

Proceso innovador para mejorar el monitoreo de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del sector minero utilizando técnicas de Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP)

Impact of ballast water on the health of workers of maritime transport vessels that sail in Peruvian waters

Oswaldo Gonzales¹, Carlos Cabrera Carranza², Vidal Aramburú³

Recibido: 11/03/2021 - Aprobado: 15/02/2022 – Publicado: 30/06/2022

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA) que permita mejorar la evaluación de los datos de monitoreo y ayudar a tomar medidas para reducir los efectos de la contaminación ambiental originada por la actividad minera. El método de investigación fue analítico, deductivo, e hipotético, con un tipo de investigación aplicada, un diseño experimental, nivel descriptivo–interpretativo y enfoque mixto (cuali–cuantitativo). Los resultados confirman que la implementación de técnicas de CEC/CEP dentro de los EIA permite identificar los correctivos necesarios, optimizar la toma de decisiones y realizar los ajustes operacionales requeridos dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA). Se propone una metodología esquematizada en diagrama de flujo para el monitoreo y control de componentes y elementos contaminantes de suelos y aguas, que consta de siete (7) etapas, con el fin de mejorar la evaluación de los EIA. Por consiguiente, se demuestra que: *La implementación del de técnicas de CEC/CEP en los EIA permite mejorar el análisis de los datos de monitoreo, la evaluación de los impactos y reducir los efectos de la contaminación ambiental originada por la actividad minera.*

Palabras claves: control estadístico de la calidad; estudio de impacto ambiental.

ABSTRACT

The general objective of this work was to propose an innovative process for the use of statistical quality control (SQC/SQP) in environmental impact assessments (EIAs) that allows improving the evaluation of monitoring data and helping to take measures to reduce the effects of environmental pollution caused by mining activity. The research method was analytical, deductive, and hypothetical, with a type of applied research, an experimental design, a descriptive–interpretive level, and a mixed approach (quali–quantitative). The results confirm that the implementation of SQC/SQP techniques within the EIAs allows identifying the necessary corrective measures, optimizing decision-making, and making the required operational adjustments within the Environmental Management System (EMS). A methodology outlined in a flow diagram is proposed for the monitoring and control of components and polluting elements of soils and water, which consists of seven (7) stages, to improve the evaluation of the EIAs. Consequently, it is shown that: *The implementation of the SQC/SQP techniques in the EIAs allows to improve the analysis of the monitoring data, the evaluation of the impacts and reduce the effects of the environmental contamination caused by the mining activity.*

Keywords: statistical quality control; environmental impact assessment.

1 Profesor Asociado Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Lima, Perú.

E-mail: ogonzalesr@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7088-5877>

2 Profesor principal. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Departamento de Ingeniería Geográfica. Lima, Perú.

E-mail: ccabrera@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5821-5886>

3 Profesor principal. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Lima, Perú.

E-mail: varamburur@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>

I. INTRODUCCIÓN

Toda actividad que desarrolla el ser humano produce impactos en el ambiente, más aun una actividad como la explotación minera, debido a que crea alteraciones en el medio natural de diversa magnitud, desde las más imperceptibles hasta las que representan impactos graves sobre el medio en que se desarrollan. Las empresas operadoras y las contratistas mineras deben cumplir con una serie de requisitos legales y técnicos para poder desarrollar los recursos mineros, entre los cuales, se encuentran los estudios de impacto ambiental (EIA), conocidos también como instrumentos de gestión ambiental (IGA). Adicionalmente, los organismos gubernamentales reguladores, como el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Ministerio del Ambiente (MINAM) requieren del uso de instrumentos eficientes para evaluar los informes y datos de estos EIA o IGA, resultando de estas revisiones que los mismos sean aprobados (absueltos) y reprobados (devueltos o sometidos a correcciones).

El propósito de la aplicación de las técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA es brindar de técnicas eficientes que permitan evaluar si un proceso de medición (como los análisis de contenido de metales pesados) está realizándose de manera correcta, o si los resultados de estos procesos de medición están produciendo resultados veraces o erróneos, fuera de los límites de control que han sido científicamente determinados. Adicionalmente, las herramientas de CEC/CEP pueden ayudar a identificar cuáles son las posibles causas-raíz que están llevando a obtener esos resultados erróneos. En la actualidad, existe una legislación estricta sobre los impactos que puede producir la minería, esta legislación incluye regulaciones sobre descargas de líquidos, emisiones de polvo, ruido, restauración de paisajes, etc., que son difícil de cumplimiento debido al alto costo económico. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la actividad minera no solo produce un impacto ambiental. También tiene un impacto socioeconómico, que debe considerarse desde dos ángulos. El primero se relaciona con la medida en que la minería es un factor de desarrollo para las regiones donde se establece esta industria, y el segundo, tiene que ver con los efectos que la minería tiene en el medio ambiente, que pueden ser positivos en algunos casos y, en otros, negativos. Como resultado de EIA deficientes se han tenido los siguientes resultados: numerosas plantas mineras tienen problemas de vertidos de líquidos residuales, emitiendo aguas ácidas, otras no previeron dentro de sus instrumentos ambientales la existencia de sedimentos altamente permeables, fracturas y/o fallas geológicas existentes debajo de los depósitos de relaves, por lo cual los diseños de construcción no consideraron dichos factores.

