



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Proceso innovador para mejorar la metodología de
monitoreo en la evaluación de impacto ambiental del
sector minero utilizando el control estadístico de
calidad CEC, CEP**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias
Ambientales con mención en Desarrollo Sustentable en Minería y
Recursos Energéticos

AUTOR

Oswaldo Augusto GONZÁLES REYNOSO

ASESOR

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Lima, Perú

2023



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

Gonzáles, O. (2023). *Proceso innovador para mejorar la metodología de monitoreo en la evaluación de impacto ambiental del sector minero utilizando el control estadístico de calidad CEC, CEP*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Oswaldo Augusto Gonzáles Reynoso
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07204761
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7088-5877
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	17402784
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5821-5886
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Eduardo Ronald Espinoza Farfan
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40231227
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Alfredo Orihuela Salazar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08004136
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.2.5. Contaminación del Ambiente
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: País: Perú Departamento: Arequipa Provincia: Caraveli Distrito: Chala Latitud: 16°51'54 Longitud: 74°14'43
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2015 - 2019
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00 Minería, Procesamiento de minerales, Multidisciplinar: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los cinco días del mes de octubre del año dos mil veintitres, siendo las diez horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000530-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 27 de setiembre del 2023, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«PROCESO INNOVADOR PARA MEJORAR LA METODOLOGÍA DE MONITOREO EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL SECTOR MINERO UTILIZANDO EL CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD CEC, CEP»

Presentado por el Bach. **OSWALDO AUGUSTO GONZÁLES REYNOSO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **CIENCIAS AMBIENTALES** con mención en **DESARROLLO SUSTENTABLE EN MINERÍA Y RECURSOS ENERGÉTICOS**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20200015944, de fecha 20 de julio del 2020, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **CIENCIAS AMBIENTALES** con mención en **DESARROLLO SUSTENTABLE EN MINERÍA Y RECURSOS ENERGÉTICOS** al Bach. **OSWALDO AUGUSTO GONZÁLES REYNOSO**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Presidente

MG. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
Secretario

DR. EDUARDO RONALD ESPINOZA FARFÁN
Miembro

DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Asesor

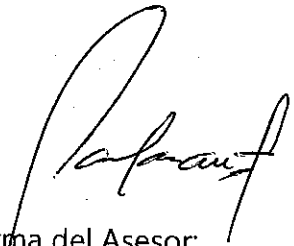


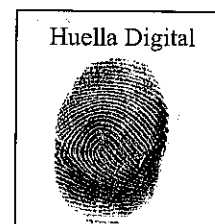
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza en mi condición de asesor acreditado con el Número de Dictamen N° 000026-2020-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «PROCESO INNOVADOR PARA MEJORAR LA METODOLOGÍA DE MONITOREO EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL SECTOR MINERO UTILIZANDO EL CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD CEC, CEP» presentado por el Bachiller Oswaldo Augusto Gonzáles Reynoso, para optar el Grado Académico de Magister En Ciencias Ambientales con mención en Desarrollo Sustentable En Minería Y Recursos Energéticos CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabaos Académicos, de investigación y producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 03 % 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 grado correspondiente.


Firma del Asesor:
DNI: 17402784
Nombres y apellidos del asesor:
..... Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza



Dedicatoria

A la memoria de mi madre

Agradecimiento

Gracias a mi hermana Luz
Marina
por estar siempre presente
y por el apoyo que siempre
me brindo toda la vida.

Gracias a mi Universidad
Nacional Mayor de San
Marcos y de mi Asesor el
Dr. Carlos Cabrera por su
apoyo en el logro de mi
tesis.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
PORTADA	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1. Situación Problemática	5
1.2. Formulación del Problema	7
1.2.1. Problema General	7
1.2.2. Problemas Específicos	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
1.4. Justificación	9
1.4.1. Justificación Teórica	9
1.4.2. Justificación Práctica	9
1.4.3. Justificación Metodológica	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Antecedentes de Investigación	11
2.1.1. Antecedentes Internacionales	11
2.1.2. Antecedentes Nacionales	13
2.2. Bases teóricas	15

2.2.1. Variable Independiente: Monitoreo de Contaminantes	15
2.2.2. Variable Dependiente: Estudios de Impacto Ambiental	46
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	58
3.1. Hipótesis General.....	58
3.2. Hipótesis Específicas	58
3.3. Identificación y Operacionalización de Variables.....	59
CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	60
4.1. Tipo de Investigación	60
4.2. Unidad de Análisis	62
4.3. Población de estudio	62
4.4. Muestra	63
4.5. Selección de la muestra	63
4.6. Técnicas de Recolección de Datos	64
4.7. Análisis e Interpretación de la Información	65
4.8. Secuencia Metodológica de la Investigación	65
CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5.1. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 1	67
5.2. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 2	71
5.3. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 3	78
5.4. Resultados obtenidos para el Objetivo General de la Investigación	83
5.4.1. Paso I: Muestreo	85
5.4.2. Paso II: Ejecución de los Protocolos de Preparación de las Muestras	86
5.4.3. Paso III: Ejecución de los Protocolos de Análisis de las Muestras ...	95
5.4.4. Paso IV: Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP) sobre los Resultados de los Análisis de las Muestras	109
5.4.5. Paso V: Certificación y Oficialización de los Resultados	111
5.4.6. Paso VI: Incorporación de los Resultados a los Sistemas de Información.....	111
5.4.7. Paso VII: Toma de Decisiones y Ajustes en el Sistema de Gestión Ambiental	113
5.5. Contrastación de hipótesis	116
5.5.1. Contrastación de la hipótesis general.....	116

5.5.2. Contrastación de las hipótesis específicas	117
CAPÍTULO VI. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
6.1. Discusión de Resultados	120
6.2. Conclusiones	124
6.1. Recomendaciones	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
ANEXOS.....	135
Anexo 1. Matriz de Consistencia	136
Anexo 2. Matriz de Operacionalización de las Variables	137
Anexo 3. Tablas de Evaluación Estadística de los resultados del Estudio de Impacto Ambiental del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) durante el 2016, en Distrito de Chala, Región de Arequipa.....	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1. Límites Máximos Permitidos (LMP) de emisión de agentes tóxicos, según Decreto No. 010-1010 del MINAM (2010)	51
Tabla 2. Detalles de identificación de los informes de EIA que están asociados a proyectos mineros en el Perú y que fueron aprobados en los años 2015 a 2019.	69
Tabla 3. Resultados de los análisis físico-químicos y espectrofotometría de 5 muestras de agua (concentraciones en unidades de mg/l).	74
Tabla 4. Resultados de los Análisis de Variabilidad (concentraciones en unidades de mg/l).	75
Tabla 5. Cantidad de fluido de extracción por peso de fase sólida de la muestra.	105
Tabla 6. Principales Análisis Físico-Químicos Convencionales.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Mapa Geológico de la Región de Arequipa.	72
Figura 2. Sectores Poblados del Distrito de Chala, Región de Arequipa.	72
Figura 3. Resultados del Análisis de Desviación Estándar Relativa (σ/M) de los análisis de las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 4. Número de Veces del Valor de Referencia o Límite Máximo Permitido (NVLMP) de los análisis de las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 5. Gráfico de Control del Contenido de Arsénico (As) en mg/l.	79
Figura 6. Gráfico de Control del Contenido de Plomo (Pb) en mg/l.	79
Figura 7. Gráfico de Control del Contenido de Mercurio (Hg) en mg/l.	79
Figura 8. Regresión lineal entre los contenidos de sodio (Na) y calcio (Ca), con una correlación positiva del 98%. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 9. Regresión lineal entre los contenidos de sodio (Na) y de sílice (Si), con una correlación negativa del 49%. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 10. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de arsénico (As), con una correlación negativa de 3,3%. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 11. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de plomo (Pb), con una correlación negativa de 29,8%. Fuente: Elaboración propia. ..	82
Figura 12. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de mercurio (Hg), con una correlación positiva de apenas 2,7%. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 13. Propuesta de un proceso innovador basado en el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) para mejorar la evaluación de los EIA en los proyectos mineros. Fuente: Elaboración Propia.	84
Figura 14. Modelos de equipos de difracción de rayos X (XRD).	98

Figura 15. Modelos de equipos de fluorescencia de rayos X (XRF).	100
Figura 16. Modelos de equipos de espectrometría de absorción atómica.	101
Figura 17. Modelos de equipos de espectrometría basados en plasma acoplado inductivamente. 1) Modelo fijo ICP-MS i-CAP TQ de ThermoFisher, 2) Modelo fijo ICP-MS NexION de PerkinElmer, 3) Modelo fijo ICP-AES Optima 8300-DV de PerkinElmer, 4) Modelo fijo ICP-OES Optima 7300-DV de PerkinElmer, ...	103
Figura 18. Esquema de funcionamiento del extractor rotatorio.....	105
Figura 19. Modelos de equipos extractores para ensayos TCLP. 1) Modelo de Labments Equipments (China), 2) Modelo de Green Lab Equipments (India).	106
Figura 20. Ejemplo de uso de los sistemas de información Geográfica (SIG) y los mapas de distribución de minerales pesados o sustancias contaminantes. Modificado de: Domínguez (2015).	112
Figura 21. Diagrama Causa – Raíz para el manejo del grado de incertidumbre en los análisis de sustancias contaminantes en muestras de suelos y agua. Modificado de: Andrade (2013).....	114
Figura 22. Modelo Conceptual de Diseminación de Contaminantes producidos por la actividad minera en el ambiente.	115

RESUMEN

El presente trabajo de tesis titulado: *“Proceso innovador para mejorar la metodología de monitoreo en la evaluación de impacto ambiental (EIA) del sector minero utilizando el control estadístico de calidad (CEC / CEP)”* Tuvo como objetivo general proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (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. 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). La población objeto de estudio estuvo conformada por los proyectos mineros que han solicitado aprobación de sus EIA ante el MINEM durante el periodo 2015 a 2019, mientras que la muestra estuvo constituida por los EIA que fueron aprobados por el MINEM durante el mismo periodo. Se utilizó la técnica de la observación y revisión documental de trabajos previos para la recolección de la información. Los resultados confirman que la implementación de técnicas de control estadístico de la calidad (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 acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; es decir, se demuestra que: *La implementación del control estadístico de la calidad (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 present work entitled: *"Innovative process to improve the monitoring methodology in the environmental impact assessment (EIA) of the mining sector using statistical quality control (SQC/SQP)"*. Its general objective was to propose an innovative process for the use of control quality statistics (SQC/SQP) in EIA's that allow improving the evaluation of monitoring data and help to take measures to reduce the effects of environmental contamination 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 population under study was made up of the mining projects that have requested approval of their EIAs before the MINEM during the period 2015 to 2019, while the sample was made up of the EIAs that were approved by the MINEM during the same period. The technique of observation and documentary review of previous works was used to collect the information. The results confirm that the implementation of statistical quality control techniques (SQC/SQP) within the EIA allows identifying the necessary corrections, 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, in order to improve the evaluation of the EIA. Consequently, the investigator's hypothesis is accepted and the null hypothesis is rejected; In other words, it is demonstrated that: *The implementation of statistical quality control (SQC/SQP) in the EIA 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 Activities.*

Keywords: Statistical Quality Control, Environmental Impact Assessment.

INTRODUCCIÓN

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 estudios de impacto ambiental (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 técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) pueden ayudar a identificar cuáles son las posibles causa-raíz que están llevando a obtener esos resultados erróneos.

El presente trabajo de investigación se encuentra estructurado por los siguientes capítulos:

El Capítulo I está integrado por el problema de investigación, el cual se da a conocer la situación problemática, donde se explica que La empresa minera requiere evitar las evaluaciones de impacto ambiental (EIA) deficientes, que han traído numerosos problemas ambientales, por lo cual, se pretende integrar las técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA). Adicionalmente, se incluye el objetivo general y los

objetivos específicos, así como la justificación, delimitación y viabilidad de la investigación.

El Capítulo II está conformado por los antecedentes de la investigación y las bases teóricas, en el cual se desarrolla una revisión de la bibliografía referente al tema y las variables de la investigación. Secuencialmente, este capítulo inicia con los antecedentes, tanto nacionales como internacionales, que están relacionados con la temática de estudio, adicionalmente, se desarrolla el marco teórico relacionado con el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) y los estudios de impacto ambiental (EIA).

El Capítulo III abarca la formulación de las hipótesis, incluyendo tanto la general como las específicas. Adicionalmente, se presentan las variables involucradas en la investigación, junto con sus dimensiones, definiciones conceptuales y operacionales de las mismas.

El Capítulo IV, se refiere sobre la metodología científica utilizada, en el cual se describe el tipo de investigación, diseño, nivel o alcance, población, muestra, muestreo, instrumentos y su respectiva validación y cálculo del coeficiente de confiabilidad en caso de que aplique.

El Capítulo V incluye los resultados obtenidos a través de la aplicación de las técnicas de recolección de datos mediante los instrumentos elaborados, los análisis estadísticos, tanto descriptivos como los inferenciales. Se incluyen tanto los análisis de laboratorio y como los análisis de la observación e interpretación documental.

El Capítulo VI integra los resultados obtenidos y analizados que permiten realizar las interpretaciones y discusiones de la presente investigación. Además, se efectúan las conclusiones y recomendaciones. Finalmente se detallan las referencias utilizadas y los anexos.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

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.

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 evaluaciones de impacto ambiental (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 las existencias 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.

En lo que respecta a la aplicación de las técnicas de control estadístico de la calidad (CEC) y control estadístico de procesos (CEP) a estudios ambientales, MacCarthy y Wasusri (2002) publicaron un trabajo donde se realiza una revisión de las principales aplicaciones pertenecientes al CEC/CEP utilizadas, fuera del ya comentado ámbito industrial. La revisión estaba basada en 46 artículos publicados hasta esa fecha, siendo los dominios en los que se centraba la investigación y su porcentaje sobre el total, los siguientes:

- Ingeniería, entornos industriales y aplicaciones ambientales (43%)
- Aplicaciones relacionadas con la sanidad y estudios médicos (31%)
- Aplicaciones en el sector servicios (17%)
- Aplicaciones estadísticas (9%)

Del dominio relativo a la primera categoría, únicamente dos estudios correspondían a las aplicaciones ambientales, ambas relacionadas con la monitorización de la calidad del agua. De ellos, solamente uno realiza un análisis basado en gráficos de control estándar, al igual que los que se utilizan en las aplicaciones industriales.

Posteriormente a esta revisión, y hasta el año 2006, algunos autores han publicado estudios de temática ambiental, basados en la aplicación de las técnicas de CEC/CEP para estudios ambientales. Entre ellos se pueden destacar los siguientes, relacionados con la evaluación del rendimiento ambiental de una instalación (Corbett y Pan, 2002) y la excelencia ambiental como clave de mejora (Corbett y Klassen, 2006).

Más recientemente, en 2011, se publicó un estudio sobre la concentración de nitratos en agua subterráneas (García-Díaz, 2010) que combina el uso de los gráficos de control con otras técnicas de análisis basadas en Modelos Auto Regresivos Integrados de Media Móvil, abreviados por ARIMA (Zhang, 2003).

Pero la evidencia de la falta de aplicación masiva de técnicas tradicionales de control estadístico de la calidad en los estudios ambientales, que hemos

evidenciado en esta revisión, no debe atribuirse a un problema de desarrollo teórico e implementación, sino a una falta de implementación motivada por el desconocimiento que se tiene de las herramientas de gestión y control de la calidad.

Tomando como base la descripción de la problemática anteriormente descrita, se ha decidido desarrollar la presente investigación, con la finalidad de proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudio 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.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

PG: ¿De qué manera el proceso innovador de uso de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA permite mejorar la evaluación de los datos de monitoreo y ayudar a tomar medidas para reducir los efectos de la contaminación ambiental en la minería?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿Cuáles son los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú son empleados para la implementación de medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas?

PE2: ¿Cómo se podría monitorear la variabilidad de los contaminantes aplicando el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA para reducir la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental?

PE3: ¿Cómo utilizar el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) como una nueva técnica para evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental originada por la actividad minera?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

OG: Proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (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.

1.3.2. Objetivos Específicos

OE1: Examinar si los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú son empleados para la implementación de medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.

OE2: Conocer como el monitoreo de la variabilidad de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

OE3: Determinar como el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental originada por la actividad minera.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Teórica

Actualmente, los proyectos mineros para ser aceptados deben ser técnicamente factibles y económicamente viables; requiriendo no sólo de modelos de simulación matemática para darle soporte teórico, sino que también debe contener ensayos de laboratorio y estudios de impacto ambiental (EIA) para ser aceptados. La justificación teórica del presente trabajo se fundamenta en el hecho que permite establecer los mecanismos técnicos para emplear las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA) de los proyectos mineros.

1.4.2. Justificación Práctica

La explotación racional donde se pueda implementar nuevas tecnologías para el máximo recobro de los minerales, representa un desafío para las empresas mineras. La actual investigación está justificada desde el punto de vista práctico, debido a que contribuye a que nuevos elementos de discusión se introduzcan en este escenario universitario y profesional, sobre la importancia de implementar las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA) de los proyectos mineros.

1.4.3. Justificación Metodológica

El actual trabajo investigativo se justifica metodológicamente, debido a que los procesos inherentes al desarrollo del mismo están contemplados bajo el Método Científico y la Asociación Estadounidense de Psicología (APA), siguiendo un orden sistemático en su proceder; primeramente, se exploran diferentes teorías relacionadas, así como estudios previos descritos en otro contexto, tiempo y espacio; permitiendo establecer los fundamentos para las variables de estudio. Las evidencias obtenidas reafirman la validez y confiabilidad de los instrumentos de medición, ofreciendo una adaptación en el

ámbito de investigación científica a nivel nacional, sirviendo como sustento para su aplicación en otras instituciones que ameriten evaluar las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA) de los proyectos mineros.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Andrade (2013) efectuó una investigación denominada: *“Implementación de Control Estadístico de Procesos para el Control de la Calidad y la Mejora Continua en la Industria Minera”*, presentado como Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma de México (UNAM). En el resumen, el autor afirma que “la organización donde se efectuó este trabajo centra sus actividades en la exploración, desarrollo y producción rentable de concentrados de minerales metálicos. En este sentido, el porcentaje de metales extraídos (concentrados de metales) en 2012 fue diferente a lo esperado. Para determinar si la técnica de espectrofotometría de absorción atómica se realiza correctamente o si existe algún problema en el proceso de extracción, la muestra se envía a un laboratorio externo para obtener un resultado diferente al reportado por el laboratorio de la empresa. Luego de analizar el método utilizado y los datos obtenidos, se puede determinar que el cambio en el porcentaje de metal se debe a la falta de estandarización del análisis de absorción atómica y la variabilidad del proceso de extracción. Debido a los problemas anteriores, como estrategia principal, se decidió implementar pruebas húmedas y control estadístico del proceso de concentrado de metales, lo que permitirá determinar si el proceso de extracción presenta variabilidad y tomar las medidas necesarias. El resultado del control estadístico de este proceso se refleja en el 100% de la evaluación aprobada del procedimiento de ensayo espectrofotométrico por absorción atómica, estableciendo así un proceso de mejora continua para la organización minera”.

Colque, E. (2019) realizó un trabajo investigativo denominado *“Contaminación minera en el Área Sur-Medio del Perú por la minería del oro a*

pequeña escala”, propuesto como Trabajo de Grado para Titulación de Máster en Ingeniería de Minas en la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. En este trabajo “se estableció la mineralogía y tecnología de procesamiento de oro de la mina San Luis, se evaluó el método de extracción, además se analizó y finalmente se comparó la composición química del agua en el centro y sur de Perú. Los niveles de mercurio en el cabello humano recolectados de otros estudios en el área. Analizar la composición química del agua de los ríos San Luis, Majes y Ocoña para determinar los posibles elementos tóxicos y sus concentraciones; los elementos potencialmente tóxicos que se encuentran en estos ríos son: mercurio, arsénico y plomo. En cuanto a la concentración de mercurio, supera en 30.000 veces el límite máximo de concentración establecido por las autoridades en la categoría de población (agua potable). Por último, comparando los análisis del contenido de mercurio en el cabello humano con otros estudios, se encontró que en el cabello de las mujeres tenían un menor contenido de mercurio, mientras que los ancianos tenían un mayor contenido de mercurio.

Khadour (2010) realizó un trabajo investigativo titulado “*Total Quality Environmental Management (TQEM) Framework Towards Sustainability*”, propuesto como Trabajo de Grado para Titulación de Doctor en Filosofía en la Universidad de Nottingham. Para reducir el daño ambiental sustancial del entorno de la construcción, los contratistas tienen que cumplir con un número creciente de normativas medioambientales de construcción. Hasta la fecha, la mayor parte de la investigación empírica sobre cuestiones de gestión ambiental se ha dirigido a la gestión de la calidad, la estrategia, la cadena de suministro y los procesos. El desarrollo de la Gestión Ambiental de Calidad Total (siglas en inglés TQEM) puede mejorar tanto el medio ambiente, la calidad, la sostenibilidad, la relación calidad-precio del cliente, y al mismo tiempo, reducir los riesgos de los contratistas. La TQEM ha surgido, en el sector manufacturero, de la integración de la Gestión Ambiental (Siglas en inglés Environmental management EM) estratégica en el enfoque holístico de la Gestión de la Calidad Total (TQM). La TQEM incorpora cuatro principios clave: identificación del cliente, mejora continua, hacer bien el trabajo a la primera y un enfoque de sistema. El impacto de TQEM en la gestión, el diseño, el rendimiento y las

adquisiciones de la construcción no siempre es tan visible para los usuarios finales como lo es para el contratista. Para poder definir estos elementos en un proyecto de construcción, es necesario estudiar las perspectivas de los contratistas con respecto al TQEM a nivel corporativo (aspectos culturales y comerciales) y TQEM a nivel de proyecto (desempeño de la construcción y acuerdos de adquisición)".

