Performance. *Method Validation in Pharmaceutical Analysis: A Guide to Best Practice: Third Edition*, 487–509.
<https://doi.org/10.1002/9783527831708.CH21>

Kestens, V., & Koeber, R. (2022). Production, role and use of reference materials for nanoparticle characterization. *Particle Separation Techniques: Fundamentals, Instrumentation, and Selected Applications*, 377–408.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85486-3.00004-4>

Koepke, A., Lafarge, T., Possolo, A., & Toman, B. (2017). Consensus building for interlaboratory studies, key comparisons, and meta-analysis. *Metrologia*, 54(3), S34. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/AA6C0E>

Manobanda, P., Parada, M., & Guadalupe, M. (2025). *ISO/IEC 17025: Fundamentos y prácticas en laboratorios de ensayos y calibración*.
<https://doi.org/10.33996/CIDE.ECUADOR.IS2679345>

Marsden, A., & Shahtout, A. (2024). International Organization for Standardization. *Clinical Laboratory Management: Third Edition*, 271–277.
<https://doi.org/10.1002/9781683673941.CH19>

- Ménard, D., & Trant, J. (2019). A review and critique of academic lab safety research. *Nature Chemistry* 2019 12:1, 12(1), 17–25. <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0375-x>
- Ministerio de Economía (2018). *Guía de validación de métodos analíticos*.
- Mitra, A. (2016). Fundamentals of Quality Control and Improvement Printed in the United States of America. *John Wiley & Sons*.
<https://search.worldcat.org/title/1018121937>
- Moreno, B. (2018). *Gestión de calidad y verificación de métodos analíticos en un laboratorio de investigación bajo normativa de Buenas Prácticas de Laboratorio*. <https://dehesa.unex.es:8443/handle/10662/8280>
- Muñoz, M. (2022). *Análisis del coste de ciclo de vida de equipos móviles de apoyo a producción minera* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Salta].
<https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Onifade, M., Adebisi, J., Shivute, A., & Genc, B. (2023). Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. *Resources Policy*, 85, 103978. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.103978>
- Panagiotidou, E., Chountalas, P., Magoutas, A., & Kitsios, F. (2024). The multifaceted impact of ISO/IEC 17025 accreditation: a sector-specific analysis in civil engineering testing and calibration laboratories. *TQM Journal*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2023-0347/FULL/XML>
- Peris-Vicente, J., Esteve-Romero, J., & Carda-Broch, S. (2015). Validation of Analytical Methods Based on Chromatographic Techniques: An Overview.

Analytical Separation Science, 1757–1808.

<https://doi.org/10.1002/9783527678129.ASSEP064>

Perugachi, C., & Albán, M. (2015). *Reimplementación de los requisitos técnicos y del sistema de aseguramiento de la calidad de resultados correspondiente al parámetro acreditado calibración de un instrumento de pesar no automático según la norma NTE-INEN-ISO/IEC 17025:2006*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/29912>

Raposo, F., & Ibelli-Bianco, C. (2020). Performance parameters for analytical method validation: Controversies and discrepancies among numerous guidelines. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 129, 115913.
<https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2020.115913>

Sałaciński, T., Chrzanowski, J., & Chmielewski, T. (2023). Statistical Process Control Using Control Charts with Variable Parameters. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 2744, 11(9), 2744. <https://doi.org/10.3390/PR11092744>

Sanmiguel, J., & Guerrero, S. (2017). *Validación del método para determinar Pb, Cd, Ni por espectrometría de absorción atómica de llama en agua y suelo*. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7019>

Schonrock, F. (2023). The Role of International, Regional, and National Organizations in the Development of Standards. *Food Safety Management: A Practical Guide for the Food Industry, Second Edition*, 1005–1017.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820013-1.00050-4>

- Sieber, J. R. (2020). How to use and how not to use certified reference materials in industrial chemical metrology laboratories. *Powder Diffraction*, 35(2), 104–111. <https://doi.org/10.1017/S0885715620000202>
- Sishi, M., & Telukdarie, A. (2020). Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry - a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.105852>
- Skoog, D., Holler, J., & Stanley, R. (2008). Principios de análisis instrumental. *Principios de Análisis Instrumental; Skoog Douglas A, Holler F. James, Crouch Stanley R; Sexta Edición; 2008.* https://www.academia.edu/43268766/Principios_de_an%C3%A1lisis_instrumental_Skoog_Douglas_A_Holler_F_James_Crouch_St Stanley_R_Sexta_Edici%C3%B3n_Cengage_Learning_Editores_2008_M%C3%A9xico
- Smee, B., Bloom, L., Arne, D., & Heberlein, D. (2024). Practical applications of quality assurance and quality control in mineral exploration, resource estimation and mining programmes: a review of recommended international practices. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 24(2). <https://doi.org/10.1144/GEOCHEM2023-046/ASSET/FC7C122E-C025-469D-9D88-DC3A045BF02E/ASSETS/IMAGES/LARGE/GEOCHEM2023-046.13.JPG>
- Tayo, C., Yuriev, A., & Boiral, O. (2018). *Adopting ISO Management Standards in Africa: Barriers and Cultural Challenges*. 59–82. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65675-5_4