Tomando como base la descripción de la problemática anteriormente descrita, se ha decidido desarrollar la presente investigación, con el objetivo de proponer un proceso innovador donde se apliquen las herramientas de CEC/CEP en los EIA, que permita mejorar la evaluación de los datos de monitoreo y ayudar a tomar medidas para reducir los efectos de la contaminación ambiental originada por la actividad minera.

II. MÉTODOS

El método de investigación aplicado fue analítico, deductivo, e hipotético, con un tipo de investigación aplicada, un diseño experimental, nivel descriptivo–interpretativo y enfoque mixto (cuali–cuantitativo), según Hernández et al. (2014).

Luego de la identificación del problema: ocurrencia de EIA deficientes dentro de algunos proyectos mineros, la definición del objetivo principal: proponer un proceso innovador donde se apliquen las herramientas de CEC/CEP en los EIA, se siguieron las etapas de trabajo expuestas en la Figura 1, con el objeto de cumplir con el objetivo propuesto dentro de esta investigación y solventar la problemática existente.

III. RESULTADOS

Un procedimiento de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un flujograma de trabajo que se diseña dentro de un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) o Sistema de Gestión Ambiental (SGA) para efectuar el monitoreo y control de calidad de sus procesos y productos. El procedimiento que se propone en esta investigación para el monitoreo y control de componentes y elementos contaminantes de suelos y agua (minerales pesados y otras sustancias químicas como el mercurio y el cianuro) y mejorar la evaluación de los EIA consta de siete (7) pasos, 1) Muestreo, 2) Ejecución de los Protocolos de Preparación de las Muestras, 3) Ejecución de los Protocolos de Análisis de las Muestras, 4) Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP) sobre los Resultados de los Análisis de las Muestras, 5) Certificación y Oficialización de los Resultados, 6) Incorporación de los Resultados a los Sistemas de Información y 7) Toma de Decisiones y Ajustes en el Sistema de Gestión Ambiental (SGA), los cuales se describen continuación.

3.1 Paso I: Muestreo

Dentro de la industria minera, cuando se efectúa control de calidad de las concentraciones minerales de componentes mayoritarios o de menas como oro (Au), cobre (Cu), plata (Ag), entre otros, se pueden analizar muestras provenientes

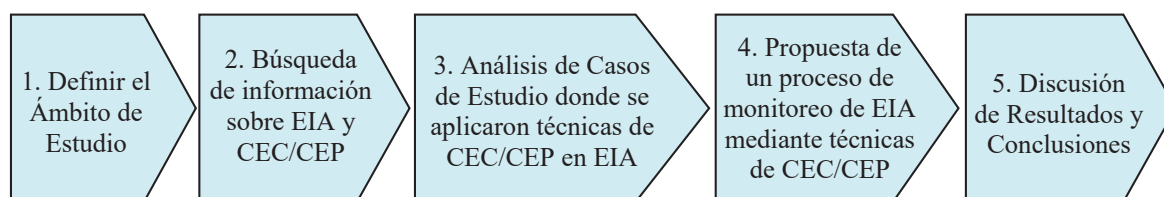


Figura 1. Etapas de Trabajo

de exploración (prospección geológica-geoquímica), de procesos de beneficio de minerales (alimentación y descarga a molinos, celdas de flotación y colas), de productos finales (concentrados). Para el caso de control de calidad de componentes contaminantes como minerales pesados y otras sustancias químicas como el cianuro, las muestras de sedimentos pueden provenir de lotes de suelos o relaves (lixiviados), mientras que las muestras de agua pueden provenir de pozos, ríos, lagos y lagunas. Para que las herramientas de CEC/CEP se puedan aplicar de manera eficaz es fundamental que el muestreo sea representativo de las variables y/o procesos que se desean estudiar. Para implementar un control de calidad en el muestreo, se deben incluir 3 tipos de muestras (SINIA. Sistema Nacional de Información Ambiental, 2016):

- a. **Muestras de material de campo a analizar:** en este nuestro caso, pueden ser muestras de sedimentos provenientes de lotes de suelo y relaves, o muestras de agua de pozos, ríos y cuerpos de agua.
- b. **Duplicados de campo:** es decir, muestras de campo totalmente iguales, que sirven para la respectiva evaluación de los análisis, estableciéndose su precisión, los cuales depende no sólo de la exactitud del método analítico, sino de la homogeneidad de las muestras.
- c. **Blancos de control:** que corresponde a materiales de características, propiedades físicas y composición química conocidas, que proporcionan resultados predecibles, y que sirven para monitorear la exactitud analítica (calibración) con que se realizan los ensayos o análisis. En nuestro caso, los blancos de las muestras de sedimentos corresponden a arena silícea de grano fino, mientras que los blancos de las muestras de agua corresponden a agua destilada.

3.2 Paso II: Ejecución de los protocolos de preparación de las muestras

El paso siguiente es la preparación de las muestras para que estén aptas para ser sometidas a los análisis. La preparación de las muestras depende del estado físico de las mismas y el método analítico que se va a aplicar. Las muestras en estado sólido (sedimentos de lotes de suelo y relaves) requieren una preparación diferente a las muestras en estado líquido (agua).