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En la investigación realizada Blanco y Paricahua (2020) nominada *"Identificación y Valoración de Impactos Ambientales Generados por las Actividades de la Minería Informal, en el Cerro Luicho del Distrito de Colta, Provincia de Paucar del Sara Sara, Ayacucho"*, presentada Universidad Tecnológica del Perú.

Los autores afirman en el resumen que "se han identificado y evaluado los principales impactos de las actividades mineras en el medio ambiente, y se han encontrado alrededor de 42 tipos de impactos ambientales, de los cuales 10 son impactos importantes: cambios en la calidad del suelo debido a un tratamiento inadecuado de residuos sólidos, cambios en la calidad del suelo debido a residuos de estiércol, Los cambios en la calidad del suelo causados por la descarga de aguas residuales, los cambios en la calidad del suelo causados por la descarga de petróleo, la reducción de la cobertura de vegetación causada por la limpieza, la transmisión de ruido causó la expulsión de animales y plantas silvestres, las partículas de transmisión de material causaron cambios en la calidad del aire, los accidentes geográficos y la estructura del suelo debido al tratamiento de limpieza Paisaje natural causado por la pérdida de Propuesta de plan de reducción de desastres, fundamentalmente complementario a la educación ambiental".

Ortiz (2019) efectuó un trabajo investigativo titulado *"Comparación entre el Análisis de Fluorescencia de Rayos X Portátil e ICP-MS en elementos guía para la exploración geoquímica del Área de Antabamba-Apurímac"*, presentada como

Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Geólogo en la Universidad Nacional del Altiplano. El autor menciona en el resumen que “el propósito de esta investigación es definir la eficiencia de estas nuevas tecnologías para la exploración geoquímica. Se recolectaron un total de 59 muestras, las cuales cumplieron con los procedimientos y controles de calidad requeridos para asegurar la objetividad del trabajo. Las muestras son preparadas y analizadas por el laboratorio de SGS Perú para análisis ICP-MS. El control es controlado y verificado mediante la inserción de estándares de calidad y blancos de muestra para confirmar su correcto valor de laboratorio. De la misma manera, se analizó el número total de muestras en dos formas, manual y por aspersion, utilizando el dispositivo XRFp en modo suelo. Al analizar los datos y realizar una comparación directa, análisis estadístico y gráfico, se puede obtener un alto grado de similitud entre el análisis XRF y el análisis ICP-MS de muestras en polvo. Desde el punto de vista estadístico, no se observan discrepancias considerables entre Cu, Mo, Zn, As y Pb, mientras que Ag tiene una diferencia estadísticamente significativa. El resultado de la prueba de exactitud y precisión es que el análisis del XRF portátil en la muestra de polvo tiene mejores resultados que el análisis del XRF portátil en la muestra de mano. La conclusión que se extrae al final del estudio es que los datos obtenidos por el XRF portátil son datos. En comparación con ICP-MS, la calidad es confiable y se puede utilizar para determinar áreas anormales en la exploración geoquímica”.

Uscuchagua (2016) efectuó un proyecto de investigación titulado “*Optimización de metodologías de evaluación de impacto ambiental del sector minero en las regiones Junín, Pasco y Huánuco*”, presentada como Trabajo de Grado en la Universidad Nacional del Altiplano. El autor afirma en el resumen que “el método usado se basa en que una vez determinado el punto seleccionado se toma una muestra de agua, se evalúan in situ las condiciones ambientales de la zona y finalmente se evalúa y explica el resultado. Debido a las actividades mineras, la contaminación generada por los proyectos mineros debe ser LMP con contenido de plomo en algunas muestras de agua superior a 0,2 mg/l. De manera similar, el contenido de mercurio en algunas muestras excede el LMP (0.0020 mg/l). Por su parte, en muestras de sedimentos, el MPL de plomo es inferior a 46,7 mg/Kg. Si bien el mercurio en algunas muestras

supera la LMP de 0,15 mg/Kg, se puede inferir que el resultado supera la LMP, lo que tiene un impacto ambiental en los sectores antes mencionados, lo que significa contaminación ambiental en la zona”.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Variable Independiente: Monitoreo de Contaminantes

2.2.1.1. Definición de Monitoreo de contaminantes por medio de control estadístico de la calidad (CEC/CEP)

El monitoreo de contaminantes por medio de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) consiste en aplicar las herramientas y técnicas estadísticas que disponen los sistema de gestión de la calidad (SGC) y los sistemas de gestión ambiental (SGA) en la evaluación de los datos del monitoreo que se recopilan en los estudios de impacto ambiental (EIA), con el fin de mejorar la evaluación de los estudios y reducir los efectos de la contaminación ambiental (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2003).

2.2.1.2. Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC)

Un sistema de gestión de la calidad (SGC o QMS por sus siglas en inglés: quality management system) se conceptualiza como un sistema formal, donde el documento registra los procesos, procedimientos y responsabilidades para lograr políticas y objetivos de calidad. QMS ayuda a coordinar y guiar las actividades de la organización para cumplir con los requisitos regulatorios y de los clientes, y para mejorar continuamente su eficacia y eficiencia (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

ISO-9001 es una norma internacional que detalla los requisitos de un sistema de gestión de la calidad y es el enfoque más destacado del sistema de gestión de la calidad. Aunque algunas personas usan el término "QMS" para describir el estándar ISO 9001 o un grupo de documentos que detalla el QMS, en realidad

se refiere a todo el sistema. Estos documentos solo se utilizan para describir el sistema (<https://asq.org/>).

Los tres procesos principales de un sistema de gestión de la calidad incluyen:

- a) Procesos centrales, sus resultados e identificación de aspectos e impactos ambientales significativos
- b) Procesos de apoyo clave, como aquellos para mantener el conocimiento de los requisitos legales, garantizar la competencia de los empleados, proporcionar infraestructura, comunicar información de EMS y monitorear y evaluar el desempeño ambiental.
- c) Procesos de soporte del sistema de gestión, como control de documentos, control de registros y auditoría interna

La implementación de un sistema de gestión de la calidad afecta todos los aspectos del desempeño de una organización (<https://asq.org/>). Los beneficios de un sistema de gestión de la calidad (SGC) bien documentado incluyen:

- Cumplir con los requisitos del cliente, lo que ayuda a infundir confianza en la organización, lo que a su vez genera más clientes, más ventas y más negocios repetidos.
- Cumplir con los requisitos de la organización, lo que garantiza el cumplimiento de las regulaciones y la provisión de productos y servicios de la manera más rentable y rentable, creando espacio para la expansión, el crecimiento y las ganancias.

Los beneficios mencionados involucran también otras ventajas adicionales, que incluyen:

- Definición, mejora y control de procesos
- Reducir el desperdicio
- Previniendo errores
- Reducir costos
- Facilitar e identificar oportunidades de formación

- Involucrar al personal
- Establecer la dirección de toda la organización
- Comunicar una disposición para producir resultados consistentes

El control de calidad no se aplica solo a empresas u organizaciones que fabrican productos o bienes. Para algunas organizaciones de servicios (que no fabrican productos tangibles), el concepto de control de calidad puede resultar extraño porque no hay un producto tangible que inspeccionar y controlar. La función de garantía de calidad en una organización de servicios puede no incluir el control de calidad del servicio, pero puede incluir el control de calidad de cualquier producto involucrado en la prestación del servicio.

Un servicio puede incluir productos que son documentos (como un informe, contrato o diseño) o productos tangibles (como un coche de alquiler o análisis de laboratorio). Puede ser necesario controlar la calidad del producto en una organización de servicios para garantizar que el servicio cumpla con los requisitos del cliente (<https://asq.org/>).

2.2.1.3. Sistemas de Gestión Ambiental (SGA)

Un sistema de gestión ambiental (SGA o EMS por sus siglas en inglés: *enviromental management system*) reúne los recursos necesarios para la consecución de objetivos y requerimientos de la política de la organización, entre los cuales se incluyen reducir al mínimo los impactos ambientales negativos de sus productos, servicios y actividades y / o aumentar sus efectos positivos.

Es posible implementar un sistema de gestión ambiental (SGA) de conformidad con la norma ISO 14001, como parte de la estrategia de una organización para desarrollar su política ambiental y gestionar exitosamente las regulaciones gubernamentales.

Al igual que muchos sistemas de gestión de la calidad, los sistemas de gestión ambiental refuerzan la necesidad de alinear los procesos en sistemas

integrados de procesos, todos enfocados en proporcionar el mayor valor al cliente. En este sentido, el principal cliente del EMS es el entorno local, regional y global. Los clientes secundarios pueden incluir a los propietarios o accionistas de la organización, clientes, agencias gubernamentales y empleados (<https://asq.org/>).

Las ventajas de utilizar un sistema de gestión ambiental incluyen:

- Garantizar un enfoque holístico de los impactos ambientales
- Centrándose solo en aspectos y procesos críticos
- Hacer uso de enfoques maduros y probados en el tiempo reconocidos en todo el mundo
- Establecer relaciones positivas con los reguladores

Los beneficios económicos de implementar un buen sistema de gestión ambiental (SGA) que una organización puede esperar incluyen:

- Reputación e imagen corporativa
- Costos y tarifas más bajos relacionados con el medio ambiente
- Mayor acceso a nuevos clientes
- Ahorro directo a través de la reducción de fuentes ambientales

Además de los obvios beneficios cuantificables en la reducción de emisiones contaminantes y desechos, hay tres enfoques para medir las mejoras dentro de una organización:

- a) **Mejora del sistema de gestión:** Mejoras cualitativas y cuantitativas de los procesos de apoyo a la gestión, como la formación y concienciación de los empleados, los procesos de garantía del cumplimiento o los programas de acciones correctivas / preventivas.
- b) **Reputación organizacional:** Mejoras no cuantificables en la reputación de una organización o mejores relaciones con los organismos reguladores, organizaciones comunitarias u otras partes interesadas.

- c) **Beneficios financieros:** Ahorros cuantitativos de costos o evasión de costos asociados con cualquiera de las mejoras

Dado que la norma ISO 14001 no es prescriptiva, es importante comprender que un sistema de gestión ambiental es lo que cualquier organización hace. Si una organización no se da cuenta de los beneficios esperados de su sistema de gestión, un equipo de mejora debe identificar el nivel de madurez de la organización y tomar los pasos necesarios para pasar al siguiente nivel con el fin de alcanzar el máximo potencial del sistema de gestión ambiental (<https://asq.org/>).

2.2.1.4. Normas Homologadas de la Organización Internacional De Normalización (ISO) sobre Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC) y Sistemas de Gestión Ambiental (SGA)

A. Norma ISO-9001: 2015 sobre Sistemas de Gestión de la Calidad

La norma ISO-9001: 2015 es el estándar de sistema de gestión de calidad (SGC) de mayor reconocimiento y el más implementado a nivel mundial, que fue desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés). La norma ISO-9001:2015 especifica los requisitos de un SGC que las organizaciones pueden utilizar para desarrollar sus propios programas (<https://asq.org/>).

Otras normas asociadas con los sistemas de gestión de la calidad (SGC) incluyen todo el resto de la serie ISO-9000 (incluidas la ISO-9001 y la ISO-9004), la serie ISO-14000 (sistemas de gestión ambiental), la ISO-13485 (sistemas de gestión de la calidad para dispositivos médicos), la ISO-19011 (gestión de auditoría sistemas) y la ISO/TS-16949 (sistemas de gestión de calidad para productos relacionados con la automatización).

B. Norma ISO 14001: 2015 sobre Sistemas de Gestión Ambiental

La Organización Internacional de Normalización (ISO) desarrolló también una norma ISO-14001:2015, para detallar los requerimientos de un sistema de

gestión ambiental (SGA). DE acuerdo con la ISO, más de 300.000 organizaciones en 171 países han obtenido las certificaciones ISO-14001, incluidas más de 3.800 empresas en los Estados Unidos (<https://asq.org/>).

El objetivo de la norma ISO-14001 es especificar las exigencias generales y las pautas y procedimientos que deben seguirse para proveer una garantía razonable de que los resultados de la organización tendrán un impacto ambiental negativo mínimo y un mejor desempeño desde el punto de vista de preservación ambiental. Cabe destacar que la norma ISO-14001 no es prescriptiva; es decir, detalla lo que se debe hacer, pero no necesariamente cómo debe hacerse.

La norma ISO-14001 se desarrolla en torno al modelo de mejora planificar-hacer-verificar-actuar (PDCA, por sus siglas en inglés), un proceso iterativo que debe aplicarse con regularidad para garantizar que se obtengan los beneficios y se mantenga la norma ((<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>))

Los principales componentes operativos de un SGA ISO 14001 se pueden agrupar de la siguiente manera:

Planificar:

- Aspectos ambientales
- Requisitos legales y otros
- Objetivos, metas y programas

Hacer:

- Recursos, responsabilidades y autoridad
- Competencia, formación y conciencia
- Comunicación
- Documentación
- Control de documentos
- Control operacional
- Preparación y respuesta ante emergencias

Chequear o Verificar:

- Monitorear y medir
- Evaluar el cumplimiento
- No conformidad, acción correctiva y preventiva
- Control de registros
- Auditorías internas

Actuar:

- Revisión de gestión
- Auditoría ISO 14001

2.2.1.5. Pasos para implementar un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC)

Previamente a la implementación de un sistema de gestión de la calidad (SGC), es conveniente que la organización identifique y gestione varios procesos multifuncionales conectados para garantizar la posterior satisfacción del cliente. Los diseños de los SGC están influenciados por los diferentes objetivos, necesidades, productos y servicios que proporciona la organización. Este concepto se fundamenta en el ciclo planificar-hacer-verificar-actuar y permite la mejora continua (continuos ímprobamente o benchmarking) tanto de los productos resultantes como del sistema de gestión de la calidad (SGC). (<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>)

A continuación, se resumen los pasos necesarios para implementar un sistema de gestión de la calidad:

- Diseñar y Construir:** Las partes de diseño y construcción sirven para desarrollar la estructura de un SGC, sus procesos y planes para la implementación. La alta dirección debe supervisar esta parte para garantizar que las necesidades de la organización y las necesidades de sus clientes sean una fuerza impulsora detrás del desarrollo de sistemas.
- Desplegar:** La implementación se realiza mejor de manera granular dividiendo cada proceso en subprocesos y educando al personal sobre documentación, educación, herramientas de capacitación y métricas.

Las intranets de las empresas se utilizan cada vez más para ayudar en el despliegue de sistemas de gestión de la calidad.

- c) **Control y Medida:** El control y la medición son dos áreas del establecimiento de un SGC que se logran en gran medida mediante auditorías sistemáticas y de rutina del sistema de gestión de la calidad. Los detalles varían mucho de una organización a otra según el tamaño, el riesgo potencial y el impacto ambiental.
- d) **Revisar y Mejorar:** Revise y mejore en detalle cómo se manejan los resultados de una auditoría. Las metas son determinar la efectividad y eficiencia de cada proceso hacia sus objetivos, comunicar estos hallazgos a los empleados y desarrollar nuevas mejores prácticas y procesos basados en los datos recopilados durante la auditoría.

2.2.1.6. Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad

EL aseguramiento o garantía de calidad (QA por sus siglas en inglés: *quality asúrame*) y control de calidad (QC por sus siglas en inglés: *quality control*) son dos términos que a menudo se usan indistintamente (QA/QC). Aunque son similares, existen claras diferencias entre ambos. Aunque algunas actividades de inspección de calidad e inspección de calidad están interrelacionadas, las definiciones de las dos son diferentes. Generalmente, las actividades y responsabilidades de aseguramiento de la calidad cubren realmente todo el sistema de calidad de una forma u otra, y el aseguramiento de la calidad es un subconjunto de las actividades de aseguramiento de la calidad (<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>)

El aseguramiento de la calidad puede conceptualizarse como "una parte de la gestión de la calidad, que se centra en brindar confianza en el cumplimiento de los requisitos de calidad". La confianza que brinda el aseguramiento de la calidad es doble: internamente a los departamentos de gestión y externamente a los clientes, agencias gubernamentales, reguladores, certificadores y terceros. Adicionalmente, una definición alternativa pudiera ser que "todas las actividades planificadas y sistemáticas implementadas dentro del sistema de calidad que

pueden demostrarse para brindar confianza en que un producto o servicio cumplirá con los requisitos de calidad"

2.2.1.7. Mejora Continua

La mejora continua (*continuous improvement* o *benchmarking*) radica en la búsqueda del perfeccionamiento continuo de la calidad de los productos, servicios o procesos de la organización a través de mejoras incrementales a lo largo del tiempo, o una mejora revolucionaria o disruptiva de una sola vez. Dentro del modelo de mejora continua, las herramientas más utilizadas se encuentran en un método de garantía de calidad de cuatro pasos: el ciclo planificar-hacer-verificar-actuar ((<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>))

- **Planificar:** identificar una oportunidad y planificar el cambio.
- **Hacer:** implementar el cambio a pequeña escala.
- **Verificar:** Use datos para analizar los resultados del cambio y determinar si marcó una diferencia.
- **Actuar:** si el cambio fue exitoso, impleméntelo a una escala más amplia y evalúe continuamente sus resultados. Si el cambio no funcionó, comience el ciclo nuevamente.

Adicionalmente, existen otros métodos de mejora continua ampliamente utilizados, como el Six-Sigma y la gestión de calidad total (GCT), que resaltan la participación de los empleados y el trabajo en equipo, funcionan para medir y sistematizar procesos y reducir variaciones, defectos y tiempos de ciclo (<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>)

2.2.1.8. Inspecciones y Auditorías

Los sistemas formales de gestión han evolucionado para dirigir y controlar organizaciones. Existen sistemas de gestión de la calidad (SGC), así como

sistemas de gestión ambientales (SGA) y cada uno de estos sistemas puede ser auditado (<https://www.asqlatam.org/certificacion.html>)

La inspección es el proceso de medir, examinar y probar para medir una o más características de un producto o servicio y la comparación de estas con los requisitos especificados para determinar la conformidad. Los productos, procesos y otros resultados se pueden inspeccionar para asegurarse de que el objeto que sale de una línea de producción, o el servicio que se brinda, sea correcto y cumpla con las especificaciones.

La auditoría es parte de la función de aseguramiento de la calidad. Es importante garantizar la calidad porque se utiliza para comparar las condiciones reales con los requisitos y para informar esos resultados a la dirección. En relación a este punto, Mill (1988) menciona que la auditoría y la inspección no son intercambiables: “El auditor puede usar técnicas de inspección como una herramienta de evaluación, pero la auditoría no debe participar en la realización de cualquier actividad de verificación que conduzca a la aceptación o el rechazo real de un producto o servicio. Una auditoría debe estar involucrada con la evaluación del proceso y los controles que cubren las actividades de producción y verificación”.

2.2.1.9. Gestión de la Calidad Total (TQM)

La Gestión de la Calidad Total (TQM por sus siglas en inglés: total quality management) aborda la calidad organizacional desde los puntos de vista gerencial y filosófico. La Gestión de la Calidad Total (TQM) se enfoca en estándares de calidad impulsados por el cliente, liderazgo gerencial, mejora continua, calidad integrada en el diseño de productos y procesos, identificando problemas de calidad en el origen y haciendo que la calidad sea responsabilidad de todos (<http://www.oreilly.com/>)

Sin embargo, hablar de solucionar problemas de calidad no es suficiente. Necesitamos herramientas específicas que puedan ayudarnos a tomar las decisiones de calidad adecuadas. Estas herramientas provienen del campo de la estadística y se utilizan para ayudar a identificar problemas de calidad tanto en el proceso de producción como en el propio producto. En este sentido, para entender la filosofía de la Gestión de la Calidad Total (TQM) se deben entender los conceptos de control estadístico de procesos (CEP) y control estadístico de la calidad (CEC) (<http://www.oreilly.com/>).

Para algunos autores como Khadour (2010), el concepto de la Gestión de la Calidad Total (TQM) puede también aplicarse a la gestión ambiental, acuñando el concepto de Gestión Ambiental de la Calidad Total (TEQM, por sus siglas en inglés: total quality environmental management). El desarrollo de la Gestión Ambiental de la Calidad Total (TEQM) puede mejorar tanto el medio ambiente, la calidad, la sostenibilidad, la relación calidad-precio, y al mismo tiempo, reducir los riesgos de los contratistas. La Gestión Ambiental de la Calidad Total (TEQM) ha surgido en el sector manufacturero, integrando los Sistemas Gestión Ambiental (SGA) con el enfoque holístico de la Gestión de la Calidad Total (TQM).

2.2.1.10. Control de Procesos

El control de procesos es el cambio activo basado en los resultados del monitoreo del proceso. Una vez que las herramientas de seguimiento del proceso han detectado una situación fuera de control, la persona responsable del proceso realiza un cambio o intervención para volver a controlarlo. Son posibles dos tipos de intervención: una se basa en el juicio de ingeniería y la otra es automatizada (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

- 1. Control de procesos basado en el juicio de ingeniería (no automatizado):** Los planes de acción para procesos fuera de control detallan la acción a tomar una vez que se detecta una situación fuera de

control. Se puede proporcionar un diagrama de flujo específico, que guía al ingeniero de procesos a través del procedimiento correctivo, para cada proceso único.