- Thabit, A. (2024). *Enhancing Laboratory Safety Culture: Data-Driven Risk Management in Metal Powder Laboratories*.
<https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/18358>
- Tsachouridis, A. (2017). *Statistical Quality Assurance and Control to Evaluate Analytical Measurement System Performance*. Technical University of Crete.
- Valladares, L., Vargas-Luque, A., Borja-Castro, L., Valencia-Bedregal, R., Velazquez-Garcia, J., Barnes, E., Dominguez, A., Byrne, P., Kollu, P., Rodriguez, M., Coaquira, J., & Barnes, C. (2024). Physical and chemical techniques for a comprehensive characterization of river sediment: A case of study, the Moquegua River, Peru. *International Journal of Sediment Research*, 39(3), 478–494. <https://doi.org/10.1016/J.IJSRC.2024.03.003>
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenieros y ciencias* (9th ed.). Pearson.
<https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/73845>
- Wessels, J. (2024). *Evaluating the contribution of ISO 14001:2015 towards enhancement of environmental performance: A mining case study* [North-West University]. <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/42533>
- Westgard, J., & Westgard, S. (2016). Quality control review: implementing a scientifically based quality control system. *Annals of Clinical Biochemistry*, 53(1), 32–50.
https://doi.org/10.1177/0004563215597248/SUPPL_FILE/SUPPL-GLOSSARY.PDF
- Wieczorek, M., Rengevicova, S., Świt, P., Woźniakiewicz, A., Kozak, J., & Kościelniak, P. (2017). New approach to H-point standard addition method for

detection and elimination of unspecific interferences in samples with unknown matrix. *Talanta*, 170, 165–172.
<https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2017.03.101>

Yalico, J. (2024). *Evaluación del sistema de control de calidad (QA/QC) del muestreo de mineral y análisis del laboratorio mina en la Unidad Minera Corihuarmi, Yauyos Lima - 2019* [Tesis de título, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4321>

Zhao, X., Castka, P., & Searcy, C. (2020). ISO Standards: A Platform for Achieving Sustainable Development Goal 2. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 9332, 12(22)*, 9332. <https://doi.org/10.3390/SU12229332>