3.2.1 Protocolo general de preparación de muestras en estado sólido

Las muestras de rocas o suelos, seleccionadas para estudios geoquímicos, deben ser sometidas a un tratamiento mecánico, el cual consiste en varias etapas en la que se utilizan herramientas manuales o automáticas. En los estudios geoquímicos que involucren rocas, sedimentos y suelos, para la preparación de las muestras es importante la aplicación de procedimientos correctos que garanticen una muestra homogénea y representativa, con una mínima posibilidad de contaminación. Antes de comenzar con la preparación de las muestras, se recomienda hacer limpieza general del sitio donde va a ser tratada la muestra (Andara et al., 2011). El protocolo general es el siguiente:

- a. **Secado:** Las muestras en estado sólido a las cuales se les va a aplicar cualquier método analítico (XRD, XRF, AAS, ICP-MS, etc.), excepto para los análisis TCLP, deben ser en primer lugar secadas (calentadas a 105°C) en una estufa por 24 horas para eliminar la humedad, luego pulverizadas y homogeneizadas.
- b. **Fragmentación y Trituración:** Cuando la muestra de roca se presenta en fragmentos mayores de 5 cm, estos deben ser fragmentados a tamaños menores a 5 cm antes de su introducción en los alimentadores de la trituradora (generalmente de mandíbula o los molinos de barras). La fragmentación previa se puede realizar utilizando martillos pesados o maquinaria (fragmentadoras). Luego se introduce la muestra en la trituradora. El tipo de trituración depende de los objetivos de la investigación geoquímica. En el procedimiento estándar, la distancia de separación entre las mandíbulas de la trituradora se cierra a 0,5 cm para obtener fragmentos menores a ese diámetro, que permitan su posterior introducción en el pulverizador o molino. Al salir de la trituradora, la muestra debe tamizarse y mezclarse homogéneamente.
- c. **Pulverización o Molienda:** Para obtener resultados analíticos correctos y reproducibles, las muestras (rocas trituradas y/o sedimentos) deben ser pulverizadas hasta una finura (tamaño de partículas) menor a los 100 μm o 75 μ (malla 200). La pulverización puede hacer de manera manual (con mortero) o de manera automatizada (con pulverizadores o molinos vibradores mecánicos). Existen diferentes tipos de molinos pulverizadores y de diferentes materiales. Los molinos pueden ser de anillos en carburo de tungsteno, acero endurecido, cerámica, ágata, entre otros. Estos morteros pulverizan las muestras en pocos minutos (Resch, 2013).
- d. **Cuarateado y Homogeneización:** El cuarteado y homogeneización permite obtener micro-muestras o alícuotas representativas de la muestra original. Este procedimiento se debe realizar de manera rápida y con la mínima exposición al ambiente. Para tal fin, mezcle la muestra hasta que esté lo más homogénea posible y divídala en dos partes iguales. Almacene una de las partes en un frasco hermético, limpio y seco o bolsa plástica debidamente rotulado especificando que es la muestra testigo; la otra parte será utilizada en los análisis, y el tamaño de esta debe ser adecuado para la totalidad de las pruebas requeridas. Lo recomendable es dividir la muestra en diferentes bolsas según el ensayo a realizar, cuidando siempre la rotulación (identificación). Luego se mezcla el material y se apila en forma de cono. Este se aplasta con una pala o espátula, luego se corta o separa en forma de cruz. Se retiran los dos (2) cuartos opuestos y se dejan los otros 2 restantes, que forman la nueva muestra.

e. Verificación de Propiedades: Luego, las muestras son llevadas al área de balanzas, en donde es tomada una fracción de esta para efectuarse una verificación de sus propiedades, ya que si la muestra no cumple con los requerimientos exigidos (color homogéneo, humedad mínima y tamaño de partícula menor a los 100 μm), son reelaboradas en el área de preparación. Por lo tanto, un incumplimiento en sus características implicaría prácticamente hacer un nuevo muestreo (pérdida de tiempo). Esta verificación de propiedades es necesaria para tener garantía de obtener resultados confiables en cualquiera de los métodos analíticos (Resch, 2013). El método gravimétrico se efectúa con la finalidad de establecer la humedad de una muestra; es decir, que la determinación de la masa del agua se efectúa por la diferencia entre la masa de la muestra sólida húmeda y la masa de la muestra sólida seca, y es el único método directo de medición de la humedad de muestras de rocas o suelos.

3.2.1.1 Preparación adicional de las muestras para análisis XRD y XRF

Si se van a efectuar análisis de difracción de rayos X (XRD) para la detección de compuestos minerales, o de espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF) para la detección de elementos, el siguiente paso a la verificación fisicoquímica, es colocar y compactar las muestras dentro del porta-muestras del equipo que se va a utilizar. El porta-muestras para el difractómetro de polvos es un disco de aluminio o cuarzo con una depresión circular en el centro, con un diámetro interno entre 20 y 25 mm. El total de muestra que se utiliza generalmente no sobrepasa los 2 gramos. La muestra debe comprimirse hasta quedar en una especie de pastilla prensada. Esto puede realizarse con una prensa especialmente diseñada para estos tipos de porta-muestras (Resch, 2013).