2. **Control de procesos automatizado:** Los bucles de control de proceso avanzado son cambios automatizados en el proceso que están programados para corregir el tamaño de la medición fuera de control (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

2.2.1.11. Control Estadístico de Procesos (CEP)

El control estadístico de procesos (CEP o SPC por sus siglas en inglés: *statical process control*) se puede conceptualizar como el uso de técnicas estadísticas para controlar un proceso o método de producción. Las herramientas y procedimientos del control estadístico de procesos (CEP) permiten monitorear el comportamiento de los procesos de una organización, descubrir problemas en los sistemas internos y encontrar soluciones para los problemas de producción. El concepto de control estadístico de procesos (CEP) se usa frecuentemente y de manera intercambiable con el concepto de con el control estadístico de la calidad (CEC), por eso este proceso se abrevia indistintamente como CEP/CEC (<https://asq.org/>).

El control estadístico de procesos (CEP) se basa en una comparación de lo que está sucediendo hoy con lo que sucedió anteriormente. Tomamos una instantánea de cómo se desempeña normalmente el proceso o construimos un modelo de cómo creemos que se desempeñará el proceso y calculamos los límites de control para las medidas esperadas de la salida del proceso. Luego, recopilamos datos del proceso y comparamos los datos con los límites de control. La mayoría de las mediciones deben estar dentro de los límites de control. Las mediciones que quedan fuera de los límites de control se examinan para ver si pertenecen a la misma población que nuestra instantánea o modelo inicial (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

Dicho de otra manera, utilizamos datos históricos para calcular los límites de control iniciales. Luego, los datos se comparan con estos límites iniciales. Se investigan los puntos que caen fuera de los límites y, quizás, algunos serán descartados más tarde. De ser así, se volverían a calcular los límites y se repetiría el proceso. Esto se conoce como Fase I. El monitoreo del proceso en tiempo real, utilizando los límites calculados en la Fase I, constituye la Fase II (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

El análisis estadístico es una parte clave del control de procesos porque es crucial para determinar la variación aleatoria y se puede controlar la variación no aleatoria. Cualquiera que desee implementar un control estadístico de procesos (CEP) debe comprender la estadística elemental, el diseño experimental y las técnicas de muestreo. Cuando se utiliza el análisis estadístico, el supuesto subyacente es que toda la variación es aleatoria (Bajpai, 2018).

Gran parte del poder del control estadístico de procesos (CEP) radica en su capacidad para monitorear tanto el centro de proceso como su variación sobre ese centro. Al recopilar datos de muestras en varios puntos temporales y espaciales dentro de los procesos, es posible identificar y corregir desviaciones en los mismos, que pueden afectar la calidad de los productos o servicios finales, minimizando así el desperdicio y la probabilidad de que los productos con problemas o defectos lleguen a los clientes. Las reducciones del tiempo de ciclo del proceso, junto con las mejoras en el rendimiento, han hecho del control estadístico del proceso una herramienta valiosa tanto del punto de vista de la reducción de costos como de la satisfacción del cliente (Zhang, 2010).

Debido a su enfoque en la detección temprana y la prevención de problemas, el control estadístico de procesos (CEP) tiene una clara ventaja sobre otros métodos de control de calidad, como la inspección, que aplican recursos para detectar y corregir problemas en el producto o servicio final. Además de reducir el desperdicio, el control estadístico de procesos (CEP) puede conducir a una reducción en el tiempo necesario para producir el producto o servicio de un extremo a otro. Esto se debe en parte a que es menos probable que el producto final necesite reprocesarse, pero también resulta del uso de datos estadísticos

de control de procesos para identificar cuellos de botella, tiempos de espera y otras fuentes de retrasos dentro del proceso (Zhang, 2010).

La superioridad de control estadístico de procesos (CEP) sobre otras herramientas de gestión de la calidad total (GCT) como la inspección, radica en que enfatiza la detección temprana y la prevención de problemas, en lugar de la corrección de problemas después de que han ocurrido (Kiran, 2017).

2.2.1.12. Control Estadístico de la Calidad (CEC)

El control estadístico de la calidad (CEC o SQC por sus siglas en inglés: statistical quality control) es el término utilizado para describir el conjunto de herramientas estadísticas utilizadas por los profesionales de la calidad para evaluar la calidad organizacional (<http://www.oreilly.com/>).

El control estadístico de calidad (CEC) puede conceptualizarse como una técnica donde se aplican 14 herramientas de análisis estadístico (7-QC y 7-SUPP) para monitorear y controlar los resultados de procesos (variables dependientes). Mientras que el control estadístico de procesos (CEP) consiste en la aplicación de las mismas 14 herramientas con el fin de controlar las entradas de los procesos (variables independientes) (<https://asq.org/>).

El objetivo del control estadístico de calidad (CEC) es garantizar, de manera rentable, que el producto enviado a los clientes cumpla con sus especificaciones. Inspeccionar cada producto es costoso e ineficiente, pero las consecuencias de enviar un producto no conforme pueden ser significativas en términos de insatisfacción del cliente. El control estadístico de calidad (CEC) es el proceso de inspeccionar suficiente producto de lotes dados para asegurar probabilísticamente un nivel de calidad especificado (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

El Comité de Adjudicación de los Premios de Aplicación Deming definió el control estadístico de calidad (CEC) como "la actividad integrada de diseñar,

fabricar y suministrar los productos y servicios manufacturados con la calidad exigida por el cliente a un costo económico". El comité también agregó que "el principio de orientación al cliente es la base, además de prestar especial atención al bienestar público. El objetivo de la empresa debe ser tener éxito mediante la repetición de la planificación, ejecución, evaluación y acción correctiva aplicando los conceptos estadísticos de actividades de relevamiento, investigación, diseño, aprovisionamiento, fabricación, inspección, ventas, etc., tanto dentro como fuera de la empresa" (Kiran, 2017).

2.2.1.13. Reseña Histórica del Control Estadístico de Procesos (CEP) y el Control Estadístico de la Calidad (CEC)

El control de calidad ha estado con nosotros durante mucho tiempo. Es seguro decir que cuando comenzó la fabricación y la competencia acompañó a la fabricación, los consumidores compararían y elegirían el producto más atractivo (salvo un monopolio, por supuesto). Si el fabricante A descubrió que las ganancias del fabricante B se dispararon, el primero intentó mejorar sus ofertas, probablemente mejorando la calidad de la producción y / o bajando el precio. La mejora de la calidad no se limitó necesariamente al producto, sino que también incluyó el proceso utilizado para fabricar el producto (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

La historia del control de la calidad se remonta a siglos atrás, cuando los artesanos comenzaron a organizarse en sindicatos llamados gremios. Cuando llegó la Revolución Industrial, los primeros sistemas de gestión de la calidad se utilizaron como estándares que controlaban los resultados de los productos y procesos. A medida que más personas tenían que trabajar juntas para producir resultados y aumentaban las cantidades de producción, se necesitaban las mejores prácticas para garantizar resultados de calidad (<https://asq.org/>).

Este proceso primitivo de control **fue** tenido en alta estima, como lo manifestaron los gremios medievales de la Edad Media. Estos gremios exigían largos períodos de formación para los aprendices, y aquellos que aspiraban a

convertirse en maestros artesanos tenían que demostrar su capacidad. Dichos procedimientos estaban, en general, dirigidos al mantenimiento y mejora de la calidad del proceso (e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov>).

Finalmente, se establecieron y documentaron las mejores prácticas para controlar los resultados de los productos y procesos. Estas mejores prácticas documentadas se convirtieron en prácticas estándar para los sistemas de gestión de la calidad. En los tiempos modernos contamos con sociedades profesionales, organismos reguladores gubernamentales como la Administración de Alimentos y Medicamentos, inspección de fábricas, etc., orientados a asegurar la calidad de los productos vendidos a los consumidores. El control de calidad tiene, por tanto, una larga historia (<https://asq.org/>).

La ciencia de la estadística ha sido estudiada y aplicada desde hace muchos años, sin embargo, el control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) es relativamente nuevo. La ciencia de la estadística se remonta a dos o tres siglos. Y sus mayores desarrollos se han producido durante el siglo XX. Las aplicaciones anteriores se realizaron en astronomía y física y en ciencias biológicas y sociales (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

La invención del análisis estadístico para el control de procesos puede atribuirse a W. Gosset (1908). Publicó su trabajo en 1908 bajo el seudónimo de Student, porque conocía la importancia de la estadística para controlar los procesos, y no quería que sus competidores supieran que estaba usando esta herramienta. Descubrió la distribución de una población distribuida normalmente, que se define como distribución de Student. La prueba se utiliza para hacer inferencias sobre los valores medios de las poblaciones basándose en las mediciones de un número relativamente pequeño de muestras. Las variables de proceso se entienden vagamente como cualidades de las materias primas, variables importantes en el proceso mismo y cualidades del producto (Bajpai, 2018).

No fue hasta la década de 1920 que la teoría estadística comenzó a aplicarse de manera efectiva al control de calidad como resultado del desarrollo de la teoría del muestreo (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

El concepto de control de calidad en la fabricación fue propuesto por primera vez por Walter Shewhart (*Bell Telephone Laboratories*), el cual fue el primero en aplicar los métodos estadísticos al problema del control de calidad (SQC). Shewhart emitió un memorando el 16 de mayo de 1924 que incluía un boceto de un gráfico de control moderno. Shewhart siguió mejorando y trabajando en este esquema, y en 1931 publicó un libro sobre control estadístico de calidad, "*Economic Control of Quality of Manufactured Product*", publicado por Van Nostrand en Nueva York. Este libro marcó la pauta para las aplicaciones posteriores de métodos estadísticos para el control de procesos. (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

El Dr. Shewhart identificó dos fuentes principales de la variación en los procesos: la variación aleatoria que es inherente al proceso y estable en el tiempo, y la variación assignable o incontrolada, que es inestable en el tiempo, resultado de la ocurrencia de eventos específicos fuera del sistema. Basado en la experiencia con muchos tipos de datos de diferentes procesos, y respaldado por las leyes de la estadística y la probabilidad, el Dr. Shewhart diseñó gráficos de control que se utilizan para trazar datos a lo largo del tiempo e identificar tanto la variación de causa común como la variación de causa especial (<https://www.moresteam.com/>).

El control de calidad se volvió cada vez más importante durante la Segunda Guerra Mundial (1942-1945), implementado inicialmente por el Ejército de los Estados Unidos para asegurar la calidad de las municiones y otros productos estratégicamente importantes mediante el uso de cartas de control. Las fuerzas armadas inicialmente inspeccionaron virtualmente cada unidad de producto. Con el propósito de simplificar el proceso de producción y evaluación sin sacrificar la seguridad, el ejército estadounidense comenzó a utilizar técnicas de muestreo de calidad para la inspección, con la ayuda de la publicación de estándares de

control y cursos de capacitación en las técnicas de control de procesos estadísticos de Walter Shewhart (<https://asq.org/>).

La importancia del control de la calidad creció después de la guerra. Sin embargo, fue ignorado en Estados Unidos durante muchos años. Al contrario, los japoneses disfrutaron de una revolución de la calidad, mejorando su reputación de exportaciones de mala calidad al aceptar plenamente la opinión de pensadores estadounidenses como Joseph Juran y Edwards Deming y cambiar el enfoque de la inspección a la mejora de todos los procesos de la organización a través de las personas que los usaban. La implementación de los conceptos de Juran y Deming ayudaron a Japón a convertirse en el líder mundial en calidad (Berk, 2000). En la década de 1970, los sectores industriales estadounidenses, como la electrónica y el automóvil, habían sido superados por la competencia de alta calidad de Japón (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

Los conceptos del Shewhart fueron ampliados por Deming, quien introdujo una adopción temprana y exitosa por parte de las empresas japonesas. Organizaciones de todo el mundo han incorporado el control estadístico de procesos como una herramienta principal para mejorar la calidad del producto al reducir la variación del proceso. Deming volvió a etiquetar la variación aleatoria como variación de causa común y la variación assignable como variación de causa especial (<https://www.moresteam.com/>).

Otros dos estadísticos de Bell Labs, Harold Dodge y Harry Romig lideraron los proyectos que lograron aplicar la teoría estadística a la inspección por muestreo. Estos 2 investigadores idearon un sistema de control conocido como Tablas de Control Dodge-Romig. Este sistema consiste en un juego de tablas de inspección para la aceptación de productos por lote mediante el muestreo de atributos. Las tablas mencionadas se fundamentan en los conceptos de nivel de calidad límite (NCL) y de límite de la calidad promedio de salida (LCPS). En este sistema, no hay tablas para el muestreo múltiple (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

El trabajo de estos cinco pioneros (Gosset, Shewhart, Deming Dodge y Romig) constituye gran parte de lo que hoy comprende la teoría de la calidad y el control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC).

Estados Unidos volvió a adoptar el control de procesos estadísticos en la década de 1980 para ayudar en la búsqueda de la mejora continua (Berk, 2000). La réplica estadounidense a la revolución de la calidad de Japón dio como resultado el desarrollo de la gestión de calidad total (TQM), un método para el control de la calidad que se enfatiza no solo las estadísticas, sino en enfoques que abarcaban a toda la organización (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

A fines del siglo XX, organizaciones independientes comenzaron a producir estándares para ayudar en la creación e implementación de sistemas de gestión de la calidad (SGC). Es en esta época cuando la frase gestión de la calidad total (TQM) debido a la multitud de sistemas únicos que se pueden aplicar (<https://asq.org/>).

A principios del siglo XXI, los sistemas de gestión de la calidad (SGC) empezaron a fusionarse con los conceptos de sustentabilidad y transparencia, debido a que estos temas se tornaron cada vez más importantes para la satisfacción de los consumidores. En este sentido, los regímenes de auditoría se ocupan tanto de la calidad como de la sustentabilidad y su integración en las organizaciones (<https://asq.org/>).

Muchas técnicas de control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) han sido adoptadas por organizaciones de todo el mundo en los últimos años, especialmente como un componente de iniciativas de mejora de la calidad como Six-Sigma. El uso generalizado de procedimientos de gráficos de control se ha visto favorecido en gran medida por paquetes de software estadístico y sofisticados sistemas de recopilación de datos (<https://asq.org/>).

El desarrollo del control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) está ligado con el desarrollo del análisis exploratorio de datos (EDA). El trabajo fundamental en EDA es Exploratory Data Analysis, Tukey, (1977). A lo largo de los años, se ha beneficiado de otras publicaciones destacadas y ha ganado un

gran número de seguidores como la mejor forma de realizar el análisis estadístico de un conjunto de datos (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>).

2.2.1.14. Reseña Histórica de los Sistemas de Gestión Ambiental

Los enfoques de la calidad habitualmente han mantenido un enfoque estructurado en los asuntos comerciales y de los clientes, como reducir los defectos y desperdicios de los procesos o cadenas de producción, y mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la satisfacción de los clientes.

La inclusión de los objetivos de gestión y sostenibilidad ambiental en las iniciativas de calidad son relativamente recientes. Debido a que el mundo empresarial está acostumbrado a tratar las prácticas ambientales como fuentes de costos adicionales, el desafío para los profesionales de la calidad es identificar cuáles de estos problemas de calidad ambiental y de sostenibilidad, como la reducción de desechos y el uso de energía renovable, también sirven a los intereses comerciales y de los clientes (<https://asq.org/>).

Las características de cada etapa en la evolución de la gestión del cumplimiento hacia la sostenibilidad:

- **De 1990 a 1994:** La gestión del cumplimiento (CM) significó centrarse en la regulación y depender de los departamentos ambientales para reaccionar ante los problemas.
- **De 1994 a 1998:** Los sistemas de gestión ambiental (EMS) trajeron un enfoque más sistemático de toda la organización sobre los problemas ambientales.
- **De 1998 a 2002:** Los sistemas de gestión de información ambiental (EIMS) implican el uso de sistemas basados en la web y la integración de múltiples sistemas.

- **De 2002 a 2006:** los sistemas de gestión de procesos medioambientales (EPMS) utilizan herramientas de calidad y utilizan un enfoque de proyecto para impulsar mejoras.
- **De 2006 hasta la actualidad:** la sostenibilidad requiere la integración de objetivos ambientales, sociales y económicos y el uso de las mejores prácticas para abordar el riesgo y la incertidumbre (<https://asq.org/>).

2.2.1.16. Relación entre el Control Estadístico de Procesos (CEP) y el Control Estadístico de la Calidad (CEC)

Desde los inicios de la gestión de la calidad total (GCT) siempre ha existido cierta confusión entre el control estadístico de procesos (CEP) y el control estadístico de la calidad (CEC). La similitud entre ambos es de perspectiva y propósito común. La diferencia es de estrategia.

El control estadístico de calidad (CEC) se puede conceptualizar como una técnica donde se aplican 14 herramientas de análisis estadístico (7-QC y 7-SUPP) para monitorear y controlar los resultados de procesos (variables dependientes). Mientras que el control estadístico de procesos (CEP) consiste en la aplicación de las mismas 14 herramientas con el fin de controlar las entradas de los procesos (variables independientes). Aunque ambos términos se usan a menudo indistintamente, el control estadístico de la calidad (CEC) incluye muestreo de aceptación, mientras que el control estadístico de procesos (CEP) no lo hace (<https://asq.org/>).

Las actividades que monitorean un proceso en tiempo real para evitar defectos mientras se fabrica un lote se conocen como controles estadísticos de procesos (CEP), y se basan en el control por retroalimentación (*feedback control*). Por el contrario, las actividades que ocurren después de la fabricación para evitar que los defectos lleguen a los clientes, usuarios o consumidores mediante una inspección adicional constituyen el control estadístico de calidad (CEC) y se basa en el control de alimentación hacia adelante (*feed forward control*) (Orlo, 2020).

2.2.1.17. Herramientas del Control Estadístico de la Calidad (CEC) y del Control Estadístico de Procesos (CEP)

En el control estadístico de la calidad (CEC) y el control estadístico de procesos (CEP), la recopilación y análisis de datos de procesos y productos son la base sobre la cual se toman decisiones y acciones. Por lo tanto, se deben emplear herramientas y técnicas para registrar los datos (Scalling, 2003).

Se pueden utilizar varias técnicas para investigar el producto en busca de defectos o piezas defectuosas después de que se complete todo el procesamiento (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: <http://www.itl.nist.gov>). En términos generales, las herramientas típicas del control estadístico de la calidad (CEC) y el control estadístico de procesos (CEP) son las siguientes:

- Planes de muestreo de aceptación de lotes
- Saltar planes de muestreo de lotes
- Planes de muestreo estándar (e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov>)

Las 7 herramientas básicas del control de la calidad (7-QC)

Ishikawa (1976) reunió una colección de herramientas de mejora de procesos en su texto “Guía para el Control de Calidad” (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>). Conocidas en todo el mundo como las siete herramientas estadísticas básicas de control de calidad (7-QC), son las siguientes:

1. Hojas de Verificación o Chequeo
2. Diagramas de Causa y Efecto
3. Histogramas
4. Diagramas de Pareto
5. Diagramas de Dispersión
6. Gráficos de Control

- Gráficos de Control Clásicos de Shewhart,
- Gráficos de Suma Acumulada (CUSUM)
- Gráficos de Promedios Móviles Ponderados Exponencial (EWMA)
- Gráficos de Control Multivariante

7. Análisis de Estratificación

Las 7 herramientas complementarias del control de la calidad (7-supp) (<https://asq.org/>).

Además de las herramientas básicas de control de calidad (7-QC), también hay algunas herramientas estadísticas de control de calidad adicionales, conocidas como las siete herramientas complementarias (7-SUPP):

1. Diagramas de Flujo de Procesos
2. Mapas de Defectos
3. Registros de Eventos
4. Centros de Progreso
5. Aleatorización
6. Muestreo
7. Jerarquización de la Información

A continuación, se efectúa la descripción de las principales herramientas:

Hojas de Verificación o Chequeo: Es una herramienta básica que se utiliza para recopilar datos de proceso en forma de contar el número de ocurrencias de un evento específico, es decir, ¿con qué frecuencia ocurre un evento? Por ejemplo, al procesar una pieza en particular, pueden ocurrir distintos tipos posibles de fallas (Scallan, 2003). Estas son herramientas genéricas que se puede adaptar para una amplia variedad de propósitos, la hoja de verificación es un formulario estructurado y preparado para recopilar y analizar datos (<https://asq.org/>).

Histogramas: Los histogramas son los gráficos más utilizados para mostrar distribuciones de frecuencia o con qué frecuencia ocurre cada valor diferente en un conjunto de datos (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>). Se utilizan para

mostrar simplemente los datos recopilados en la hoja de verificación o chequeo, en forma de imágenes. La ventaja del histograma es que cualquier patrón de desarrollo puede verse de un vistazo (Scallan, 2003).

Diagrama de Pareto: Un diagrama de Pareto es un gráfico donde las longitudes de las barras representan la frecuencia del fenómeno que se está analizando (puede ser tiempo, dinero, concentración de algún compuesto y/o elemento) y están configurados con las barras más largas a la izquierda y las barras más cortas a la derecha. De esta manera, el gráfico muestra visualmente qué situaciones o atributos son más significativas. También es denominado análisis de Pareto, gráfico de Pareto ponderado o gráfico de Pareto comparativo (<https://asq.org/>).

Estos diagramas tienen como principio la ley 80-20, planteada por primera vez por el economista Wilfredo Pareto, quien observó en Italia que la distribución de la riqueza obedecía aproximadamente una proporción 80-20 (el 80% de la riqueza es controlada por el 20% de la población). Posteriormente fue el ingeniero y consultor en calidad Joseph Juran, quien notó que el principio de Pareto o ley 80-20 podía ser aplicado a la gestión de la calidad, ya que se ha observado que aproximadamente el 80% de los defectos o fallas provienen del 20% de las causas. Esto permite identificar los problemas principales y optimizar las mejoras con el menor esfuerzo (Scallan, 2003).