X. ANEXOS

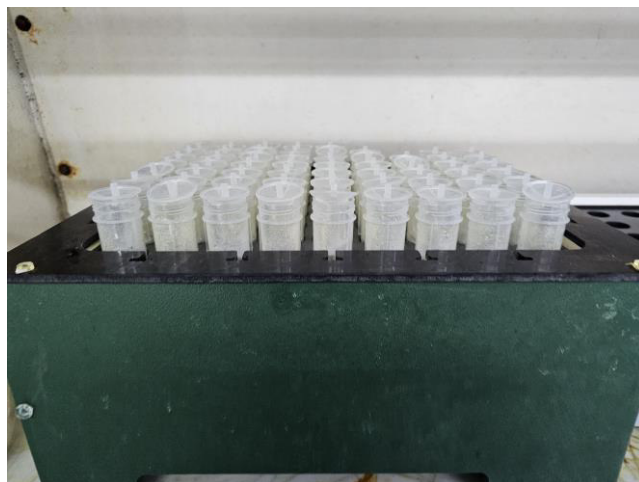
Anexo 1. Muestras de geología



Anexo 2. Balanza analítica Mettler Toledo XSR204 para pesado de muestras



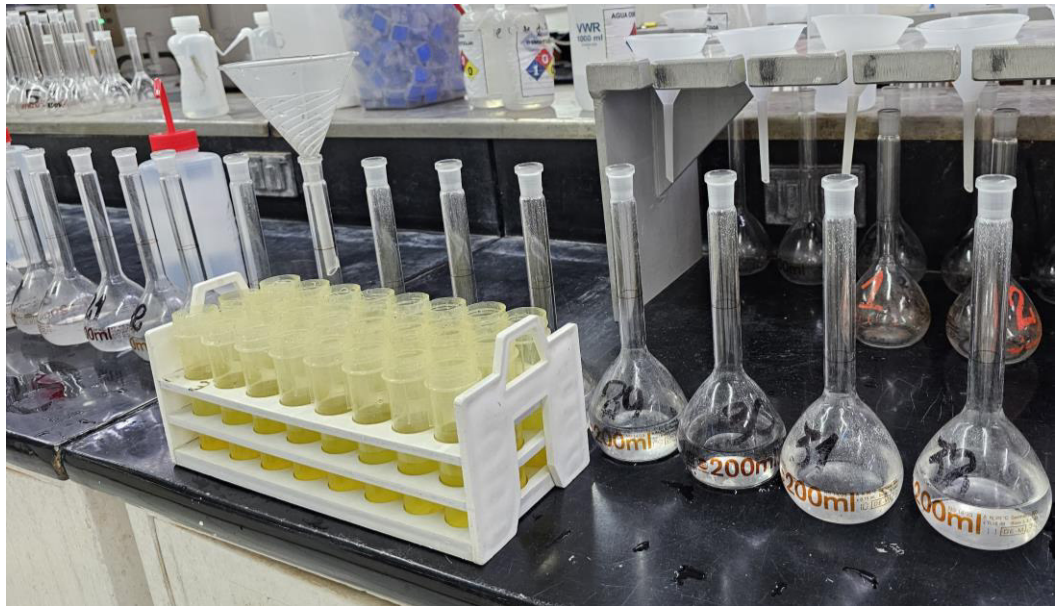
Anexo 3. QBlock Heating block



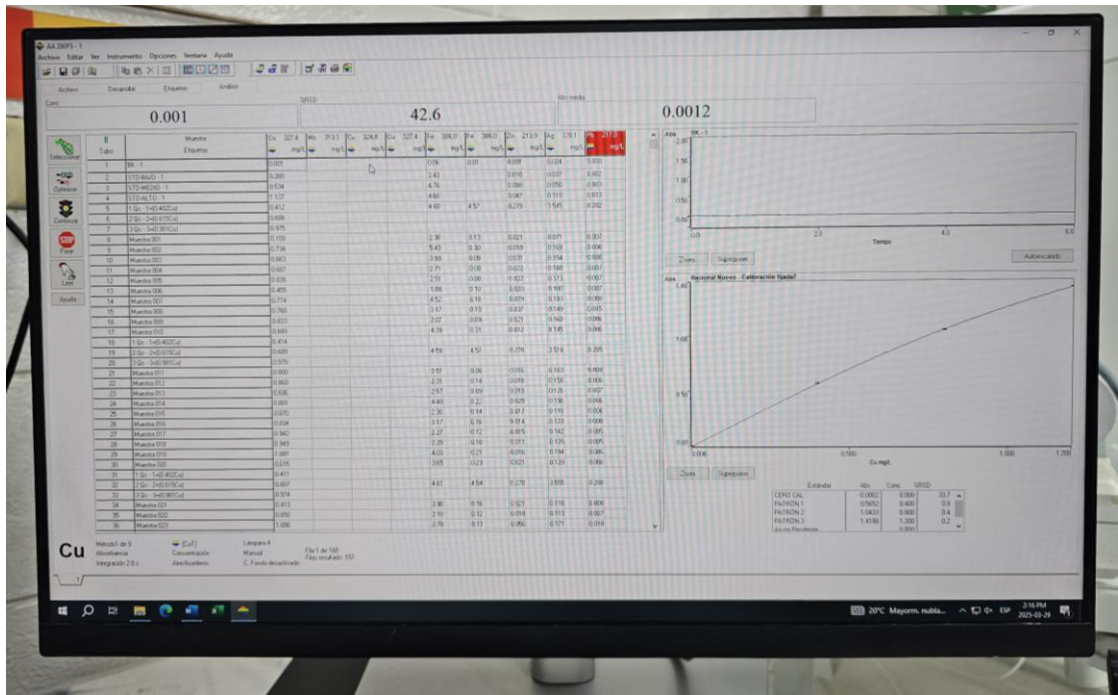
Anexo 4. Disgregación y ataque de muestras



Anexo 5. Trasvase de muestras de geología



Anexo 6. Lectura en Absorción atómica



Anexo 7. Espectrofotómetro de Absorción Atómica Agilent 200 Series AA