3.2.1.2 Preparación adicional de las muestras para análisis AAS e ICP-MS/AES/OES

Si se van a efectuar análisis de espectrometría de absorción atómica (AAS), de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes de emisión atómica y óptica (IPC-AES / IPC-OES) para la detección de elementos, hay que resaltar que estos no se realizan con muestras en pastillas prensadas, sino que las muestras se colocan en una solución ácida para luego ser calentadas y reducir de esta manera los elementos no metálicos, este proceso se denomina digestión ácida. Se recomienda efectuar la digestión asistida por microondas y no la digestión por vía seca, con el fin de no evaporar los metales pesados susceptibles a evaporarse como el mercurio.

3.2.1.3 Preparación de las muestras para análisis TCLP

El ensayo TCLP se realiza según el estándar U.S. EPA-1311 (SW-846). Este procedimiento ha sido delineado para determinar las características de toxicidad por lixiviación (Boada Noriega, 2004) El ensayo TCLP establece si existe una potencial movilidad o fluidez de los contaminantes inorgánicos contenidos en una muestra, que conlleve

a clasificar ese material como peligroso. Las fases que se identifican con este método son las biodisponibles o solubles de cada elemento, en nuestro caso metales pesados. Para la preparación de las muestras adecuadas, se pesan 50 gr de muestra y se determinan los porcentajes y pesos de la fase sólida y líquida a través del filtrado. Si el porcentaje de la fase sólida es mayor al 5% (>0.05), se procederá a la reducción del tamaño de partículas de la fase sólida. Si el porcentaje de la fase sólida es menor al 5% (<0.05), se procederá directamente a determinar el tipo de fluido de extracción que se va a utilizar.

3.2.2 Protocolo de preparación de muestras en estado líquido

3.2.2.1 Preparación de muestras para análisis fisicoquímicos convencionales

Las muestras de agua que van a ser sometidas a análisis fisicoquímicos convencionales para la detección de los componentes químicos del agua no requieren de ningún tratamiento especial. Los componentes químicos mayoritarios que se determinan con estos análisis se basan en la distribución de aniones y cationes, que se estiman a través de las lecturas de pH, conductividad eléctrica, análisis de alcalinidad (hidróxidos), cloruros (sales), dureza (carbonatos), entre otros, y no incluyen análisis de elementos trazas como los minerales pesados). Para la toma de muestras para análisis fisicoquímico se deben emplear envases de plástico o vidrio, con buen cierre, de ser posible nuevos. El volumen mínimo necesaria para efectuar un análisis fisicoquímico es de aprox. 1000 ml (1litro).

3.2.2.2 Preparación de muestras para análisis ICP-MS/AES/OES para la detección de metales pesados

Para las muestras líquidas a las que se les va a realizar la cuantificación de contaminantes inorgánicos, como minerales o elementos metálicos pesados, por medio de análisis de espectrometría de absorción atómica (AAS), de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes (IPC-AES / IPC-OES), se deben pesar de 0,7 a 2,0 gramos. Antes de efectuar los análisis, las muestras en estado líquido se trasladan a tubos de ensayo, eliminando con un filtrado las partículas sólidas que puedan contener. Las muestras deben ser acidificadas añadiendo ácido nítrico de alta pureza para llevarlas a una concentración final de ácido lo más próxima posible a la concentración de ácido en que se preparen los patrones (en general, entre 0,5 y 3 %). Después de la acidificación se esperará un tiempo mínimo de 24 horas.

3.3 Paso III: Ejecución de los protocolos de análisis de las muestras

Los protocolos de análisis para las muestras en estado sólido, a las cuales se les va a aplicar cualquier método analítico (XRD, XRF, AAS, ICP-MS, etc.), excepto análisis TCLP, deben cumplir con ciertas condiciones relacionadas con la reproducibilidad y repetitividad del método, así como debía arrojar resultados técnicamente válidos dentro de un rango de control estadístico y límites de detección (LD) y límites de cuantificación (LC).

3.3.1 Protocolo general de análisis de muestras en estado sólido

A continuación, se describirá el protocolo general de análisis para las muestras en estado sólido, el cual debe aplicarse para cualquiera de los métodos analíticos que se vaya a utilizar.

a. *Arranque, Verificación y Limpieza de los Sistemas.*

Para cualquiera de los métodos analíticos (XRD, XRF, AAS, ICP-MS, etc.), excepto análisis TCLP, el primer paso es encender o arrancar el sistema que está conformado por el equipo (difractómetro o espectrómetro), la computadora y el software de control del equipo. Se procede a la verificación del funcionamiento del sistema y se realizan pruebas de control de los instrumentos. Los instrumentos dependen del método analítico y de los equipos que se vayan a utilizar. Luego se efectúa la limpieza del sistema con agua destilada con el fin de evitar contaminaciones de las muestras a analizar y se procede a realizar un barrido al vacío (*dark current scan*) para generar una línea base en blanco (baseline).

b. *Calibración y Corrección de Interferencias.*

Los métodos analíticos que con mayor frecuencia se emplean en los laboratorios de materiales (incluyendo minerales, rocas, suelos o sedimentos sueltos) requieren del uso de algunos materiales de referencia certificados para su calibración, también conocidos como materiales estándares de control. Para la calibrar los instrumentos de los diferentes equipos se elaboran curvas de calibración, con muestras minerales o soluciones (reactivos) de propiedades y concentración conocida, para encontrar la ecuación de la curva que luego permitirá establecer la concentración de una solución desconocida mediante interpolación. Es posible generar una curva de calibración

utilizando el método de dilución del elemento o isótopo utilizado como estándar, el mismo que debe ser preparado periódicamente, para controlar el intervalo de pruebas (serie analítica) de un analito. Las desviaciones respecto a la curva de calibración pueden ser empleada para corregir las lecturas analíticas, y de esta manera obtener resultados más confiables y replicables.