Diagramas de Causa y Efecto: A menudo denominados diagrama de Ishikawa, diagrama de espina de pescado, diagrama de defectos o diagrama de resultados esperados, se utilizan para intercambiar ideas sobre las posibles causas de una falla o defecto en particular. El punto de partida para la mayoría de los diagramas de causa y efecto son las "cuatro M" de mano de obra, máquinas, métodos y materiales (Scallan, 2003). El diagrama de espina de pescado permite identificar varias causas posibles de un mismo efecto o problema. Estos diagramas se pueden utilizar para estructurar una sesión de lluvia de ideas (brain-storm) y para clasificar las ideas en categorías útiles.

Diagramas de Dispersión: Se utilizan para identificar la relación entre dos conjuntos de datos (Scallan, 2003). También llamado: diagrama de correlación o gráfico XY. En el diagrama de dispersión grafica pares de datos numéricos, con una variable en cada eje, para buscar una relación entre ellos. Si las variables están correlacionadas, los puntos caerán a lo largo de una línea recta (correlación lineal) o curva (correlación no lineal). Cuanto mejor sea la correlación, más estrechos serán los puntos que abrazarán dicha línea (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

Análisis de Estratificación: Es una técnica que separa los datos recopilados de una variedad de fuentes para que se puedan ver los patrones. La estratificación se define como el acto de clasificar datos, personas y objetos en distintos grupos o capas. Es una técnica que se utiliza en combinación con otras herramientas de análisis de datos. Cuando los datos de una variedad de fuentes o categorías se han agrupado, el significado de los datos puede ser difícil de ver. Esta técnica de recopilación y análisis de datos separa los datos para que se puedan ver los patrones. También puede utilizarse en diagramas de dispersión. Al trazar o graficar los datos recopilados en un diagrama de dispersión, gráfico de control, histograma u otra herramienta de análisis, se pueden utilizar diferentes marcas o colores para distinguir los datos de varias fuentes. Se dice que los datos que se distinguen de esta manera están "estratificados". Los subconjuntos de datos estratificados pueden de esta manera ser analizados por separado (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

Gráficos de Control: Una herramienta popular en el control estadístico de la calidad (CEC) y el control estadístico de procesos (CEP) es el gráfico de control, desarrollado originalmente por Walter Shewhart en la década de 1920, por eso, también se conocen como gráficos de Shewhart. Un gráfico de control ayuda a registrar datos y le permite ver cuándo ocurre un evento inusual, como una observación muy alta o baja en comparación con el rendimiento promedio (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>).

Los gráficos de control son una representación gráfica del estado de control de un proceso (Scallan, 2003). Se utiliza para estudiar cómo cambia un proceso

con el tiempo. Los datos se representan en orden de tiempo. La comparación de los datos actuales con los límites de control históricos conduce a conclusiones sobre si la variación del proceso es consistente (bajo control) o impredecible (fuera de control) afectada por causas especiales de variación (Página Web de ASQ: <https://asq.org/>). El desempeño del proceso se traza en los gráficos de control para determinar su estado actual y evaluar si se requiere alguna acción (Scallan, 2003).

El gráfico de control consta de una línea central (LC) que indica el valor promedio de las características y dos límites de control a cada lado de la línea central que se denominan límite de control superior (LS) y límite de control inferior (LI). Los límites de control se determinan a partir de datos históricos y a partir de la distribución de probabilidad (Mazumder, 2012). Un caso específico del gráfico de control son los gráficos de Levey-Jennings, donde la línea central (LC) corresponde a la mediana (M) de los valores puntuales de las muestras, se calcula la desviación estándar (σ) de los valores puntuales de las muestras, con el cual se establecen los límites de control, correspondiendo el límite de control superior (LS) al valor $+3\sigma$ y el límite de control inferior (LI) al valor -3σ .

Los gráficos de control intentan distinguir entre dos tipos de variación del proceso que se está analizando:

- a) Variación de causa común, que es intrínseca al proceso y siempre estará presente
- b) Variación de causa especial, que proviene de fuentes externas e indica que el proceso está fuera de control estadístico

Varias pruebas pueden ayudar a determinar cuándo ha ocurrido un evento fuera de control. Sin embargo, a medida que se emplean más pruebas, también aumenta la probabilidad de una falsa alarma.

Por otro lado, en los gráficos de suma acumulada (CUSUM) la ordenada de cada punto trazado representa la suma algebraica de la ordenada anterior y las desviaciones más recientes del objetivo. A su vez, en los gráficos de promedios

móviles ponderados exponencialmente (EWMA) cada punto del gráfico representa el promedio ponderado de los valores actuales y de todos los subgrupos anteriores, lo que da más peso al historial del proceso reciente y disminuye el peso para los datos más antiguos (<https://asq.org/>).

Diagramas de Flujo de Procesos: Los diagramas de flujo de procesos se utilizan para enumerar cada paso involucrado en la fabricación de un producto. Por lo tanto, documentan lo que se hace durante el procesamiento. Relacionan la planificación de procesos y las funciones de ingeniería industrial e ingeniería de calidad (Scallan, 2003).

Un diagrama de flujo o flujograma consiste en una imagen estructurada de los pasos de un proceso en orden secuencial. Es una herramienta genérica que se puede adaptar para una amplia variedad de propósitos, es decir, se puede utilizar para describir varios tipos procesos, como un proceso de fabricación, un proceso administrativo, un servicio o un plan de proyecto. También es llamado: flujograma, diagrama de procesos o mapa de procesos.

Los elementos que generalmente se incluyen en un diagrama de flujo o flujograma son una secuencia de acciones, materiales o servicios que entran o salen de un proceso (entradas y salidas), decisiones que deben tomarse, personas que se involucran en cada actividad o tarea, tiempo involucrado de cada actividad o tarea y mediciones del proceso. (<https://asq.org/>).

2.2.1.18. Análisis de la Capacidad de un Proceso

A. Índice de Capacidad “Cp”

El índice de capacidad del proceso “Cp” es una función adimensional de los parámetros del proceso (M , σ) y de los límites de especificación del proceso (LS, LI), desarrollados para proporcionar un lenguaje común y de fácil entendimiento para la calificación del desempeño del proceso (Hernández y Da Silva, 2015). Recordemos que de los gráficos de control tenemos:

VN = Valor nominal del proceso

M = media del proceso

σ = desviación estándar del proceso

LS = límite de especificación superior del proceso

LI = límite de especificación inferior del proceso

El índice de capacidad “Cp” mide la dispersión permitida del proceso por la medida de la dispersión real del proceso.

$$Cp = \frac{\text{Dispersión Permitida del Proceso}}{\text{Dispersión Real del Proceso}} = \frac{LS - LI}{6\sigma}$$

La dispersión real del proceso generalmente se asume de 6σ (entre +3 y -3), lo que representa en la teoría normal, la anchura del intervalo que contiene el 99,73 % de la población. La dispersión permitida del proceso representa el intervalo entre los dos límites de especificación (LS y LI), es decir, es especificada y fija, mientras que la dispersión real del proceso debe ser estimada con los valores puntuales (productos) que se obtienen del proceso.

B. Índice de Capacidad “Cpk”

Como el índice “Cp” mide la dispersión del proceso con relación a los límites de especificación sin contar con la localización media del proceso, es posible que con un valor de “Cp” alto se tengan productos fuera de la especificación, debido a que la media (M) del proceso está suficientemente próxima a los límites de especificación. Por eso fue introducido el índice “Cpk”, que toma en cuenta la variabilidad del proceso y su ubicación con relación a los límites. El índice “Cpk”, por tanto, determina la distancia entre la media del proceso y el límite de especificación más próximo.

Se presentan dos formas equivalentes para el índice “Cpk”. La primera fórmula considera los límites de especificación superior e inferior separadamente (Ecuaciones 1A y 1B). La segunda fórmula utiliza la desviación de la media del proceso.

Considerando el caso de especificación superior se tiene:

$$Cpks = \frac{LS - M}{3\sigma}$$

Análogamente para procesos con especificación inferior se tiene:

$$Cpki = \frac{M - LI}{3\sigma} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Y para el caso de especificaciones bilaterales se tiene La relación entre el Cp y el Cpk es definida por:

$$Cpk = (1 - k)Cp \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$k = \frac{2(VN - M)}{LS - LI}$$

La evaluación del proceso a través del uso del Cpk se hace de la siguiente manera:

Si $Cpk > 2,00$ se está ante un proceso excelente, altamente confiable.

Si $1,33 < Cpk < 2,00$ se está ante un proceso capaz, relativamente confiable.

Si $1,00 < Cpk < 1,33$ se está ante un proceso relativamente incapaz, poco confiable.

Si $0 < Cpk < 1,00$ se está ante un proceso incapaz, pudiendo tener producción defectuosa.

Si $Cpk < 0$ se está ante un proceso totalmente incapaz, sin condiciones de mantener las especificaciones.

Por otro lado “k” representa desviación de la media del proceso (M).

Si $k = 0$ la media del proceso coincide con el valor central.

Si $k = 1$ la media del proceso está localizada en uno de los límites de especificación.

Si $0 < k < 1$ el valor central coincide con el punto medio de los límites de especificación.

Siempre resulta de utilidad comparar los parámetros “Cp” y “Cpk” para cada proceso. Si el proceso posee un bajo “Cpk”, entonces el índice “Cp” debe ser verificado para determinar si la variabilidad es muy alta. Si “Cp” está próximo al valor de “Cpk”, entonces la operación del proceso no representa un problema. El índice “Cpk” va a ser similar al “Cp” cuando la media (M) del proceso se ubique en el punto medio de las especificaciones. Si el proceso no está centrado entonces el valor del índice de “Cpk” será menor que el “Cp” (Hernández y Da Silva, 2015).

2.2.1.19. El Costo versus el Beneficio del Control Estadístico de Procesos (CEP) y de la Calidad (CEC)

Si bien el costo de recursos inicial del control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) puede ser sustancial, el retorno de la inversión obtenido de la información y el conocimiento que crea la herramienta demuestra ser una actividad exitosa una y otra vez. Esta herramienta requiere una gran cantidad de coordinación y, si se realiza con éxito, puede mejorar en gran medida la capacidad de los procesos para ser controlados y analizados durante los proyectos de mejora de procesos (<https://www.moresteam.com/>)

El costo de la garantía de calidad durante todo el proceso de fabricación es una consideración importante. Con muy poca garantía de calidad, se producirán altos costos porque habrá una alta tasa de rechazo al final. La cantidad de control de calidad practicado depende del uso previsto del producto. Los transistores para radios de consumo no se fabricarán con las mismas especificaciones estrictas que los componentes electrónicos diseñados para satélites espaciales, por lo que el nivel de control de calidad es apropiadamente diferente en estos dos productos (Bajpai, 2018).

Las invenciones y los nuevos procesos cambian drásticamente el panorama del control de calidad. Las computadoras y las redes de computadoras ahora hacen que muchos aspectos del control de calidad sean esencialmente automáticos para el trabajador de producción. Los datos son recopilados

continuamente por sensores, enviados a computadoras, graficados y presentados a los operadores. Las tendencias recientes, las advertencias de las variables del proceso que se salen de un rango especificado y otra información se brindan continuamente. Esto permite a los operadores ver un problema potencial mucho antes de que la calidad del producto se vea seriamente afectada. Estos sistemas automáticos también ahorran dinero al no requerir mucho tiempo del operador (Bajpai, 2018).

2.2.1.20. Tendencias Futuras del Control Estadístico de Procesos (CEP) y de la Calidad (CEC)

El control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) se han convertido en una de las herramientas más utilizadas para mantener niveles aceptables y estables de calidad en la fabricación moderna. El moderno entorno de manufactura se centra en la fabricación integrada por computadora y los desafíos radican en el desarrollo de algoritmos informáticos avanzados y automatización de procesos para implementar las tareas de control estadístico de procesos (CEP) y de la calidad (CEC) (Vedpal, 2013).

Actualmente, la atención se centra en los métodos de control de procesos unitarios, desarrollo y transferencia de procesos unitarios y mejoras en los métodos para garantizar la funcionalidad y confiabilidad de los componentes. Se está trabajando mucho en el proceso de predicción y la mejora de los parámetros y el rendimiento del producto. Se han desarrollado nuevos métodos que ayudan en la mejora de procesos, como la metrología virtual, incorporando la mejora de la densidad de control y la reducción de las operaciones de medición. Los modelos para la visualización y el análisis de datos están en progreso y aún se deben desarrollar modelos más efectivos relacionados con la mejora de procesos (Vedpal, 2013).

El mundo de la fabricación moderna exige métodos más precisos y exactos para satisfacer las expectativas industriales. Los métodos avanzados de control de procesos siempre son necesarios en una variedad de aplicaciones. Por lo tanto, los investigadores están desarrollando métodos más sofisticados de

diagnóstico de fallas. La implementación e integración de sensores con máquinas controladas numéricamente se están desarrollando rápidamente. Inversión en tecnología de sensores que proporciona información en tiempo real para computadoras modernas integradas está aumentando y se están realizando más investigaciones para satisfacer los requisitos de las industrias de todo el mundo (Vedpal, 2013).

Los avances tecnológicos de la última década han dado lugar a una nueva revolución industrial a la que a menudo se hace referencia como la cuarta revolución industrial o Industria 4.0. Es una revolución impulsada por el crecimiento exponencial de las tecnologías disruptivas y los cambios que esas tecnologías están trayendo al lugar de trabajo, la fuerza laboral y los mercados a los que sirven las organizaciones. En este sentido, la calidad 4.0 es un término que hace referencia al futuro de la calidad y la excelencia organizacional en el contexto de la Industria 4.0.

Los profesionales del campo de la calidad pueden desempeñar un papel fundamental en el liderazgo de sus organizaciones para que apliquen disciplinas de calidad comprobada, por medio de tecnologías nuevas, digitales y disruptivas. Alcanzar la excelencia a través de la calidad es abrazar el futuro de la calidad. Resulta imprescindible que los profesionales de la calidad ayuden a sus organizaciones a establecer una conexión vital entre la excelencia en la calidad y la capacidad para progresar en la innovación, utilizando fundamentos de calidad que permitan la transformación y el crecimiento (Vedpal, 2013).

2.2.2. Variable Dependiente: Estudios de Impacto Ambiental

2.2.2.1. Definición de Estudios de Impacto Ambiental (EIA)

Los estudios o evaluaciones de impacto ambiental (EIA) son herramientas de los sistemas de gestión ambiental (SGA) que forma parte de la aprobación y toma de decisiones de los proyectos. Las evaluaciones ambientales pueden regirse por reglas de procedimiento administrativo con respecto a la participación

pública y la documentación de la toma de decisiones, y pueden estar sujetas a revisión judicial. El propósito de la evaluación es asegurar que los tomadores de decisiones consideren los impactos ambientales al decidir si continuar o no con un proyecto (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2003).

Los EIA comenzaron a desarrollarse en la década de 1960, como parte de una mayor conciencia ambiental (Universidad de Whashington, 2000). Un EIA se prepara para estimar los efectos de un proyecto de desarrollo o construcción propuesto. Los EIA proporcionan evaluaciones técnicas que tienen como objetivo contribuir a una toma de decisiones más objetiva. En los Estados Unidos, las evaluaciones de impacto ambiental obtuvieron un estatus formal en 1969, con la promulgación de la Ley de Política Ambiental Nacional (NEPA).

Los EIA se han venido utilizado cada vez más en todo el mundo, y cada año adquieren más relevancia, por el hecho de que los estados de manera responsable han ido modificando las débiles políticas ambientales del pasado, con la finalidad de mantener una mejor preservación de los recursos y de la salubridad del medio ambiente.

2.2.1.2. Impactos Ambientales de la Minería

Las operaciones mineras modernas se esfuerzan activamente por mitigar las posibles consecuencias ambientales de la extracción de metales, y tales operaciones están estrictamente reguladas en los Estados Unidos. La clave para una mitigación efectiva radica en implementar avances científicos y tecnológicos que prevengan o controlen impactos ambientales no deseados (Hudson et al, 1999). Las principales operaciones mineras en la actualidad son las siguientes:

- Minería a cielo abierto (gemas, minerales metálicos y no metálicos)
- Minería subterránea (principalmente minerales metálicos y gemas)
- Minería submarina (dragado)
- Minería de lixiviación in situ (ISL)

Las operaciones y los productos de desecho asociados con la extracción y el procesamiento de minerales metálicos (oro, cobre, plata, zinc) son las principales causas de preocupaciones ambientales sobre la minería de metales. Las preocupaciones incluyen:

- Perturbaciones físicas del paisaje y erosión acelerada
- Derrumbes (colapso de taludes de minas a cielo abierto), subsidencia y sumideros (colapso de minas subterráneas).
- Contaminación del aire, suelos, aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas) y/o subterráneas (acuíferos).
- Aumentos del volumen de sedimentos en los ríos y disminución de los caudales de agua (Hudson et al, 1999).

La contaminación en el aire se debe a la expulsión de gases tóxicos de las plantas de procesamiento, mientras que la contaminación de los suelos y las aguas se produce por metales pesados (arsénico, plomo, otros) y químicos tóxicos (mercurio, cianuros, otros) productos de la propia explotación minera (erosión y lixiviación de pilas de sedimentos), aguas residuales de las plantas de tratamiento o represas de relaves (drenaje ácido).

El impacto ambiental de las actividades mineras puede ocurrir a escala local, regional y global, a través de prácticas mineras directas e indirectas. Algunos métodos de minería pueden tener efectos ambientales y de salud pública tan significativos que las empresas mineras de algunos países deben seguir estrictos códigos medioambientales y de rehabilitación para garantizar que el área minada vuelva a su estado original (Hudson et al, 1999).

La actividad minera es altamente impactante sobre el ambiente, y plantean riesgos considerables, incluyendo tanto su modalidad subterránea como a cielo abierto. Esto es debido a que numerosas operaciones relacionadas con la minería metálica implican la extracción de los minerales a través del uso de explosivos y medios mecánicos a gran escala, procesos de conminución y molienda de las rocas mineralizadas, junto con grandes instalaciones de pilas de

lixiviación, flotación y concentración de minerales, donde se utilizan sustancias de alto riesgo como cianuros y ácido sulfúrico.

Evidentemente, también destacan las grandes represas de relave, donde se depositan los materiales residuales, con una elevada presencia de sulfuros y compuestos cianurados, que representar pasivos ambientales con alto riesgo, incluso catastróficos en caso de ruptura, como ha ocurrido recientemente en Brasil, España, China, y México, entre otros muchos casos.

Adicionalmente a lo anterior, hay que agregar los procesos de beneficio y fundición de metales, que también están asociados a impactos ambientales considerables por emisiones de contaminantes de alta toxicidad a la atmósfera. Sobre todo en la minería a cielo abierto, hay que resaltar los problemas inherentes de modificación del paisaje y de los perfiles hidrológicos, en las tasas de sedimentación, generación de grandes volúmenes de residuos y escombros, remoción de capas vegetales y suelos, impacto en la biodiversidad y el paisaje, alteración del relieve, modificación de la dinámica de los procesos de las ladera, peligros geotécnicos (inestabilidad de taludes) y modificaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Por otro lado, a la problemática descrita hay que adicionar los riesgos que representan los efluentes y lixiviados de sustancias químicas ácidas (drenaje ácido), junto con metales pesados sobre los suelos, aguas subterráneas, y cuencas hidrográficas (Allan y Salomons, 1995). Una cosa que se debe resaltar sobre la minería metálica son sus secuelas a largo plazo por las represas de relaves y los efluentes ácidos que perduran sin saneamiento ambiental durante largos periodos, y que demandan de una rigurosa planificación del cierre de minas, así como supervisión y gestión de legados de pasivos ambientales con un amplio horizonte temporal.

Las represas de relave son grandes depósitos de subproductos y desechos de la minería, que pueden contener metales pesados como arsénico, plomo, mercurio, y sustancias químicas como sales de cianuro y otros utilizados en el

procesamiento de minerales que se pueden acumulan en millones de toneladas. Estas represas de relave son utilizadas para recolectar el agua y los desechos derivados del proceso de extracción de los minerales valiosos. (Romero, 2015). Existen estimaciones de que existen por lo menos 3.500 represas de relave en diferentes partes del mundo.

Analizando la configuración de las represas de relave, se observa que el dique o muro de contención generalmente está constituido de material de material removido (sedimentos y rocas contiguas), las cuales se encuentran impermeabilizado el coronamiento (tope) y el talud interno Este tipo de depósitos pueden llegar a ser de un enorme tamaño, incluso tan grandes como lagos, y pueden llegar a más de 100 metros de altura.

Cabe destacar que el relave de la minería no es necesariamente un residuo tóxico, sino principalmente roca triturada y agua, por lo que originalmente no es considerado como un material tóxico. Pero la toxicidad puede aparecer en estados posteriores, a medida que los componentes de los sedimentos reaccionan con agua circundante y solubilizan tóxicos que se pueden transportar disueltos en agua (Romero, 2015).

Se ha observado en numerosos estudios que la contaminación por metales pesados se origina cuando algunos de esos metales contenidos en rocas excavadas o expuestas en vetas se ponen en contacto con el agua. La contaminación con metales pesados es producida principalmente a través de los drenajes ácidos y la erosión de escombreras y depósitos de colas de explotaciones, originando que estos subproductos entren en contacto con los suelos y las aguas superficiales, o cuando son lixiviados y percolan a través del subsuelo y se ponen en contacto con aguas subterráneas.

Por otro lado, la contaminación atmosférica que se produce por el humo y los gases que se generan en las plantas procesadoras también puede introducir significantes cantidades de elementos tóxicos y volátiles en el ambiente (Allan y Salomons, 1995).