- c. *Control del Estándar Interno.* Un estándar interno representa una sustancia o elemento (isótopo), el cual es agregado en un cierto conjunto constante a las muestras que se van a analizar, el blanco, y los estándares de calibración. La manera como se selecciona un isótopo para ser empleado como estándar interno está limitada a aquellos elementos que no están presentes en la muestra (isótopo de estándar interno añadido), o elementos presentes en la muestra (isótopo natural), siempre que se conozca con exactitud su contenido y se tenga en cuenta a la hora de cotejar los contenidos totales. El isótopo de estándar interno no debe presentar ni generar ningún tipo de interferencia isobárica.

3.3.2 Protocolo adicional de análisis XRD

El procedimiento del análisis de difracción de rayos X (XRD) para determinación de compuestos minerales varía dependiendo del tipo de muestra y de las características de los equipos que se vayan a utilizar. En la actualidad existen muchos tipos de difractómetros, que varían entre los convencionales y fijos, de alta exactitud, que requieren de un mayor número de parámetros en su configuración, hasta los más novedosos, que solo requieren una configuración básica (poseen mayor grado de automatización), de tamaño compacto, incluso pueden ser transportables (ver Figura 2).

Entre los procedimientos adicionales que deben realizarse durante los análisis de XRD, está la corrección por error de desplazamiento y asimetría, y la selección



Figura 2. Modelos de equipos de difracción de rayos X (XRD). 1) Modelo fijo D8 Advance de Bruker AXS, y 2) Modelo transportable TERRA II de Olympus.

Fuentes: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (2016).

de la modalidad de análisis. En los equipos de XRD con tecnologías más anticuadas, cuando no hay una configuración apropiada de los ángulos de uno o más ejes del difractómetro, surgen interferencias que afectan las lecturas. Este error puede ser fácilmente minimizado mediante la configuración apropiada del instrumento y la alineación del goniómetro, sin embargo, en algunos casos el desplazamiento del cero es inevitable y simplemente esta interferencia o error hay que tenerla en cuenta en los resultados. En los equipos de XRD con tecnologías más modernas, el acoplamiento del sistema de alineación es controlado por ordenador y dispone de un sistema óptico totalmente automatizado. De la misma manera, se debe seleccionar la modalidad de funcionamiento, la cual puede ser cualitativa o cuantitativa. Los análisis XRD pueden proveer información tanto cualitativa (fases cristalinas y amorfas) como cuantitativa (concentraciones).

3.3.3 Protocolo adicional de análisis XRF

El procedimiento del análisis de espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF) para determinación de elementos varía dependiendo del tipo de muestra y de las características de los equipos que se vayan a utilizar. Esta tecnología ha evolucionado significativamente, y actualmente existen varios tipos de espectrómetros de XRF (ver Figura 3). Se ha observado en análisis de campo con XRF portátil realizados en muestras de suelos han presentado mayor desfase (error) que los análisis efectuados en las muestras de sedimentos sueltos, cuando son comparados con los análisis de laboratorio. Esto quiere decir que no se deben tomar como válidos los resultados de los análisis con el XRF portátil para las muestras de suelos que no estén preparadas (pulverizadas), ya que la presencia de partículas de diferentes tamaños, pueden producir interferencias en las lecturas, y estas interferencias por falta de homogeneidad en la granulometría puede influir significativa en la incertidumbre de las lecturas.

3.3.4 Protocolo adicional de análisis AAS

La espectrometría de absorción atómica (AAS) para la detección de elementos es un método de alta sensibilidad, en

el cual las líneas de absorción atómica son bastante estrechas (de 0,002 a 0,005 nm). Para cada elemento las energías de transición electrónica son únicas. La instrumentación de los equipos AAS está compuesta de un atomizador que se emplea para generar los átomos excitados del analito, una fuente de radiación, un monocromador para configurar la longitud de onda de la radiación, un detector sensible a la emisión de radiación y un procesador de la lecturas o señal de salida del equipo. Una vez que se obtiene la muestra preparada, se debe elegir, mediante la longitud de onda, que debe ser adecuada para la identificación de los elementos de interés (por ejemplo, el plomo, que es de 217,0 nm), (ver Figura 4) Dentro del equipo, una fuente emite un haz que atraviesa la unidad de atomización, la cual contiene la muestra en estado de plasma, luego se traslada al monocromador, el cual excluye la radiación que no es objeto de análisis, para luego pasar al detector de la radiación absorbida (Gallegos et al., 2012).

3.3.5 Protocolo adicional de análisis ICP-MS/AES/OES

En el procedimiento de análisis de espectrometría de masas, el cual contiene plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes de emisión atómica y óptica (IPC-AES/IPC-OES) para la determinación de elementos, se arranca o enciende el sistema, que está conformado por el equipo (espectrómetro), la computadora y el software del equipo. Se realiza en control de los instrumentos y desde allí se enciende el auto muestreador y el plasma, a partir de allí comienza a funcionar la bomba peristáltica, la cual aspira la solución con el analito, dejando que se estabilice por 40 o 60 minutos. Dentro del equipo, la solución con la muestra es transportada a través de la bomba peristáltica hasta el nebulizador, en donde se transforma en aerosol por efecto de la acción de gas argón. Este aerosol es conducido a la zona de ionización donde actúa el plasma, el cual alcanza temperaturas de hasta 8000°K (7726°C). Bajo estas condiciones, los átomos que componen la muestra son ionizados. Estas masas ionizadas se dirigen al detector, donde se valora su abundancia en la muestra (ver Figura 5) (Vanina Llanos, 2019).



Figura 3. Modelos de equipos de fluorescencia de rayos X (XRF). 1) Modelo transportable Xpert de Olympus, 2) Modelo portátil X-MET 8000 de Hitachi.

Fuentes: Hitachi Energy (2022).



Figura 4. Modelos de equipos de espectrometría de absorción atómica. 1) Modelo fijo-transportable SpectAA de atomización por llama, 2) Modelo fijo-transportable ICE 3500 AAS de atomización dual llama / horno de Thermo Fisher Scientific (2022).
Fuentes: Gallegos et al. (2012).



Figura 5. Modelos de equipos de espectrometría basados en plasma acoplado inductivamente. 1) Modelo fijo ICP-MS NexION de PerkinElmer, 3) Modelo fijo ICP-AES Optima 8300-DV de PerkinElmer.
Fuentes: OTRI. Universidad de Málaga (2022).

3.3.6 Protocolo de análisis TCLP

El ensayo TCLP se efectúa según el estándar U.S. EPA-1311 (SW-846). Este método ha sido esbozado con el fin de caracterizar la toxicidad por efectos de lixiviación. El ensayo TCLP establece si existe una potencial movilidad o fluidez de los contaminantes inorgánicos contenidos en una muestra, que conlleve a clasificar ese material como peligroso. Luego de tener la muestra preparada, el siguiente paso es determinar el tipo de fluido lixivante que se utilizará en el ensayo de extracción, el cual es establecido mediante el material de la muestra de la capacidad de neutralización ácida. Para efectuar el ensayo de extracción, configurando el extractor rotatorio (ver Figura 6) con una rotación de 30 RPM por 18 a 20 horas, después de lo cual se separará por filtrado el material contenido en el recipiente de extracción en sus componentes líquido y sólido. El líquido resultante se denomina “Extracto de TCLP” o “Líquido Fase II”, el cual se somete a una detección de metales pesados por análisis AAS, ICP-MS o ICP-AES.

3.3.7 Protocolo de análisis de muestras en estado líquido

3.3.7.1 Protocolo de análisis fisicoquímicos convencionales

En el ámbito de la investigación de sustancias o elementos contaminantes provenientes de las actividades mineras, los análisis físico-químicos no aportan datos sobre las concentraciones de minerales trazas como metales pesados (tales el arsénico, plomo, mercurio, entre otros), sin embargo, estos análisis aportan datos importantes sobre las concentraciones de los componentes químicos mayoritarios dentro del agua (hidroquímica), tales como cloruros, carbonatos o hidróxidos, datos que se utilizan como apoyo para hacer control de calidad (Fundación Nacional de Salud de Brasil, 2013).

3.3.7.2 Protocolo de análisis ICP-MS/AES/OES para la detección de metales pesados

En el procedimiento de análisis de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus

variantes de emisión atómica y/o óptica (IPC-AES/IPC-OES) para la determinación de elementos en muestras en estado líquido (agua) es similar al procedimiento que se recomienda a seguir con muestras sólidas en solución.

3.4 Paso IV: Control estadístico de la calidad (CEC/CEP) sobre los resultados de los análisis de las muestras

El principal problema que se debe evitar a la hora de efectuar análisis de sustancias contaminantes en muestras de suelos y agua es reducir el grado de incertidumbre de los resultados. El control de la variabilidad a través de los gráficos de control permite identificar aquellos

componentes que presentan mayor y menor variabilidad, lo cual pudiera estar relacionado con diferentes niveles de contaminación o con errores en el proceso de muestreo y/o análisis. Si en los gráficos de control de los resultados de las concentraciones de elementos contaminantes (ver Figura 7) se presentan valores dentro de los límites de control superior (LS) e inferior (LI), se dice que dichos parámetros se encuentra bajo control. Si por el contrario, se presentan valores por arriba del límite superior (LS) o por debajo del límite inferior (LI), se puede afirmar que dichos parámetros presentan valores fuera de control y requiere de una revisión de los procedimientos de muestreo y/o análisis que se efectuó a la muestra.



Figura 6. Modelos de equipos extractores para ensayos TCLP. 1) Modelo de Labments Equipments (China), 2) Modelo de Green Lab Equipments (India). Fuente: Resch (2013).