La presencia de contaminantes en suelos y aguas, tanto superficiales como subterráneas, se relaciona con efectos nocivos para el ser humano, la fauna en general y la vegetación. Los relaves mineros y desechos industriales (derramados, depositados en estanques o enterrados) dañan mucho más y son más contaminantes que otros productos. El método más habitual para el tratamiento de relaves consiste en almacenar los relaves en un embalse o tranque, donde los sólidos se sedimentan, liberando el agua como sobrenadante. De esta manera se forma un sistema con playas y una laguna de aguas claras, desde donde se retorna el agua al proceso mediante bombeo, para ser tratada y reutilizada.

En la Tabla 1 a continuación, se listan los Límites Máximos Permitidos (LMP) de emisión de agentes tóxicos o nocivos para la salud (metales pesados y otros productos químicos) en los recursos hídricos para las actividades minero-metalúrgicas, según Decreto No. 010-1010 del Ministerio del Ambiente del Perú (2010).

Tabla 1. Límites Máximos Permitidos (LMP) de emisión de agentes tóxicos, según Decreto No. 010-1010 del MINAM (2010)

Parámetro	Unidad de medida	Límite en cualquier momento	Límite promedio anual	Variación respecto a los LMP de 1996 2/ 3/	
				Límite en cualquier momento	Límite promedio anual
Ph (PH)	Niveles	6 - 9	6 - 9	Sin variación	
Sólidos totales en suspensión (STS)	mg/l 1/	50	25	Sin variación	
Plomo (PB)	mg/l 1/	0.2	0.16	↓ 0.2	↓ 0.04
Cobre (CU)	mg/l 1/	0.5	0.4	↓ 0.5	0.1↑
Zinc (ZN)	mg/l 1/	1.5	1.2	↓ 1.5	0.2↑
Fierro (Hierro) (FE)	mg/l 1/	2	1.6	Sin variación	0.6↑
Arsénico (AS)	mg/l 1/	0.1	0.08	↓ 0.90	↓ 0.42
Cianuro total (CN)	mg/l 1/	1	0.8	Sin variación	↓ 0.2
Aceltes y grasas (AG)	mg/l 1/	20	16	Nuevo	
Cadmio (CD)	mg/l 1/	0.05	0.04	Nuevo	
Cromo hexavalente 1/ (CR)	mg/l 1/	0.1	0.08	Nuevo	
Mercurio total (HG)	mg/l 1/	0.002	0.0016	Nuevo	

1/ Miligramos por litro
2/ Las flechas hacia arriba indican que los LMP han sido más flexibles respecto a sus niveles de 1996. Las flechas hacia abajo indican lo contrario
3/ Comparación realizada respecto a las operaciones mineras nuevas

Fuente: Ministerio del Ambiente del Perú (2010).

2.2.1.3. Métodos Analíticos para el Análisis Químico de Materiales

Con el fin de identificar la composición química (composición elemental o mineralógica) de los materiales, incluidas los sólidos naturales o sintéticos (metales, rocas, sedimentos, plásticos, otros), líquidos naturales o sintéticos (agua, bebidas, fármacos, productos químicos, otros), gases y materiales orgánicos (tejidos, fluidos, sangre, madera, plantas, entre otros), resulta necesario utilizar métodos analíticos que proporcionen información sobre los elementos o compuestos químicos presentes en dicho material. A partir de la distribución de los diferentes elementos, se infiere cuál es la composición química o mineralógica del material estudiado (Beckhoff, 2006). Estos métodos analíticos son de mucha utilidad en los estudios de impacto ambiental (EIA).

El desarrollo de diferentes tecnologías ha impulsado que en la actualidad existan en el mercado más de 50 métodos o técnicas analíticas diferentes para efectuar el análisis químico de los materiales, tanto en estado sólido, líquido o gaseoso. Estas técnicas analíticas pueden ser de dos tipos principales: técnicas de espectrometría (espectrómetros) y técnicas de difracción (difractómetros). Las técnicas de espectrometría pueden ser de absorción atómica, de emisión atómica, de masas (molecular), de fluorescencia, de electrones, de rayos infrarrojos y de rayos ultravioleta. Mientras que la difracción puede ser de rayos X, de electrones o de neutrones.

Para el caso específico de los materiales geológicos (minerales, rocas, suelos y sedimentos), las técnicas analíticas más utilizadas para determinar la composición de las muestras en estado sólido son la difracción de rayos X (XRD), la espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF), la espectrometría por absorción atómica (AAS), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes (IPC-AES / IPC-OES).

Estos análisis permiten determinar tanto los compuestos o elementos mayoritarios, como los compuestos o elementos traza, dentro de los que se incluyen los metales pesados (plomo, arsénico, mercurio, entre otros). Una

diferencia entre estos métodos es que la difracción de rayos X (XRD) permite identificar directamente compuestos mayoritarios y trazas (minerales como cuarzo, calcita, feldespatos, óxidos de diferentes metales), mientras que los otros métodos permiten identificar directamente elementos mayoritarios y trazas (Si, O, Ca, K, Fe, Cu, Zn, Pb, As, entre otros).

La técnica de difracción de rayos X (XRD) es un método versátil y no destructiva que permite identificar de manera rápida la información cualitativa y cuantitativa de los minerales o fases contenidos en una amplia gama de materiales geológicos, que se analizan en un laboratorio de investigación o se están procesando para una aplicación industrial. Por otro lado, la fluorescencia de rayos X (XRF) permite efectuar el análisis elemental del mismo material, que en muchos casos se utiliza como datos principales para la caracterización geoquímica inorgánica (exploración minera), y otras veces se usa como complemento la mineralogía obtenida por XRD.

Las técnicas analíticas de XRD y XRF son ampliamente utilizadas desde hace varios años en diversos laboratorios, tanto industriales y de investigación y desarrollo. Estas 2 técnicas se pueden combinar entre ellas, o con otras técnicas especializadas como espectrometría por absorción atómica (AAS), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes (IPC-AES / IPC-OES) para el análisis elemental de trazas, o con el microscopio electrónica de barrido (SEM), que se basa en la espectroscopia de electrones, de gran utilidad para el análisis estructural interno de los materiales.

Sin embargo, para estudios de impacto ambiental (EIA), muchas veces la determinación de los contenidos totales de metales pesados en suelos y sedimentos no es suficiente para evaluar el grado de impacto ambiental de una fuente contaminante, por lo que se hace necesario cuantificar y caracterizar las especies minerales solubles y por lo tanto biodisponibles que están presentes en los suelos y sedimentos. Para que los metales pesados puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben encontrarse biodisponibles para ser

captados por éste, es decir que los elementos deben ser solubles o susceptibles a ser lixiviados.

Para determinar si los suelos o sedimentos presentan minerales o compuestos químicos con este comportamiento, el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad o TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) es considerado adecuado para evaluar la solubilidad de un contaminante en suelos, y de esa forma, obtener indicios preliminares sobre la biodisponibilidad, y, por lo tanto, de la potencial toxicidad que pueden representar los mismos. El ensayo TCLP se realiza según el estándar U.S. EPA-1311 (SW-846). Este procedimiento ha sido diseñado para determinar las características de toxicidad por lixiviación (Boada, 2004).

Por otro lado, en el caso de las muestras en estado líquido (agua superficiales y subterráneas), los métodos analíticos se centran en estudiar los parámetros físico-químicos, microbiológicos y toxicológicos. El análisis físico-químico se trata de un método cuyo objetivo es estudiar las relaciones entre propiedades físicas y la composición química del agua (conductividad, dureza, total de sólidos disueltos y el pH). La conductividad se relaciona directamente con el contenido de iones salinos (NaCl), a mayor conductividad, mayor contenido de sales. La dureza se relaciona con el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), a mayor dureza, mayor contenido de carbonatos. Mientras que el pH se relaciona con la acidez, a mayor pH, menor es el grado de acidez.

Los análisis microbiológicos del agua se basan en la determinación del carbono orgánico total (COT), que se relaciona con el contenido de materia orgánica (a mayor carbono orgánico, mayor es el contenido de materia orgánica del agua), y con la demanda bioquímica de oxígeno (BOD), que se relaciona con la actividad bacteriana (a mayor demanda de oxígeno, mayor cantidad de organismos o bacterias contiene el agua).

Mientras que los análisis toxicológicos del agua se basan en la determinación de componentes químicos tóxicos (como el mercurio y el cianuro) y de metales

pesados cancerígenos (como el arsénico, plomo y torio), para lo cual los análisis más efectivos son la espectrometría por absorción atómica (AAS), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes (IPC-AES / IPC-OES).

Cada uno de los métodos analíticos tiene sus ventajas y desventajas, y lo recomendado en el control de calidad es combinar por lo menos 2 métodos diferentes, que permita establecer comparaciones entre los resultados y cuantificar la incertidumbre estadística de los mismos.

Analitos

En la disciplina de química analítica, un analito corresponde a un componente, elemento o isótopo analíticamente significativo en una muestra separada de la matriz de una sustancia. Es una especie mineral cuyas características y concentración es conocida, identificable y cuantificable mediante procesos de medición química (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Calibración de los Instrumentos y Equipos

Para calibrar las técnicas analíticas mencionadas anteriormente, se deben seguir cuidadosamente las instrucciones del fabricante cuando se vaya a realizar la calibración inicial de los instrumentos y equipos. Además de calibrarlos la primera vez que se ponga en servicio, también es recomendable efectuar nuevamente la calibración cada vez que se vaya a efectuar una serie de análisis (entre 10 y 20). Adicionalmente, es necesario determinar con qué frecuencia será necesario se debe volver a calibrar los equipos e instrumentos, según su estabilidad y las recomendaciones del fabricante (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Verificación del Funcionamiento de los Instrumentos y Equipos

Con el fin de verificar que los instrumentos y equipos estén funcionando de acuerdo con las especificaciones del fabricante, es preciso monitorear los parámetros de los mismos, realizando periódicas verificaciones funcionales. Este proceso debe realizarse antes de utilizar el instrumento por primera vez. Posteriormente, la operación se realizará con la frecuencia recomendada por el fabricante. Estas comprobaciones de rendimiento también deben realizarse después de efectuar reparaciones y mantenimientos preventivos. Entre los ejemplos de comprobaciones de rendimiento se tienen el monitoreo diario de la temperatura y la comprobación de la precisión de la calibración de la longitud de onda (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Interferencias de los Instrumentos y Equipos

Las interferencias se pueden definir como cualquier tipo de efecto que provoca una variación de la señal (o respuesta) del analito, lo que se asocia a un aumento o disminución aparente, afectando de esta manera la exactitud (Harris, 2003). Se pueden distinguir diferentes tipos de interferencias en las técnicas analíticas de espectrometría y difracción, siendo las principales:

- a) **Químicas:** Algunos factores como el tipo de solvente, temperatura de la muestra y pH pueden producir variaciones en la posición e intensidad de las bandas de absorción de las moléculas; por ejemplo, una modificación del pH puede afectar la estabilidad de algunos complejos y con ello a su espectro de absorción. Una segunda fuente de interferencia química es debida a la calidad de reactivos, donde la pureza de los mismos juega un papel crucial, ya que soluciones de mala calidad pueden generar soluciones estándar con concentraciones inferiores a las reales. Por último, se puede incluir en este grupo a la interacción entre 2 o más especies minerales absorbentes, lo que puede originar que algún compuesto que no es de interés absorba en la misma región del espectro que el analito de interés, resultando así en un error en la medida de absorción atómica (Owen, 2000).

- b) **Instrumentales:** Entre las interferencias instrumentales tenemos a la generada por el ruido de los propios instrumentos, y la originada por la presencia de una significativa cantidad de radiación parásita, que se refiere a la cantidad de radiación dispersa que contamina a la radiación principal, a la misma la longitud de onda. Esto perturba de manera negativa a la precisión de las medidas, es decir, muestran una absorción menor de la real (Owen, 2000).

2.2.1.4. Control de Calidad de los Análisis Químicos de Materiales

EL control de calidad de los análisis químicos se efectúa a través del monitoreo de la precisión, exactitud y veracidad. La precisión se puede controlar con el cumplimiento de los protocolos que se deben seguir para cada tipo de análisis. La exactitud se puede controlar mediante la reducción de la incertidumbre en los resultados utilizando técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP). Mientras que la veracidad se puede controlar a través de la inserción de muestras estándares (sustancias o elementos de control), que han sido analizados por varios laboratorios, con el objeto de determinar los valores aceptados (homologados) y los intervalos de confianza, dentro de los cuales deberán moverse los resultados (Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

CAPÍTULO III.

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis General

HG: La implementación del control estadístico de la calidad (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.

3.2. Hipótesis Específicas

HE1: Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.

HE2: El monitoreo de la variabilidad de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

HE3: El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la minería.

3.3. Identificación y Operacionalización de Variables

Variable Independiente: Monitoreo de Contaminantes

Definición: El monitoreo de contaminantes por medio de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) consiste en aplicar las herramientas y técnicas estadísticas que disponen los sistemas de gestión de la calidad (SGC) y los sistemas de gestión ambiental (SGA) en la evaluación de los datos del monitoreo que se recopilan en los estudios de impacto ambiental (EIA), con el fin de mejorar la evaluación de los estudios y reducir los efectos de la contaminación ambiental (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2003).

Dimensiones:

- Muestreo de Suelos y Aguas
- Protocolos de Preparación y Análisis de Muestras
- Control Estadístico de la Calidad de los Resultados

Variable dependiente: Estudio de Impacto ambiental

Definición: Los estudios o evaluaciones de impacto ambiental (EIA) son herramientas de los sistemas de gestión ambiental (SGA) que forma parte de la aprobación y toma de decisiones de los proyectos. Las evaluaciones ambientales pueden regirse por reglas de procedimiento administrativo con respecto a la participación pública y la documentación de la toma de decisiones, y pueden estar sujetas a revisión judicial. El propósito de la evaluación es asegurar que los tomadores de decisiones consideren los impactos ambientales al decidir si continuar o no con un proyecto (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2003).

Dimensiones:

- Impactos Ambientales de la Minería
- Gestión de Impacto Ambiental

CAPÍTULO VI.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo de Investigación

La presente investigación fue de tipo básica con un diseño no experimental, con enfoque mixto (cuali-cuantitativa).

Para Hernández, Fernández y Baptista (2006) dentro de una investigación teórica o básica, conocida también pura o fundamental, “el planteamiento básico del diseño de teoría fundamentada es que las proposiciones teóricas surgen de los datos obtenidos en la investigación, más que de los estudios previos” (p. 80).

Las búsquedas y los avances en las investigaciones aportan y se caracterizan por su interés en la aplicación, en el uso y las consecuencias prácticas del conocimiento. En este sentido, Hernández et al. (2014) la definen como: “Una investigación básica, un buen trabajo es aquel en el cual el equipo especialista ha puesto todo su empeño en la búsqueda de conocimiento o soluciones, manteniendo siempre la objetividad y la mente abierta para tomar las decisiones adecuadas” (p.125).

Palella y Martins (2010) señalan que una investigación no experimental se ejecuta sin manipular deliberadamente a la variable o al conjunto de variables. En este sentido, el investigador no reemplaza intencionalmente las variables. Además, señalan que las variables se observan tal como se presentan en su contexto real y en un momento determinado, y luego se analizan. Por lo tanto, en este diseño no se construye una situación específica, pero se consideran las existentes tal como se observan.

En relación al enfoque de la presente investigación, fue de carácter mixto (cuali-cuantitativa), debido a que se medirán los resultados obtenidos al aplicar los conocimientos mediante el cálculo de parámetros de fórmulas empíricas en

la investigación. En relación a este punto, Hernández et al. (2006) manifiestan que, para probar las hipótesis, el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos, para luego ser analizados mediante mediciones numéricas y análisis estadísticos para determinar patrones o modelos de comportamiento para probar las teorías. A sí mismo, la investigación cualitativa “proporciona profundidad a los datos, dispersión, riqueza interpretativa, contextualización del ambiente o entorno, detalles y experiencias únicas. Por otro lado, aporta un punto de vista “fresco, natural y holístico” de los fenómenos, así como flexibilidad” (Hernández et al., 2006, p.26).

Este estudio también se puede considerar como descriptivo, debido a que tiene como objetivo recopilar información, de forma independiente o colectiva, sobre los conceptos o variables con las que se relaciona. Es decir, no indica cómo se relacionan entre sí las variables medidas. En este caso, el investigador tiene como objetivo describir fenómenos, situaciones, contextos y eventos, detallando cómo son y cómo se manifiestan.

En este trabajo descriptivo se busca sintetizar las características, perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos u otros fenómenos en el proceso de análisis. Dicho de otra manera, se midieron, evaluaron y recolectaron datos sobre diversos conceptos de las variables, aspectos, dimensiones y componentes del fenómeno en estudio (Hernández et al., 2006).

Así mismo, el diseño de esta investigación es inferencial, ya que pretende resolver sobre la aceptación o rechazo de las hipótesis, debido a que es esencial establecer si un hecho o suceso puede o no ser significativo. Este diseño de investigación se utiliza para inferir, partiendo de la muestra de la población, sobre la base de los datos previamente recolectados y analizados.

En cuanto al corte de la investigación será transversal o transeccional, la cual se caracteriza porque la recolección de datos se efectúa en un solo momento, en un tiempo único, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (Hernández et al., 2006)

En el presente trabajo investigativo el método utilizado fue el hipotético, analítico y deductivo.

En este sentido, Bernal (2010) considera que el método es hipotético y deductivo consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis e intenta refutar o falsificar las hipótesis planteadas, derivando conclusiones de ellas que deben ser confrontadas con los hechos.

Por otra parte, con el método analítico en el presente estudio se logró encontrar observaciones y análisis para obtener conclusiones confiables. De este mismo modo Bernal (2010) menciona que el método analítico “es un proceso cognoscitivo que consiste en descomponer un objeto de estudio, separando cada una de las partes del todo para estudiarlas en forma individual” (p.60).

4.2. Unidad de Análisis

La técnica a utilizar en la investigación fue la observación. En este sentido, Bernal (2010) señala que “la observación, como técnica de investigación científica es un proceso riguroso que permite conocer, de forma directa, el objeto de estudio para luego describir y analizar situaciones sobre la realidad estudiada” (p.257).

La observación se efectuó directamente a las unidades de análisis, que están constituidas por los estudios de impacto ambiental (EIA) aprobados durante el periodo 2015 a 2019 por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINAM) de los proyectos mineros del Perú, que incluyen proyectos nuevos, de ampliación o de modificación.

4.3. Población de estudio

En referencia a la población o universo de estudio, Hernández et al. (2014), señalan que esta se refiere al “conjunto de todos los casos que

concuerdan con determinadas especificaciones” (p.174). En base a este planteamiento, la población motivo de esta investigación estuvo conformada por los proyectos mineros que han solicitado aprobación de estudios de impacto ambiental (EIA) ante el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) durante el periodo 2015 a 2019.

4.4. Muestra

Hernández et al. (2014) define a la muestra como un “subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta” (p.173). En este caso, la muestra de la investigación estuvo constituida por los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de los proyectos mineros que han sido aprobados y publicados por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) durante el periodo 2015 a 2019.

4.5. Selección de la muestra

El muestreo o la selección de la muestra es “el proceso de obtención de una porción representativa de la población, donde las características principales deben ser objetivas y tratar de ser un reflejo lo más fiel posible. De esta forma, los resultados adquiridos en la muestra permiten que se pueda generalizar con los demás elementos que forman parte de la población” (Carrasco, 2009).

Según Palella y Martins (2012) “cuando el investigador selecciona una muestra, está obligado a describir los mecanismos que aplicará para obtenerla. A este proceso se le denomina muestreo. Existen dos procedimientos para la extracción de la muestra: a) Probabilístico o aleatorio: se aplica si es posible conocer la probabilidad de selección de cada unidad componente de la muestra; y b) No probabilístico: se usa cuando no se puede determinar la probabilidad” (p.110).

En relación al muestreo no probabilístico, los autores mencionan que puede ser de tres tipos: “Muestreo accidental: consiste en no prefijar ningún criterio de

selección, excepto el tamaño de la muestra (...) Muestreo intencional: el investigador establece previamente los criterios para seleccionar las unidades de análisis, las cuales reciben el nombre de tipo, (...) Muestreo por cuotas: para ejecutar este tipo de selección, se divide la población en sectores, tomando en cuenta ciertos aspectos prefijados; pero la elección de las unidades de cada sector se realiza de manera arbitraria, sin atender a ningún procedimiento de selección” (p.114).

En base a lo anteriormente mencionado, se puede afirmar que el tipo de muestreo aplicado en esta investigación para la selección de la muestra es no probabilístico – intencional, utilizando varios criterios de selección. De esta manera se consideraron los siguientes criterios:

- a) Actividades relacionadas con los estudios de impacto ambiental (Inclusión)
- b) Actividades primarias relacionadas con la exploración y explotación minera (Exclusión)
- c) Estatus de aprobación por parte del Ministerio de Energía y Minas del Perú (Inclusión)

4.6. Técnicas de Recolección de Datos

En el presente estudio se utilizó la técnica de la observación y revisión documental de trabajos previos para la recolección de la información. Las técnicas de adquisición de datos pueden ser varias. Para la investigación cuantitativa se utilizaron registros de datos estadísticos, muestras estandarizadas, sistemas de mediciones en trabajos previos, entre otros. Por otro lado, en la parte cualitativa, se revisaron bibliografías, revisión de archivos, observación, entre otros.