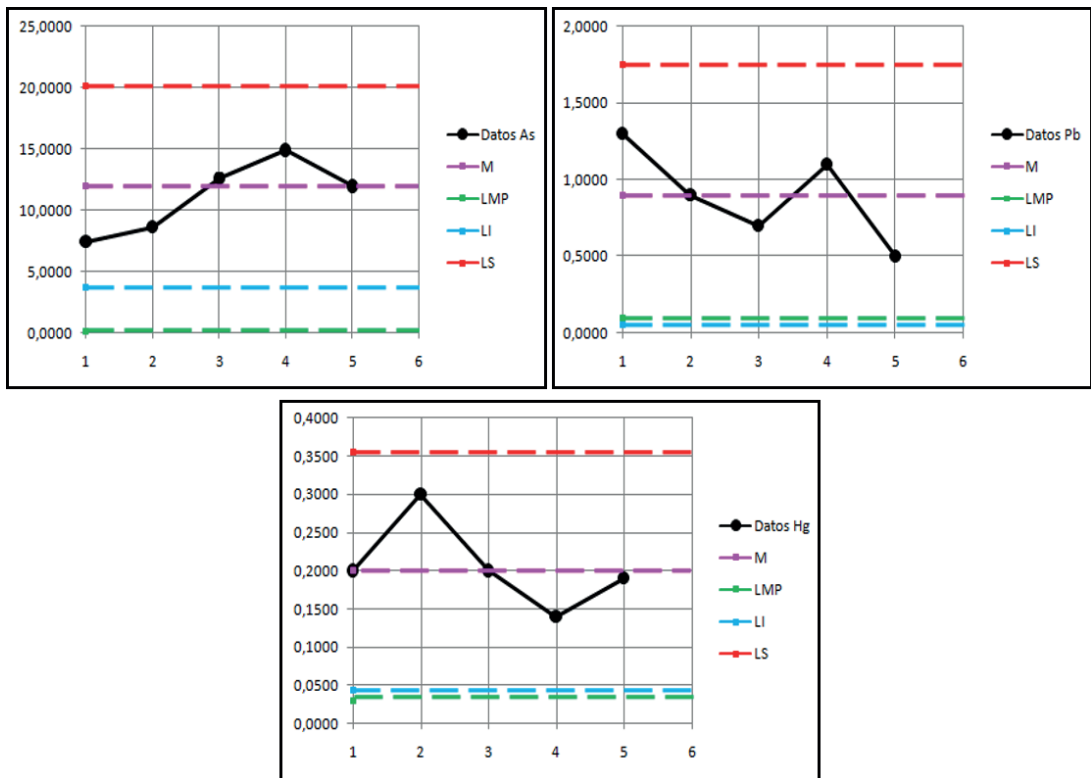


Figura 7. Ejemplo de Gráficos de control del contenido de arsénico (As), plomo (Pb) y Mercurio (Hg) en mg/l. Datos de: Ccolque Fernandez (2019). Fuente: Elaboración propia.

3.5 Paso V: Certificación y oficialización de los resultados

Luego de que los resultados pasen por las pruebas de CEC/CEP se proceden a certificarlos (proceso interno de la empresa operadora) y a oficializarlos (reportarlos ante los organismos o entes gubernamentales reguladores como el MINEM y el MINAM), con el fin de que queden registrados tanto de la memoria corporativa técnica de la empresa operadora como dentro de los archivos los organismos o entes gubernamentales reguladores. De esta manera, los resultados de estos análisis se convierten en “datos duros” certificados y oficializados que pueden ser utilizados en estudio posteriores más detallados o servir como documentos legales ante posibles auditorías o litigios.

3.6 Paso VI: Incorporación de los resultados a los sistemas de información

Los datos certificados y oficializados pueden incorporarse ahora a los sistemas de información de la empresa operadora y de los entes gubernamentales, siendo almacenados en bases de datos y graficados dentro de mapas y/o Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permite apoyar en monitoreo de los componentes contaminantes a nivel real y observar su evolución a través del tiempo. Un nivel más avanzado lo constituye la interpolación de los “datos duros” utilizando algoritmos geoestadísticos, con el fin de obtener mapas estocásticos de distribución de minerales pesados o sustancias contaminantes (Domínguez López, 2015).

3.7 Paso VII: Toma de decisiones y ajustes en el sistema de gestión ambiental (SGA)

Para que se logre la disminución del grado de incertidumbre en los valores del contenido o porcentaje de metales pesados, es fundamental instaurar programas de supervisión y control permanente de las etapas que conforman todo el proceso de extracción, muestreo y análisis. Una herramienta adicional que puede utilizarse dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA), el cual representa un modelo conceptual, siendo una herramienta de planificación que integra los datos que se van adquiriendo durante el desarrollo del estudio. El modelo también permite la identificación de la información adicional que debe capturarse para efectuar una óptima y eficiente evaluación.