4.7. Análisis e Interpretación de la Información

Hernández et al. (2006) señalan que una vez definidos el diseño de la investigación y su respectiva población, se procede la respectiva recolección de datos sobre las variables que serán objeto de estudio, en la cual se desarrollará un instrumento validado previamente por expertos, que se aplicará para obtener las respuestas respectivas, las cuales serán registradas posteriormente para realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Durante el desarrollo de la presente investigación, se tuvo especial interés en la aplicación de técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los estudios de impacto ambiental (EIA), específicamente el control de calidad de los análisis de las muestras de suelos y aguas (contenido de compuestos y/o elementos contaminantes como los minerales pesados). En un principio, se enfocó en la búsqueda y recolección de la información, considerando los antecedentes y aportes teóricos nacionales e internacionales, así como los antecedentes de investigaciones en referencia a las variables planteadas en el estudio.

En una investigación científica, es esencial hacer algunas consideraciones sobre los aspectos éticos. Para ello, nos concentramos en la responsabilidad del consentimiento y los derechos de autor, considerando la comunicación y redacción de las citas de los autores, así como la información publicada por la universidad, siguiendo los pasos metodológicos que emanan de la misma.

4.8. Secuencia Metodológica de la Investigación

La secuencia metodológica que se utilizó en esta investigación comprende lo siguiente:

- a) Obtener Información bibliográfica de la aplicación de control estadístico de la calidad (CEC / CEP) en estudios de impacto ambiental (EIA).

- b) Revisión de las técnicas de detección de variabilidad en análisis de muestras de agua, rocas y suelos, basadas en el control estadístico de la calidad (CEC / CEP)
- c) Desarrollo de una nueva metodología o flujo de trabajo fundamentado en el aprovechamiento de las ventajas del control estadístico de la calidad, adecuada a las particularidades de un estudio de impacto ambiental (EIA) de un proyecto minero.
- d) Aplicación de las técnicas de control estadístico de la calidad (CEC / CEP) al estudio de la calidad del agua, aire y suelo, mediante el desarrollo de varios casos de estudio.

CAPÍTULO V.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los datos y análisis de resultados que permitieron el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación.

5.1. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 1

Para el cumplimiento del objetivo específico 1: *Examinar si los métodos de evaluación de impacto ambiental (EIA) utilizados en los proyectos del sector minero en el Perú son empleados para las medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas*, se analizaron 2 fuentes de datos principales. Los resultados se muestran a continuación:

Fuente de Datos No. 1

Atención de Expedientes Ambientales Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) en el año 2019.

Según el Anuario Minero del Ministerio de Energía y Minas de Perú (2019), la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) atendió 197 informes de estudios de impacto ambiental (EIA), denominados también Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA), de los cuales el 55,3% (109 informes) corresponden a exploración, el 21,3% (42 informes) corresponden a cierres de minas y pasivos, el 20,8% (41 informes) corresponden a explotación, y el 2,5% restante (5 informes) corresponden a Pequeño Productores Mineros (PPM) y Pequeños Mineros Artesanales (PMA).

Se resalta también que, de los 197 estudios evaluados, el 69,1% (136 informes) fueron aprobados, 9,1% (18 informes) fueron desaprobados y el 21,8% restante (43 informes) fueron resueltos bajo la categoría de otros (correcciones).

En lo que respecta a la distribución de números de estudios ambientales por región, se tiene que las regiones con mayor número fueron: Lima con 15,7% (31 informes), Junín 11,7% (23 informes) y Arequipa con 10,7% (21 informes) del total de estudios ambientales atendidos. Se resalta que, para la mayoría de las regiones, los estudios ambientales que más abundan son los correspondientes a la actividad de exploración. Estos números confirman que el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) están realizando esfuerzos por mantener al día a las empresas operadoras y contratistas mineras con respecto a la documentación legal sobre Gestión de Impacto Ambiental.

Fuente de Datos No. 2

Portal Web del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM)

Del portal web del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) se logró obtener información de algunos informes de estudios de impacto ambiental (EIA) asociados a proyectos mineros en el Perú que fueron en los años recientes. A partir de esta búsqueda se logró recopilar los datos de 28 estudios efectuados y aprobados entre los años 2015 y 2019.

A partir de la revisión recopilada, se encontraron evidencias en los resúmenes e informes de que por lo menos en el 71,4% (20 estudios) han efectuado análisis de las características físico-químicas generales, análisis de contaminantes biológicos y químicos, además de análisis de contenido de minerales y elementos contaminantes como metales pesados (espectrometría y difractometría) a muestras de suelo, sedimentos y agua. Sin embargo, sólo del 3,6% (1 informe) de los estudios revisados dispone de base de datos con los resultados de los análisis. Este estudio lo efectuó el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) durante el 2016, en Distrito de Chala, Región de Arequipa. Las tablas de evaluación estadística de los resultados se muestran en el Anexo 3.

A continuación, en la Tabla 2 se presentan los datos de los 28 estudios de impacto ambiental (EIA) aprobados por el Ministerios de Energía y Minas del Perú (MINAM) entre los años 2015 y 2019:

Tabla 2. Detalles de identificación de los informes de EIA que están asociados a proyectos mineros en el Perú y que fueron aprobados en los años 2015 a 2019.

No.	Compañía Operadora	Año del EIA	Código del MINEM	Título del EIA	Unidad o Proyecto	Resumen	Informe Completo	Base de Datos	Técnicas CEC / CEP
1	Century Mining Peru S.A.C.	2019	2914836	Plan de remediación ambiental de los tres (3) pozos sépticos	Arequipa	Si	No	No	No
2	Korimallko Minerales S.A.C.	2019	2908463	Recrecimiento del depósito de relaves Yauricocha	Lima	Si	No	No	No
3	Minera Corona S.A.	2018	2282019	Estudios de Impacto Ambiental Semidetallado del Proyecto Santa Rosa	Apurímac	Si	Si	No	No
4	Unión Andina De Cementos	2017	2721763	Mod. Cantera Cristina	Lima	Si	No	No	No
5	Minera Aruntani S.A.C.	2017	2721302	Plan de remediación ambiental de la Unidad San Andrés Arasi	Puno	Si	No	No	No
6	Southern Peru Copper Corp.	2017	2704933	Plan de remediación ambiental de lixiviación Unidad Cuajonepad	Moquegua	Si	No	No	No
7	Minera Raura S.A.	2017	2688687	Recrecimiento del depósito de relaves Nieve Ucro II	Huánuco	Si	No	No	No
8	Minera Los Quenuales S.A.	2017	2682494	Mod. EIA ampliación de la Planta Concentradora Iscaycruz	Lima	Si	No	No	No
9	Minera Yanacocha S.R.L.	2017	2681700	Mod. Plan Integral	Cajamarca	Si	No	No	No
10	MINAM	2016	Institucional	Evaluación preliminar de la contaminación ambiental causada por la pequeña minería y minería artesanal	Arequipa	Si	Si	Si	Si
11	Rio Blanco Copper S.A.	2016	2621564	Mod. Plan de rehabilitación Proyecto Exploración Rio Blanco	Piura	Si	No	No	No
12	Rio Blanco Copper S.A.	2016	2605934	Mod. Plan de rehabilitación Proyecto Exploración Rio Blanco	Piura	Si	No	No	No
13	Minera Yura S.A.	2016	2566885	Mod. Pama	Arequipa	Si	No	No	No

14	Minera Antamina S.A.	2015	2563642	Actualización de EIA	Ancash	Si	No	No	No
15	Minera Ares S.A.C.	2015	2563131	Mod. EIA Unidad Operativa Pallancata	Ayacucho	Si	No	No	No
16	Contonga Peru S.A.C.	2015	2563017	Mod. EIA para ampliación de operaciones Unidad Contonga	Ancash	Si	No	No	No
17	Nyrstar Ancash S.A.	2015	2546070	Memoria técnica detallada para adecuación de operaciones	Ancash	Si	No	No	No
18	Minera Los Quenuales S.A.	2015	2543834	Mod. EIA ampliación planta concentradora de 2700 a 3600 tmd	Lima	Si	No	No	No
19	Minera Antapaccay S.A.	2015	2540614	Actualización Antapaccay Expansión Tintaya	Cusco	Si	No	No	No
20	Minera Aurifera Retamas S.A.	2015	2537901	Mod. EIA UEA Retamas depósito de relaves mush	La Libertad	Si	No	No	No
21	Minera Aurifera Retamas S.A.	2015	2537906	Mod EIA UEA Retamas depósito de desmontes molinetes	La Libertad	Si	No	No	No
22	Unión de Concreteras S.A.	2015	2535757	Mod. EIA para las operaciones mineras y funcionamiento de planta	Lima	Si	No	No	No
23	Concretos Supermix S.A.	2015	2534910	Planta de agregados	Arequipa	Si	No	No	No
24	Minera Aruntani S.A.C.	2015	2506569	III Mod. EIA Unidad Arasi	Puno	Si	No	No	No
25	Nyrstar Ancash S.A.	2015	2487972	Informe de fase de identificación de sitios contaminados Contonga	Ancash	Si	No	No	No
26	Doe Run Peru S.R.L.	2015	2485486	Instrumento de Gestión Ambiental correctivo complejo La Oroya	Junín	Si	No	No	No
27	Gold Fields La Cima S.A.	2015	2473382	IX Mod. EIA Cerro Corona	Cajamarca	Si	No	No	No
28	Minas Buenaventura	2015	2471021	Mod. EIA de la UEA Orcopampa	Arequipa	Si	No	No	No

Fuente: Elaboración propia.

En el EIA del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) del año 2016 se menciona que se realizaron análisis de la composición mineralógica / elemental de laboratorio (ICP-OES) y en campo (XRF portátil), y además, análisis TCLP a muestras de suelos, con el fin de identificar los niveles de lixiviación (biodisponibilidad) de metales pesados (arsénico, cobre, plomo, mercurio, zinc, entre otros). Por otro lado, se presentan las evaluaciones estadísticas de los resultados de los análisis, lográndose verificar que fue el único estudio de impacto ambiental (EIA) encontrado donde se han aplicado técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) para minimizar el grado de incertidumbre asociado a los resultados.

Interpretación de Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos de la revisión documental, puede afirmarse que los métodos de evaluación de impacto ambiental (EIA) utilizados en los proyectos del sector minero en el Perú son empleados para las medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas. En los últimos años, los entes gubernamentales peruanos como el MINEM y el MINAM han multiplicado esfuerzos para que las empresas operadoras y las contratistas mineras cumplan las regulaciones sobre impacto ambiental.

5.2. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 2

Para el cumplimiento del objetivo específico 2: *Conocer como el monitoreo de la variabilidad de los resultados de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) conduce a una reducción en origen de los contaminantes causantes de la misma*, se analizaron 2 casos de estudio. Los resultados se muestran a continuación:

Caso de Estudio No. 1

Análisis de Variabilidad de los resultados del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) efectuado por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) en el Distrito de Chala, Región de Arequipa (2016).

En este estudio efectuado por el Ministerio del Ambiente de Perú (2016), en el Distrito de Chala, Región de Arequipa (Figuras 1 y 2) se reportaron las evaluaciones estadísticas de los resultados de los análisis, gracias a las cuales se logró obtener un mayor control sobre la variabilidad de las concentraciones de los minerales y elementos contaminantes como los metales pesados.

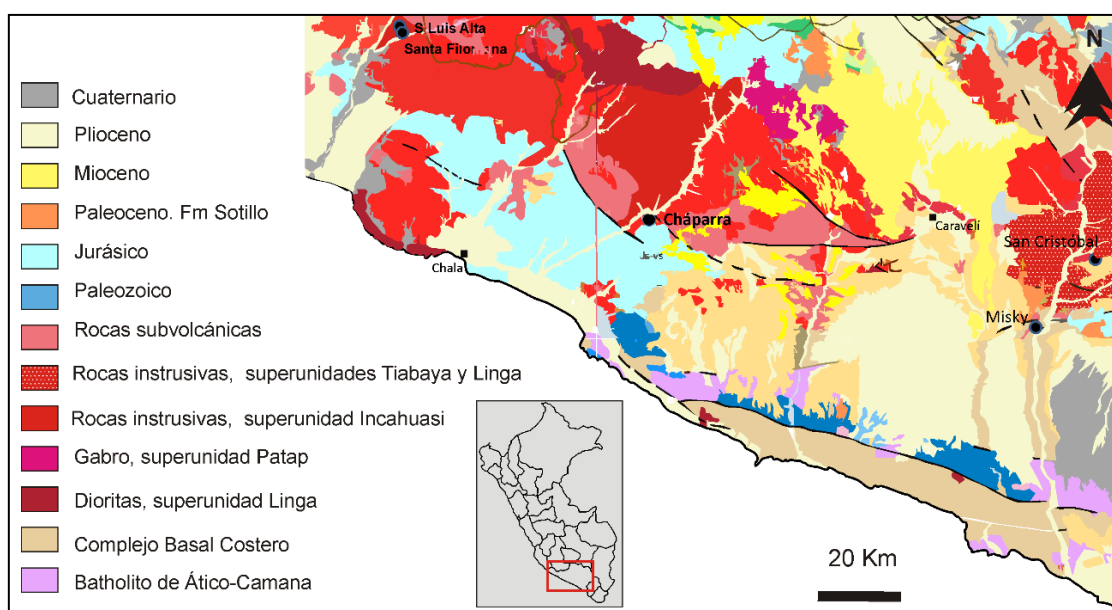


Figura 1. Mapa Geológico de la Región de Arequipa.

Fuente: Colque (2019).



Figura 2. Sectores Poblados del Distrito de Chala, Región de Arequipa.

Fuente: Ministerios del Ambiente del Perú (2016).

Con el equipo de identificación de la composición mineralógica / elemental de laboratorio (ICP-OES), se efectuaron análisis en 52 muestras de suelos y 7

muestras de sedimentos sueltos, cuantificando el contenido de 5 metales pesados: arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd). En general, los análisis de los suelos presentaron mayor variabilidad que los análisis de los sedimentos sueltos (ICP-MS). Las desviaciones estándar relativas (σ/M) para los suelos estuvieron entre 10,96 y 1,88, mientras que para los sedimentos sueltos estuvieron entre 1,26 y 0,11. Observando los elementos por separado, los contenidos de arsénico y cobre (Cu) presentaron mayor variabilidad que los de plomo (Pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd).

Adicionalmente, con el equipo de análisis de composición mineralógica / elemental de campo (XRF portátil) se efectuaron análisis en 17 muestras de suelos y 32 muestras de sedimentos sueltos, cuantificando el contenido de 5 metales pesados: arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg) y zinc (Zn). Estos análisis de campo se compararon con los resultados de los análisis de laboratorio (ICP-OES).

Se observó que los análisis de campo (XRF portátil) realizados en las muestras de suelos presentaron mayor desfase (error) que los análisis efectuados en las muestras de sedimentos sueltos, cuando eran comparados con los análisis de laboratorio (ICP-OES). Los valores mediana (M) de estos errores para los suelos están entre 78% y 166%, mientras que para los sedimentos sueltos están entre -8,5% y 9,3%.

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 presentan desfases (errores) muy grandes en comparación con los análisis de laboratorio (ICP-OES). En muestras no pulverizadas, existen interferencias en las lecturas por la presencia de partículas de diferentes tamaños. Las interferencias por la inhomogeneidad en la granulometría pueden jugar un rol importante para la incertidumbre de las lecturas. En contraste, los resultados de los análisis con el XRF portátil en muestras de sedimentos sueltos, no presentaron diferencias significativas con los análisis de laboratorio (ICP-OES) y pueden considerarse como válidos.

Caso de Estudio No. 2A

Análisis de Variabilidad de los resultados de los análisis de 5 muestras de pozos de agua en el Área Sur-Medio del Perú (Andrade, 2019).

Adicionalmente, se recopilaron y revisaron los resultados de los análisis físico-químicos y de espectrofotometría de absorción atómica (AAS) para cuantificar el contenido de metales pesados en 5 muestras de agua procedentes de los ríos San Luis, Relave, Majes y Ocoña, Región Sur Medio del Perú (Andrade, 2019). La base de datos de estos análisis se muestra a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Resultados de los análisis físico-químicos y espectrofotometría de 5 muestras de agua (concentraciones en unidades de mg/l).

Parámetro Medido	Valor de Referencia (LMP)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
pH	6,50 – 8,50	7,90	7,30	7,40	8,10	8,40
Na	5000	24350	26147	28336	18588	26791
Si	2500	9971	12545	11991	18692	14630
K	500	5992	3982	4109	3025	4705
Ca	10000	99530	114927	129779	53889	109484
Mg	5000	33457	21747	21785	25660	28228
Al	5,00	8,50	8,50	12,50	8,50	10,45
Ti	2,00	34,40	35,70	33,00	37,60	38,69
V	5,00	10,20	7,40	8,90	8,83	9,71
Mn	0,10	1,10	0,96	1,30	0,50	1,06
Co	0,10	0,50	0,50	0,40	0,20	0,44
Cu	0,50	18,70	17,20	22,50	14,10	19,90
Zn	1,50	45,50	24,50	44,30	33,60	40,67
Fe	2,00	11,60	17,90	19,50	16,30	18,00
Mo	0,10	3,00	7,10	7,80	5,80	6,49
Sb	0,10	0,40	0,60	0,50	0,90	0,60
As	0,10	7,40	8,60	12,60	14,90	11,96
Pb	0,10	1,30	0,50	0,70	1,10	0,90
Hg	0,002	0,200	0,300	0,200	0,140	0,190

Fuente: Coloque (2019)

En base a la información recopilada, se realizaron análisis de variabilidad, incluyendo estimación de la mediana (M), desviación estándar (σ), desviación estándar relativa (σ/M) y el número de veces por encima del valor de referencia o límite máximo permitido (NVLMP), los cuales se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de los Análisis de Variabilidad (concentraciones en unidades de mg/l).

Componentes	Mediana (M)	Desviación Estándar (σ)	Desviación Estándar Relativa (σ/M)	NVLMP
pH	7,90	0,42	0,05	---
Na	26147	3378	0,13	5,2
Si	12545	2962	0,24	5,0
K	4109	977	0,24	8,2
Ca	109484	25747	0,24	10,9
Mg	25660	4391	0,17	5,1
Al	8,50	1,60	0,19	1,7
Ti	35,70	2,07	0,06	17,9
V	8,90	0,95	0,11	1,8
Mn	1,06	0,27	0,25	10,6
Co	0,44	0,11	0,25	4,4
Cu	18,70	2,79	0,15	37,4
Zn	40,67	7,80	0,19	27,1
Fe	17,90	2,73	0,15	9,0
Mo	6,49	1,66	0,26	64,9
Sb	0,60	0,17	0,28	6,0
As	11,96	2,73	0,23	119,6
Pb	0,90	0,28	0,31	9,0
Hg	0,200	0,052	0,26	100,0
NVLMP = Número de veces por encima del Límite Máximo Permitido (LMP) Desviación Estándar = Raíz Cuadrada de la Varianza				

Fuente: Coloqqe (2019)

La desviación estándar relativa (σ/M) se estima por la relación entre la desviación estándar (σ) y el valor de la mediana (M). Mientras más alto sea este valor, mayor es su variabilidad. Esto permite efectuar comparaciones entre valores de desviación estándar de varios compuestos diferentes. Este análisis

permitió identificar que los parámetros o componentes de las muestras que presentaron mayores variabilidades fueron el plomo (Pb) con 0,31, el antimonio (Sb) con 0,28, el mercurio (Hg) con 0,26 y el Molibdeno (Mo) con 0,26, mientras que los parámetros o componentes que presentaron menor variabilidad fueron el titanio (Ti) con 0,06, el vanadio (V) con 0,11, el sodio (Na) con 0,13 y el cobre (Cu) con 0,15 (ver Figura 3).

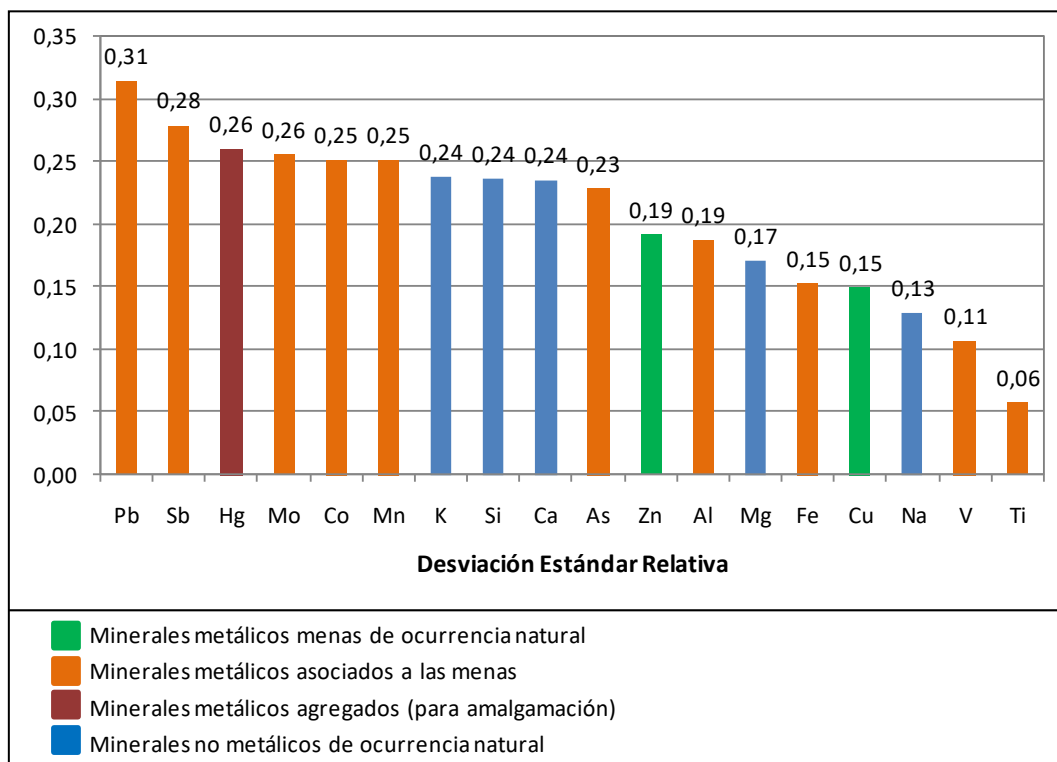


Figura 3. Resultados del Análisis de Desviación Estándar Relativa (σ/M) de los análisis de las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, se identificó que todos parámetros o componentes de las muestras se encuentran por encima de los valores de referencia o límites máximos permitidos (LMP) por los organismos que regulan la gestión ambiental (ECA y MINAM). En este sentido es importante destacar que ciertos minerales metálicos que abundan en zonas no sometidas a explotación minera, como el cobre, el zinc y el hierro (Fe), muchas veces son lixiviados de manera natural por las aguas, originando que sea común que los suelos, las agua superficiales y subterráneas presenten presencia de altos contenidos de estos minerales.

Lo que no es natural es que otras sustancias asociadas a los minerales de las menas, que sólo pueden ser liberadas por la explotación minera, entre estos algunos metales pesados y altamente tóxicos para la salud como el plomo (Pb), arsénico (As) o cromo (Cr), abunden en altas cantidades en suelos y agua, presentando contenidos superiores a los valores de referencia o límites máximos permitidos (LMP).

Se identificó que los parámetros o componentes de las muestras que presentan valores más altos que los valores estándar o límites máximos permitidos (LPM) fueron el arsénico (As) con 119,6 veces, el mercurio (Hg) con 100,0 veces, el molibdeno (Mo) con 64,9 veces, el Cobre (Cu) con 37,4 veces y el zinc (Zn) con 27,1 veces (ver Figura 4).

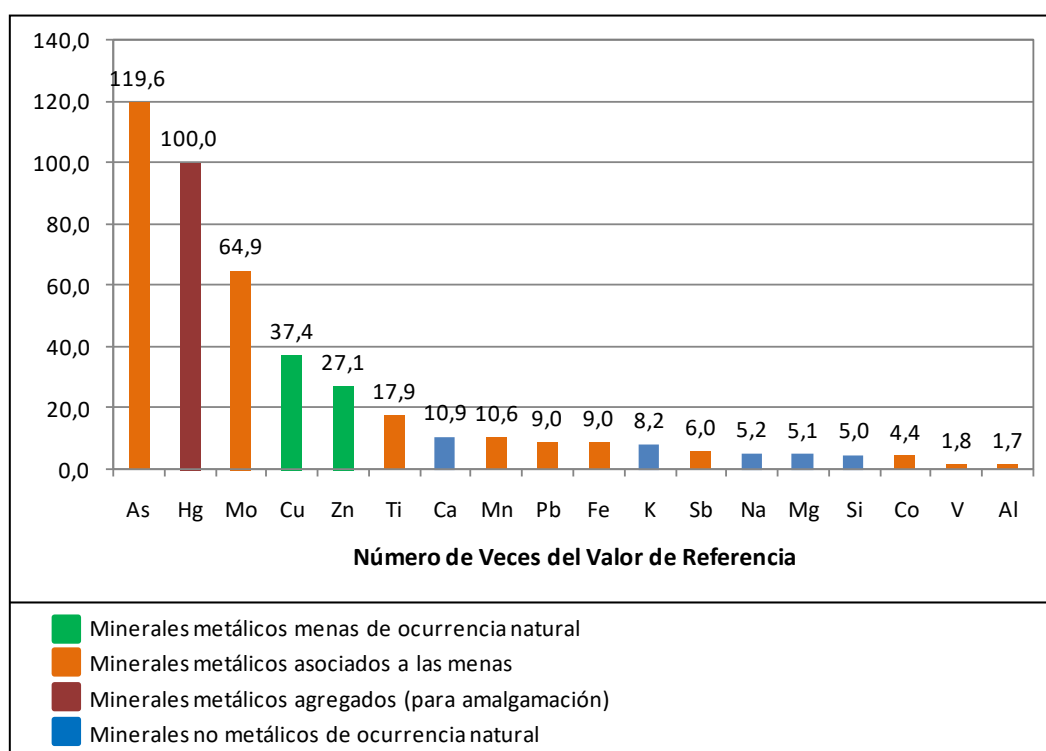


Figura 4. Número de Veces del Valor de Referencia o Límite Máximo Permitido (NVLMP) de los análisis de las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

El control de la variabilidad permite identificar aquellos componentes del agua y los suelos 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.

Interpretación de Resultados

Tomando como referencia los resultados derivados de la revisión documental, puede aseverarse que el monitoreo de la variabilidad de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental. La utilización de herramientas del control estadísticos de la calidad (CEC/CEP) tales como los histogramas, la estimación de la mediana (M), la desviación estándar (σ) y la desviación estándar relativa (σ/M) permite obtener un mejor control sobre un mayor control sobre la variabilidad, en nuestro caso, de las concentraciones de los minerales y elementos contaminantes como los metales pesados.

5.3. Resultados obtenidos para el Objetivo Específico No. 3

Para el cumplimiento del objetivo específico 3: *Determinar como el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental originada por la actividad mineral*, se analizó un caso de estudio. Los resultados se muestran a continuación:

Caso de Estudio No. 2B

Gráficos de Control de los resultados de los análisis de 5 muestras de pozos de agua en el Área Sur-Medio del Perú (Andrade, 2019).

A partir de los resultados de los análisis de las 5 muestras de agua procedentes de los ríos San Luis, Relave, Majes y Ocoña, Región Sur Medio del Perú (Andrade, 2019), se efectuaron los gráficos de control del contenido de tres (3) componentes que son considerados como contaminantes altamente tóxicos (minerales pesados) para la salud de los seres vivos y el ambiente: el arsénico (As), el plomo (Pb) y el mercurio (Hg). Cada gráfico de control presenta el valor mediano (M) en color fucsia, el valor de referencia o límite máximo permitido (LMP) en color verde, el límite superior (LS) en control rojo y el límite inferior (LI)

en color azul. Los gráficos de control generados se muestran a continuación en las Figura 5, 6 y 7:

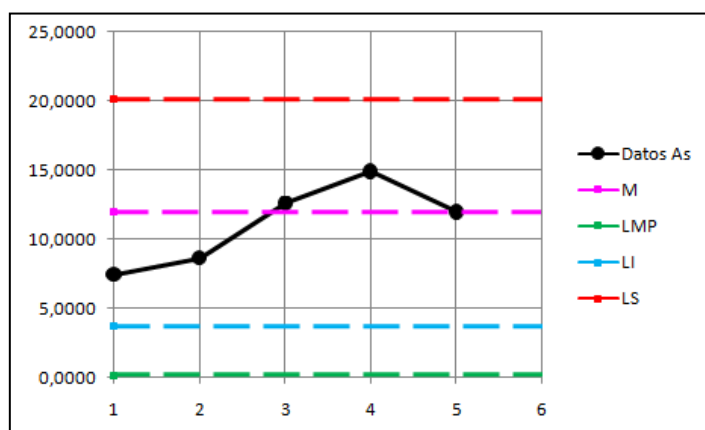


Figura 5. Gráfico de Control del Contenido de Arsénico (As) en mg/l.
Fuente: Elaboración propia.

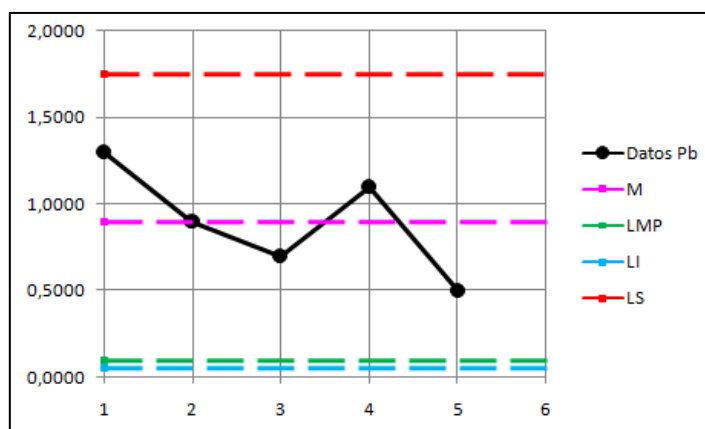


Figura 6. Gráfico de Control del Contenido de Plomo (Pb) en mg/l.
Fuente: Elaboración propia.

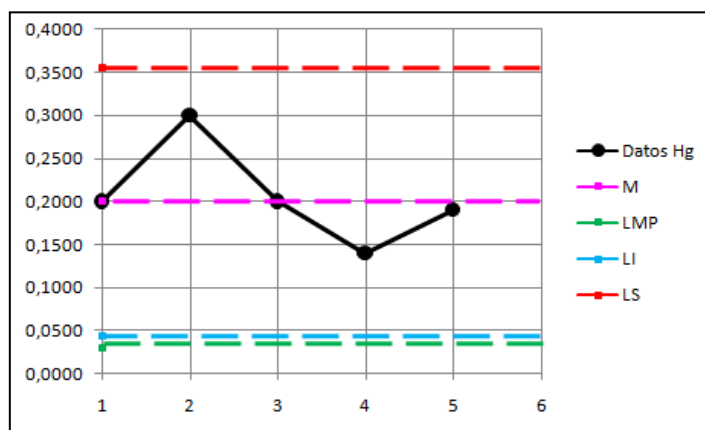


Figura 7. Gráfico de Control del Contenido de Mercurio (Hg) en mg/l.
Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en los gráficos de control, se puede afirmar que los contenidos de contaminantes arsénico (As), plomo (Pb) y mercurio (Hg) presentan un comportamiento moderadamente uniforme y una variabilidad moderada a alta. Así mismo, se determinó que ninguna de las cinco (5) muestras de agua analizadas presenta valores fuera de los límites superior (LS) e inferior (LI), por lo cual, se puede afirmar que estas variables se encuentran bajo control.

Si en análisis contenido de componentes contaminantes adicionales, alguno de los valores se presentara por arriba del límite superior (LS) o por debajo del límite inferior (LI), indica que dicha variable está fuera de control y necesita verificarse el proceso de toma y análisis de la muestra. Si la revisión del proceso de toma de muestra y análisis de la muestra se comprueba que se respetaron los protocolos recomendados, se procede entonces a revisar los propios límites superior (LS) e inferior (LI) de dicha variable.

Otra herramienta que permite efectuar rápidamente un control de calidad y determinar si existe un posible error en la toma y análisis de una muestra de suelo o agua son las regresiones lineales (también conocidas como correlaciones). En las muestras de agua, algunos de los componentes no metálicos que se obtienen por análisis físico-químicos presentan correlaciones significativas de sus contenidos, tal es el caso de sodio (Na) con el calcio (Ca) y el sílice (Si). En términos generales, al aumentar el contenido de sodio (Na) también lo hace el contenido de calcio (Ca) y disminuye el contenido de sílice (Si). En las siguientes Figuras 8 y 9 se muestran las correlaciones entre estos parámetros que sirven como control de calidad adicional:

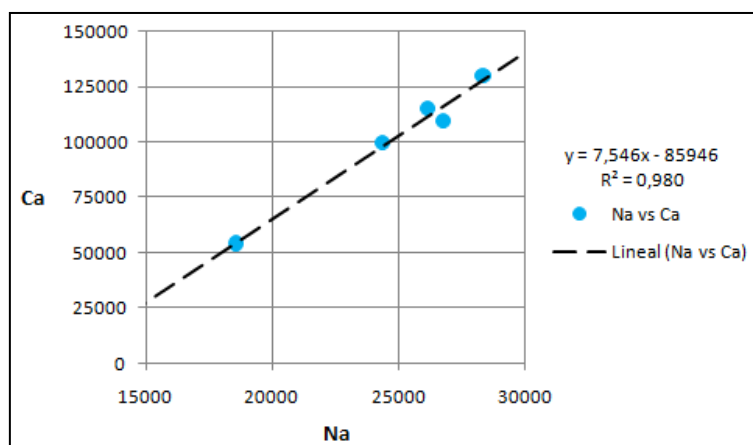


Figura 8. Regresión lineal entre los contenidos de sodio (Na) y calcio (Ca), con una correlación positiva del 98%. Fuente: Elaboración propia.

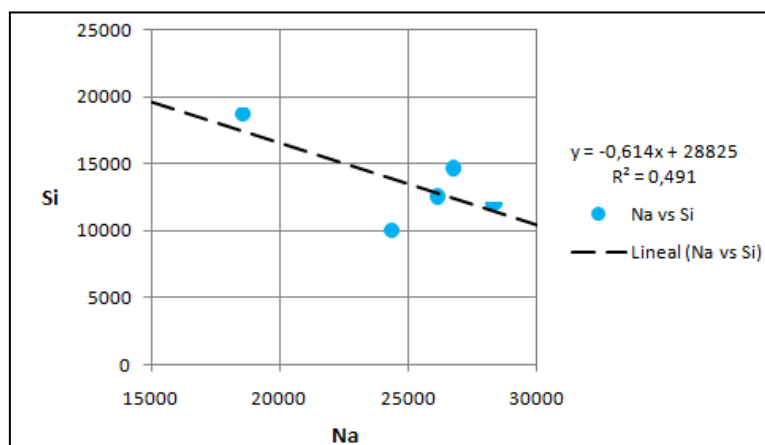


Figura 9. Regresión lineal entre los contenidos de sodio (Na) y de sílice (Si), con una correlación negativa del 49%. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, esta herramienta de control de calidad no puede aplicarse para los componentes contaminantes o metálicos pesados, ya que no se encontró relación directa entre el contenido de estos componentes. Para corroborar este hecho, se realizaron regresiones lineales para correlacionar el contenido del mineral de mena cobre con otros tres (3) minerales pesados considerados como contaminantes: arsénico (As), plomo (Pb) y mercurio (Hg). Los resultados se muestran a continuación en las Figuras 10 a 12:

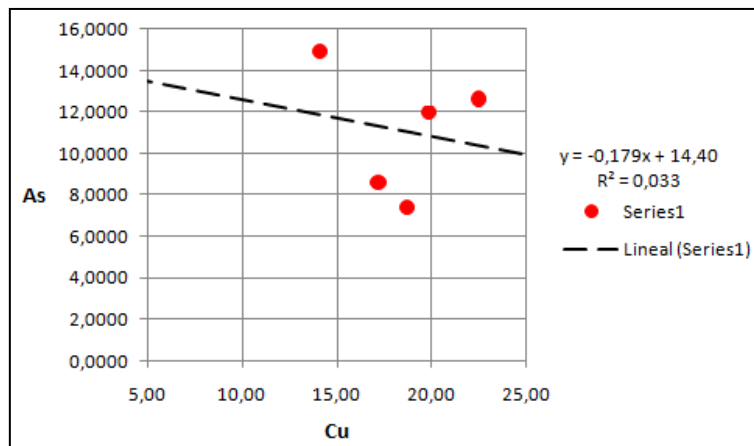


Figura 10. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de arsénico (As), con una correlación negativa de 3,3%. Fuente: Elaboración propia.

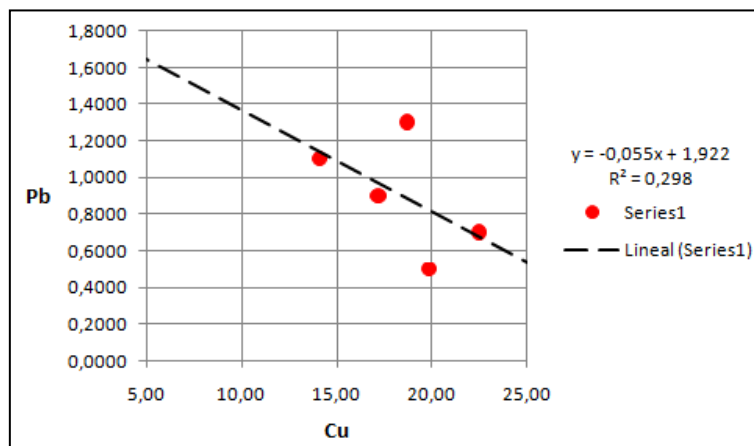


Figura 11. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de plomo (Pb), con una correlación negativa de 29,8%. Fuente: Elaboración propia.

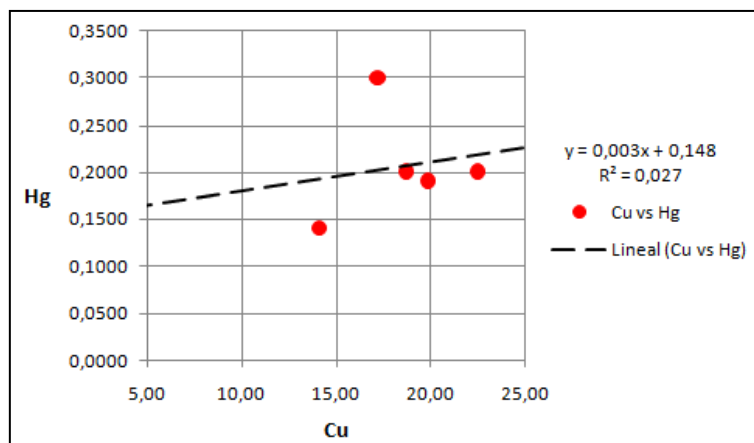


Figura 12. Regresión lineal entre los contenidos de cobre (Cu) y de mercurio (Hg), con una correlación positiva de apenas 2,7%. Fuente: Elaboración propia.

Interpretación de Resultados

A partir de los resultados conseguidos de la revisión documental, es posible afirmar que el uso de la técnica del control estadístico de la calidad (CEC/CEP), como los gráficos de control y los gráficos de correlación o regresión lineal, permite evaluar estudios de impacto ambiental (EIA) y ayuda a la toma de decisiones para reducir la contaminación ambiental. 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 solo están basadas 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 control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

5.4. Resultados obtenidos para el Objetivo General de la Investigación

El objetivo general de esta investigación: *Proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en la evaluación del monitoreo para mejorar la evaluación de los EIA lo que permitirá tomar medidas para reducir los impactos y reducir los efectos de la contaminación*, se cumple o lleva a cabo integrando los resultados de los objetivos específicos 1, 2 y 3 en una propuesta de control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

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 estudios de impacto ambiental (EIA) consta de siete (7) etapas, las cuales se describen continuación.

El diagrama de flujo detallado con procedimiento de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) que se propone en este estudio se muestra a continuación en la Figura 13:

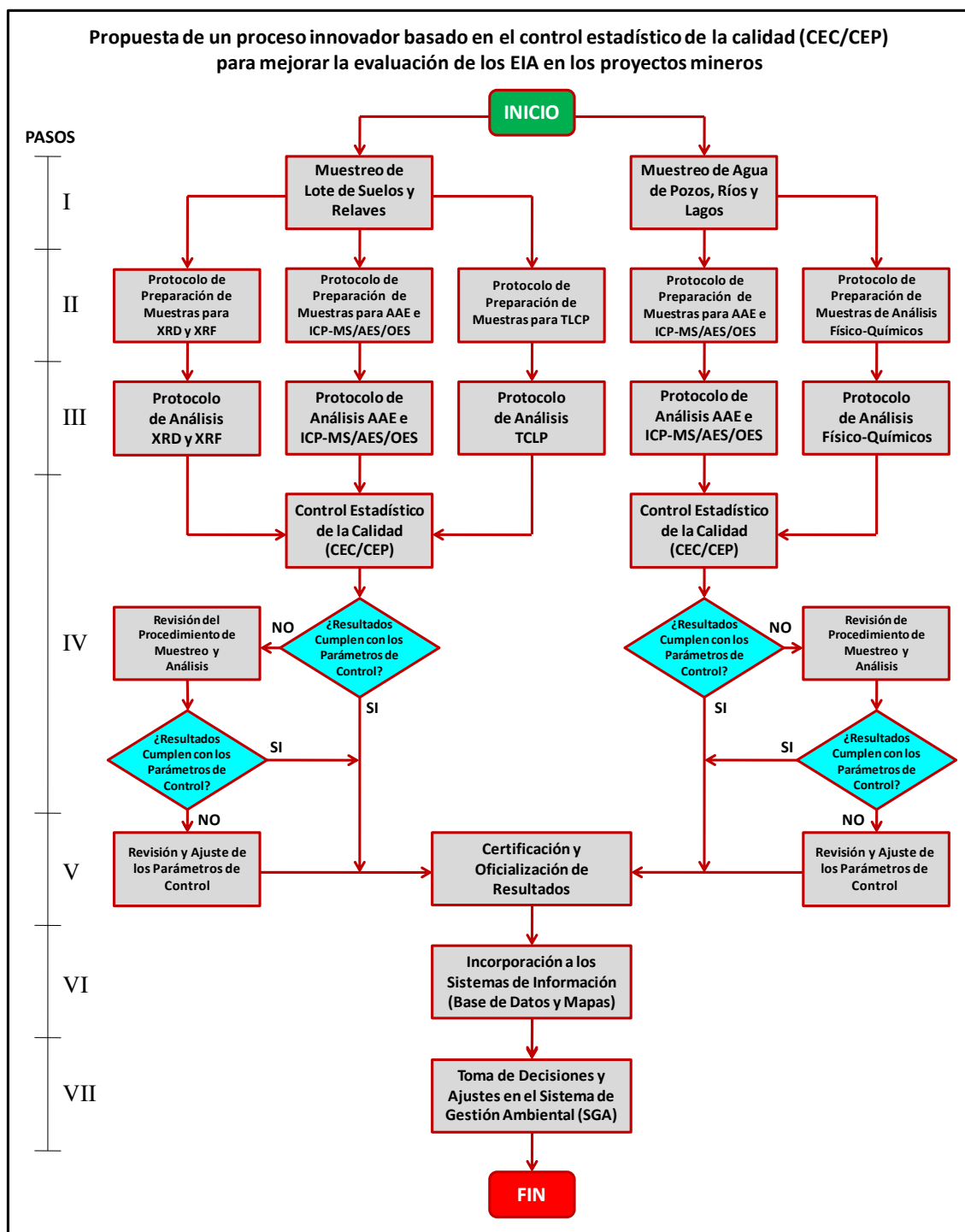


Figura 13. Propuesta de un proceso innovador basado en el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) para mejorar la evaluación de los EIA en los proyectos mineros. Fuente: Elaboración Propia.