IV. DISCUSIÓN

El procedimiento que se está proponiendo es este trabajo consta de siete (7) etapas: 1) Muestreo, 2) Ejecución de los Protocolos de Preparación de las Muestras, 3) Ejecución de los Protocolos de Análisis de las Muestras, 4) Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP) sobre los Resultados de los Análisis de las Muestras, 5) Certificación y Oficialización de los Resultados, 6) Incorporación de los Resultados a los Sistemas de Información y 7) Toma de Decisiones y Ajustes en el Sistema de Gestión Ambiental (SGA). Esto permitirá identificar los correctivos necesarios, optimizar la toma de decisiones y realizar los ajustes operacionales requeridos dentro del SGA de las empresas mineras. Estos resultados están en concordancia con los trabajos de (Lina Khadour, 2010) y el SINIA. Sistema Nacional de Información Ambiental (2016), en los cuales se presentaron flujos de trabajo que recomiendan implementar en las organizaciones para implementar un SGA.

V. CONCLUSIONES

- El control de la variabilidad permite identificar aquellos componentes que presentan mayor y menor variabilidad en sus datos, lo cual pudiera estar relacionado con diferentes niveles de contaminación o con errores en el proceso de medición.
- La toma de decisiones basadas en la combinación de experiencia y análisis de datos presenta un basamento más científico que la toma de decisiones que se basan sólo en la experiencia, ya que existen elementos aleatorios (como la variabilidad) o fallas dentro del proceso, que pueden identificarse y corregirse de manera más rápida con las herramientas de CEC/CEP.
- En este proyecto se propone una metodología esquematizada en un flujograma o diagrama de flujo para el monitoreo y control de componentes y elementos contaminantes de suelos y aguas (minerales pesados y otras sustancias químicas como el mercurio y el cianuro), con el fin de mejorar la evaluación de los EIA.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la unidad de posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, y al Instituto de Investigación de la FIGMMG por facilitar la publicación del presente artículo.

VII. REFERENCIAS

- Ccolque Fernandez, E. E. (2019). *Contaminación minera en el área Sur-Medio del Perú por la minería del oro a pequeña escala*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/174074>
- Domínguez López, Á. (2015). *Análisis geoestadístico de los niveles geogénicos de metales pesados en suelos de Asturias*. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/32155>
- Fundación Nacional de Salud de Brasil. (2013). *Manual práctico de análisis de agua*. <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/513>
- Gallegos, W. , Vega, M., & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja*, 15(1), 18–25. <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/15.2012.02>
- Hernández, R. , Fernández, C. , & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación Científica* (McGRAW-HILL, Ed.; 6ta ed.). <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hitachi Energy. (2022). *Measurement and safety devices*. <https://www.hitachienergy.com/us/en/offering/product-and-system/transformer-insulation-and-components/measurement-and-safety-devices>
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. (2016). Manual de operación del difractor de rayos

X D8 Advance. *LINAN Laboratorio de Investigaciones En Nanociencias y Nanotecnología*, 1–30. <http://www.linan-ipicyt.mx/Manual%20XRD.pdf>

Lina Khadour. (2010). *Total Quality Environmental Management (TQEM) Framework Towards Sustainability*. http://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/124/1/203579_LINA%20KHADOUR,%20TQEM%20final%20stitched%20version%209%20May%20202011.pdf

Vanina Llanos, L. (2019). *Comparación de dos métodos (ICP-OES vs. ICP-MS) para la determinación de arsénico en agua*. https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/13814/tesis-brom.-llanos-lorena-vanina-2019.pdf

Boada Noriega, L. A. (2004). *Análisis de Toxicidad de un Residuo por medio del método de extracción y lixiviación. Método 1310A (EP) y Método 1311 (TCLP)*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21706/u258318.pdf>

Andara, M., Rodríguez, C., Suarez, M., di Pasquale, C., & Ravelo, R. (2011). Protocolo de preparación de muestras minerales para análisis físicos, químicos y mineralógicos. *Centro de Tecnología de Materiales (CTM) FIIIDT Caracas*, 1–45. <https://es.scribd.com/document/482144847/Protocolo-de-Preparacion-de-Muestras-Minerales-para-Analisis-Fisicos-Quimicos-Y-Mineralogicos-Fundacion-Instituto-de-Ingenieria-para-la-Investigaci>

OTRI. Universidad de Málaga. (2022). *Catálogo Infraestructuras. Servicios Centrales de Investigación. Unidad de Espectrometría Atómica*. <https://catalogoinfraestructuras.uma.es/espectrometria-atmica.php>

Resch, C. (2013). *In-situ X-ray Diffraction Instruments & Applications*. Anton Paar GmbH, Graz. www.anton-paar.com

SINIA. Sistema Nacional de Información Ambiental. (2016). *Evaluación Preliminar de la Contaminación Ambiental causada por la Pequeña Minería y Minería Artesanal en la Zona Urbana del Distrito de Chala- Arequipa, Perú*. Informe. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/evaluacion-preliminar-contaminacion-ambiental-causada-pequena-mineria>

Thermo Fisher Scientific. (2022). *Spectrometers*. <https://www.thermofisher.com/search/results?query=Spectrometers%20&focusarea=Search%20All>

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores no incurren en conflictos de intereses.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación, sector comercial o sin fines de lucro.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legal:

Los autores declaran que no violaron ni omitieron normas éticas o legales en esta investigación.

Contribución de autoría:

OG: Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis formal, Investigación, Curación de datos, Escritura-preparación del borrador original, Redacción-revisión y edición. CC: Conceptualización, Metodología, Validación, Escritura-preparación del borrador original, Supervisión del trabajo. VA: Conceptualización, Metodología, Supervisión del trabajo.