5.4.1. 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 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 el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) se pueda aplicar con eficacia 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:

- 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 evaluar la precisión de los ensayos, que depende tanto de la exactitud del método analítico como 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.

Todas las muestras deben ir debidamente identificadas, pesadas, y de ser posible, determinadas su humedad y densidad. Estos parámetros son reportados en un documento elaborado por el laboratorio que realiza los análisis. Luego realizados los análisis requeridos, el informe de resultados se le entrega a la empresa operadora cliente o el departamento que requirió los análisis, los cuales revisarán en detalle el informe y los resultados, y de estar conformes emitirán un memorándum o carta de conformidad.

Esta formalidad permite mantener un control de calidad constante y optimizar los procesos, y con ello, facilita la posterior evaluación de áreas de prospección o explotación y la valorización de los recursos minerales para facilitar las transacciones comerciales.

5.4.2. 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 (como los sedimentos de lotes de suelo y relaves) requieren una preparación diferente a las muestras en estado líquido (como el agua de pozos, ríos, lagos y lagunas).

5.4.2.1. Protocolo de Preparación de Muestras en Estado Sólido

A. Preparación General para las Muestras en Estado Sólido

Las muestras de rocas o suelos, seleccionadas para estudios geoquímicos, deben ser sometidas a un tratamiento mecánico, el cual consiste de 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. La preparación mecánica es una fase delicada del trabajo, susceptible a sufrir contaminación de la muestra tratada con otras muestras o con los materiales utilizados durante el proceso, es por ello que se deben extremar las medidas para evitar el riesgo.

Antes de comenzar con la preparación de las muestras, se recomienda hacer limpieza general del sitio donde va a ser tratada la muestra. Se lavan y limpian trituradoras, molidoras y herramientas manuales antes y después de tratar cada una de las muestras. También eliminar las zonas superficiales de las rocas que hayan sufrido alteración. En este paso debe utilizarse equipo de seguridad como guantes y anteojos protectores para evitar accidentes.

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.

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.

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 se 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, 2020).

Durante el proceso de molienda se genera calor, se debe evitar el sobrecalentamiento. Los materiales sensibles al calor (como los carbonatos y las sales) deben ser molidos a mano. Antes de usar el molino, el operador debe asegurarse de que está perfectamente limpio y seco.

Cuarteado y Homogenización

El cuarteado y homogeneización permite obtener micro-muestras o alícuotas representativas de la muestra original. Esta operación debe realizarse rápidamente y con la mínima exposición al ambiente. Para tal fin, mezcle la muestra perfectamente 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 usada en los análisis y su tamaño deberá 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).

Mezcle el material y apílelo 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. Estos procesos se repiten varias veces hasta obtener el tamaño apropiado para los análisis. Es recomendable siempre realizar el cuarteado y homogenización de las muestras sin importar su cantidad inicial.

Verificación de Propiedades

Luego, las muestras son llevadas al área de balanzas, en donde es tomada una porción de la misma para efectuársele una verificación de sus propiedades, ya que si la muestra no cumple con las características requeridas (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, 2020).

Para la determinación de humedad de la muestra, se realiza la prueba por un método gravimétrico; es decir, que la determinación de la masa del agua se efectúa por la diferencia en peso entre la masa de la muestra sólida húmeda y la masa de la muestra sólida seca. El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad de muestras de rocas o suelos. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo. Se considera como muestra sólida seca aquella que ha sido colocada en la estufa a 105°C hasta obtener peso constante. (Buscar autor). El método gravimétrico se resume a continuación:

- Pesar la muestra previamente pulverizada y homogeneizada
- Calentar nuevamente a 105° por 10 o 15 minutos
- Pesar nuevamente la muestra y registrar el cambio de peso
- Repetir el proceso hasta que la muestra no presente variaciones de su peso.

B. 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 físico-química, es colocar y compactar las muestras dentro del porta-muestras del equipo que se va a utilizar.

El porta-muestras para el difractor 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, 2020).

Si se van a efectuar análisis XRF por fusión, la muestra pulverizada se mezcla con fundentes de boratos (litio o sodio) en un crisol de 95% platino / 5% oro, posteriormente se calienta alrededor de los 1000 °C con agitación hasta que las sales de boratos se funden, momento en el cual la muestra se disuelve homogéneamente en el fundente fundido. La mezcla fundida se vierte en moldes y se enfría, resultando en un disco vítreo, que es el que va a ser analizado en el equipo de espectrometría de XRF (González, 2019).

El análisis XRF por fusión presenta ciertas ventajas sobre los análisis XRF convencionales con pastillas prensadas. No es afectado por el efecto mineralógico o el tamaño de partícula. La fusión permite distribuir homogéneamente la muestra en la matriz vítrea formada por el fundente de boratos. Esto conduce a resultados analíticos vía XRF que son muy exactos, repetibles y precisos ya que no son afectados por partículas de diferentes tamaños aleatoriamente distribuidas, como sucede en el caso de las pastillas prensadas. Adicionalmente, con la fusión, la matriz vítrea permanece consistente, de manera que no tiene impacto en los análisis, lo cual conduce a la obtención de excelentes resultados. Esto es también la clave para una fácil calibración con estándares sintéticos (González, 2019).

C. 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.

Luego de que las muestras son secadas, pulverizadas, homogeneizadas y verificadas exitosamente sus propiedades físico-químicas, se coloca la muestra en un vaso de precipitado para preparar una solución con ácido clorhídrico y ácido nítrico para posteriormente ser llevado a calentamiento. De la muestra sólida a analizar se deben pesar de 0,3 gramos (muestras con muy poca humedad) a 0,5 gramos (muestras con alto contenido de humedad). Se le añaden 4 ml de ácido nítrico concentrado (o 6 ml de ácido clorhídrico HCl al 15%) y 1 ml de agua oxigenada H₂O₂ al 33%. Se llevan a un tubo de ensayo de 25 ml, se tapan con sus tapones pertinentes.

Duane (1996) afirma que el agua regia caliente (180°C), con la adición de ácido perclórico, H₂ClO₄ parece ser un mejor medio para extraer rápidamente metales pesados que una lixiviación con ácido nítrico caliente HNO₃ (180°C). Este estudio demostró que el análisis químico destructivo no siempre proporciona el resultado correcto debido a la lixiviación incompleta de la muestra en el proceso de digestión ácido.

Tras media hora de espera se introducen los tubos en el reactor del microondas para su digestión. Para la mineralización de la materia orgánica se someten las muestras a altas presiones y temperaturas en tubos cerrados. Se colocan los tubos de ensayo en el reactor del microondas con la siguiente rampa de temperatura y presiones: se comienza con una presión de 40 bar y vamos subiendo la presión a 10bar/minuto durante 30 minutos, alcanzamos 220°C y mantenemos a esa temperatura durante 20 minutos. Posteriormente enfriamos el reactor y paramos la potencia para poder eliminar presión poco a poco.

Una vez enfriado el reactor y liberada toda la presión se abre el reactor y se sacan los tubos. Se limpia y seca el reactor con papel y finalmente con spray de silicona. Los tubos de la digestión se enrasan en tubo de doble aforo a 25mL con agua destilada. Se homogenizan y se dejan reposar. Se llenan los tubos de ensayo que se van a utilizar en el ensayo y los que se van a guardar como testigos. De esta forma, ya las muestras están listas para ser analizadas. Junto a las muestras se realiza un blanco con agua destilada y una muestra de control.

Las concentraciones de los elementos a medir en las muestras puede que se presenten en concentraciones muy altas, en este caso se recomienda hacer diluciones de la muestra que resulten apropiadas. Estas diluciones se realizarán tomando el agua destilada como disolvente. Pero en el caso de que se quieran detectar los elementos trazas, el enrase después de la digestión en lugar de realizarlo a 25 ml lo realizamos a 10 ml, con el fin de tener una menor dilución. Las diluciones finales de las muestras se pueden preparar por volumetría o gravimetría. Es importante reseñar que se aconseja preparar las diluciones por gravimetría, ya que es un procedimiento más exacto.

Las diluciones y las pesadas de la muestra, así como los volúmenes de ácido indicados son referenciales, ya que pueden depender del tipo de microondas y de la instrumentación elegida. Las preparaciones de las muestras son estables, al menos, durante 48 horas en condiciones de refrigeración. El laboratorio puede establecer una estabilidad mayor siempre que haga las comprobaciones necesarias, que pueden consistir en analizar una muestra el día de su preparación y repetir el análisis tras unos días, comprobado que los resultados no varían más que el límite establecido para la reproducibilidad.

D. Preparación de las Muestras para Análisis TLCP

El ensayo TCLP se realiza según el estándar U.S. EPA-1311 (SW-846). Este procedimiento ha sido diseñado para determinar las características de toxicidad por lixiviación. El método TCLP determina la movilidad de los contaminantes inorgánicos presentes en una muestra y si los filtrados generados dan lugar a clasificar el material como peligroso. Dentro de las fases identificadas

se tienen las fases solubles o biodisponibles de cada elemento, dimensionando así el real impacto que causa sobre los seres vivos.

Para la preparación de las muestras adecuadas para aplicarles el método TCLP, se pesan 50 gr de muestra de residuos. Determinar los porcentajes y pesos de la fase sólida y líquida de la muestra 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.

Generalmente las muestras de sedimentos de lotes de suelo y de relaves presentan un contenido de sólidos mayor a 75%. Si la muestra es totalmente sólida su contenido de sólidos es de 100% (no contiene fase líquida). El líquido resultante de este primer filtrado se denomina "Líquido Fase I". Reducir el tamaño de las partículas de la fase sólida, fraccionando y moliendo. Luego de esto, pasar a la determinación del tipo de fluido de extracción que se va a utilizar.

5.4.2.2. Protocolo de Preparación de Muestras en Estado Líquido

A. Preparación de Muestras para Análisis Físico-Químicos Convencionales

Las muestras de agua que van a ser sometidas a análisis físico-químicos convencionales para la detección de los componentes químicos del agua no requiere 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 físico-químico se utilizarán envases de plástico o vidrio, con buen cierre, nuevos. Si se va a reutilizar un envase,

deben desestimarse envases que hayan contenido agua contaminada, combustibles, soluciones concentradas, etc., únicamente podrían reutilizarse envases de agua mineral o envases de gaseosa muy bien lavados. En todos los casos debe asegurarse que el envase se encuentre limpio, pero debe prestarse especial atención a no lavarlo con detergentes, hipoclorito de sodio (lavandina) u otros reactivos: el envase sólo puede ser enjuagado con agua (Fundación Nacional de Salud de Brasil, 2004).

Se recomienda que previamente a la toma de la muestra, deberá enjuagarse por lo menos tres veces con el agua a muestrear. La cantidad de muestra necesaria para un análisis físico-químico es de aproximadamente 1000 ml (1 litro) como mínimo. Si fuera necesario muestrear para algún análisis que requiriera del agregado de un reactivo específico para la conservación de la muestra, deberá preverse la toma en envases adicionales de menor capacidad (Fundación Nacional de Salud de Brasil, 2004).

B. 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. Las muestras líquidas se transfieren a un tubo de ensayo para su análisis eliminando las partículas que puedan contener con un filtrado si es necesario. (MET-ICPI). 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 %).

Si se observan muchos residuos en suspensión, la acidificación será, como mínimo al 2%. Después de la acidificación se esperará un tiempo mínimo de 24 horas. Tras este tiempo, si todavía es necesario, se puede filtrar la muestra con

filtros de 0,45 micras o efectuar una centrifugación previa de la muestra entre 3000-5000 rpm, tomando el sobrenadante e indicando en el informe de ensayo que el resultado corresponde a la fracción soluble obtenida tras filtrar o centrifugar la muestra 24 horas después de su acidificación.

5.4.3. Paso III: Ejecución de los Protocolos de Análisis 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 (como los sedimentos de lotes de suelo y relaves) requieren una preparación diferente a las muestras en estado líquido (como el agua de pozos, ríos, lagos y lagunas).

5.4.3.1. Protocolos de Análisis de Muestras en Estado Sólido

A. Protocolo General de Análisis de Muestras en Estado Sólido

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 validos dentro de un rango de control estadístico y límites de detección (LD) y límites de cuantificación (LC).

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. Luego describiremos los procedimientos adicionales al protocolo general que corresponde a cada uno de los métodos analíticos que se mencionaron anteriormente.

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 para generar una línea base en blanco. (dark current scan).

Calibración y Corrección de Interferencias

Las técnicas analíticas más comúnmente utilizadas en los laboratorios de la precisan de materiales de referencia certificados para su calibración. Para la calibración instrumental de los diferentes equipos se elaboran curvas de calibración, con muestras minerales o soluciones (reactivos) de concentración conocida, para encontrar la ecuación de la recta que luego permitirá establecer la concentración de una solución desconocida mediante interpolación.

Una curva de calibración se puede realizar utilizando el método de dilución del elemento o isótopo utilizado como estándar interno, el mismo que debe ser preparado periódicamente para cubrir el intervalo de concentraciones del analito, cualquier desviación del patrón respecto a la curva de calibración original puede ser utilizada para corregir la lectura analítica, generando resultados confiables y replicables.

El uso de curvas de calibración basadas en intensidades relativas del analito respecto a una concentración fija de un elemento o isótopo añadido como estándar interno, es muy empleado para compensar efectos remanentes no específicos de la matriz de las muestras, así como otros efectos que provocan interferencias, tales como variaciones en la sensibilidad del instrumento, eficiencia en la nebulización, etc. Por otro lado, la correcta sintonización del equipo permite optimizar la sensibilidad, verificar la correcta calibración y minimizar las interferencias.

Control del Estándar Interno

Un estándar interno es una sustancia química o elemento (isótopo) que se le agrega en una cantidad constante a las muestras que se van a analizar, el blanco y los estándares de calibración. La selección de un isótopo para ser utilizado 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 exactamente su contenido y se tenga en cuenta a la hora de equiparar los contenidos totales.

El uso de un isótopo como estándar interno se puede aplicar para el caso del análisis de muestras en estado sólido, y en este caso, normalmente, se selecciona un isótopo presente en la matriz de las muestras con muy poca abundancia natural. Otro requisito que se debe cumplir en la selección del isótopo de estándar interno es que no puede presentar ninguna interferencia isobárica, ni tampoco generarla sobre los isótopos que se van a analizar.

Tanto en el caso de que el isótopo que se vaya a utilizar como estándar interno sea añadido, como en el que sea un isótopo natural, debe tenerse en cuenta que su nivel de concentración ha de ser tan alto como para poder ser medido por la técnica y, además, que su masa y su energía de ionización sean lo más parecidas posible a la de los elementos que se quieren analizar.

Uno de los elementos más utilizados como estándar interno, en análisis ICP-MS, es el Rh. Esto es debido a que su masa se encuentra en el centro del rango de masas (103), a que su potencial de ionización es también intermedio (7,20 eV), a que se trata de un elemento monoisotópico, y a que es un elemento que rara vez se encuentra de forma natural en las muestras.

B. 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, como el modelo D8 Advance de Bruker AXS, hasta los más novedosos, que solo requieren una configuración básica (poseen mayor grado de automatización), de tamaño compacto, incluso pueden ser transportables, como el modelo TERRA II de Olympus (ver Figura 14).



Figura 14. 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. Fuente: 1) IPICYT-LINAN (2016) y 2) Página Web de Olympus.

Entre los procedimientos adicionales que deben realizarse durante los análisis de XRD, está la corrección por error de desplazamiento y asimetría, y la selección 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. Estos equipos incorporan un sistema de

accionamiento de goniometría de bucle cerrado de alta resolución, óptica de haz transversal, un brazo de dispersión en el plano y un generador de ánodo rotativo opcional.

De la misma manera, se debe seleccionar la modalidad de funcionamiento, la cual puede ser cualitativo o semi-cuantitativo. En los análisis XRD cualitativos, todas las fases identificadas por el difractómetro se reportan y se agrupan en cantidades grandes (>30%), moderadas (10-30%), pequeñas (2-10%) y mínimas (<2%). La identificación y la clasificación de las concentraciones se basan en las alturas máximas relativas y en la estructura cristalina del mineral.

En los análisis XRD semi-cuantitativos, todos los minerales identificados por análisis de difracción de rayos X se reportan y se agrupan en cantidades grandes (>30%), moderadas (10-30%), pequeñas (2-10%) y mínimas (<2%). Además, las concentraciones de minerales (en % de peso) generadas por los análisis XRD-RIR (o Rietveld) se combinan con un análisis integral de la roca y se presentan en informes.

Es recomendable que los operadores de los equipos sean entrenados por personal de experiencia con el fin de que dominen muy bien todo el procedimiento, para garantizar obtener resultados confiables. Así mismo, se recomienda que cuando los operadores tienen ya experiencia en el manejo de los equipos también entrene a personal sin experiencia con la finalidad de garantizar la transferencia de conocimientos y el relevo del personal en caso de alguna emergencia o acto imprevisto.

C. 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, los hay convencionales y fijos, con una exactitud alta, como el Philips PW1606, pero también se disponen de tecnologías mucho más

novedosas, de tamaño compacto, incluso algunos equipos pueden ser transportables (sistemas de mesa), como el modelo TERRA II de Olympus y otros son portátiles (de mano) como el XRFP y Vanta de Olympus, y el Innov-X Systems de Alpha (ver Figura 15).



Figura 15. Modelos de equipos de fluorescencia de rayos X (XRF).
Fuente: Ministerio del Ambiente de Perú (2016).

D. Protocolo Adicional de Análisis AAS

La espectrometría de absorción atómica (AAS) para la detección de elementos es una técnica extremadamente sensible, y específica debido a que las líneas de absorción atómica son considerablemente estrechas (de 0,002 a 0,005 nm) y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento (Skoog et al., 2001). En la actualidad, existen varios tipos de análisis basados en la espectrometría de absorción atómica (AAS), entre las cuales tenemos: la absorción atómica por atomización con llama (F-AAS), con atomización

electrotérmica (ET-AAS) y con vapor frío (CV-AAS). En la Figura 16 se muestran algunos equipos que trabajan con AAS.



Figura 16. Modelos de equipos de espectrometría de absorción atómica.

Fuente: Gallegos (2012)

La instrumentación básica para los equipos AAS está compuesta de un atomizador para producir los átomos excitados de la sustancia a analizar, una fuente de radiación monocromática o policromática, un monocromador para configurar la longitud de onda de la radiación que caracteriza a los elementos que se pretenden analizar, un detector sensible a la radiación emitida y un procesador de la señal de salida o lecturas del equipo (Gallegos, 2012).

Una vez que se obtiene la muestra lista para ser empleada en el equipo AAS, se debe elegir la longitud de onda adecuada para la identificación de los elementos de interés (por ejemplo, el plomo, que es de 217,0 nm), y para la corrección de la radiación de fondo se utiliza una lámpara de deuterio. Para eliminar interferencias negativas en la técnica de AAS tanto de los patrones como de las muestras se utiliza ácido etilen-di-amino-tetra-acético (EDTA) a una concentración de 0,1 mol/l.

De manera general, el funcionamiento del equipo AAS es el siguiente: el haz que es emitido por la fuente atraviesa el sistema de atomización que contiene la muestra en estado de gas atómico (plasma), ésta llega al monocromador que excluye la radiación que no interesa para el análisis,

pasando entonces al revelador o detector de la radiación absorbida, que luego es procesada y amplificada, proporcionando una lectura de salida como resultado, que corresponde al porcentaje de metales contenidos en el producto final (Gallegos, 2012).

E. Protocolo Adicional de Análisis ICP-MS/AES/OES

En el procedimiento de análisis de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o sus variantes de emisión atómica y óptica (IPC-AES/IPC-OES) para la determinación de elementos, se deben considerar los siguientes protocolos adicionales:

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, donde la bomba peristáltica comienza a funcionar y comienza a aspirar la solución preparada que contiene el analito, dejando estabilizar durante 40 a 60 minutos. Seguidamente se verifica que la bomba de vacío esté encendida, la presión de gas argón, el agua de enfriamiento y el ajuste de la bomba peristáltica para la introducción de la muestra (Vanina. 2019).

Posteriormente se realiza la calibración de la longitud de onda automáticamente. A continuación, se realiza la alineación de la antorcha, donde el equipo comienza a realizar una curva mediante lecturas en diferentes zonas del plasma determinando el punto de mayor intensidad.

En términos generales, el funcionamiento es el siguiente: la muestra en forma líquida es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente eléctrica de alta frecuencia (Vanina, 2019).

En el interior del equipo, el plasma puede llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000°K (7726°C). En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Luego, cada una de las masas ionizadas se dirige al detector, donde se evalúa su abundancia en la muestra. No se analizarán muestras que contengan ácido fluorhídrico, ya que se podrían dañar las partes internas del equipo (Página Web de la Universidad de Burgos).

La concentración del analito se calcula en función de las alturas de los picos. Esas alturas se llevan a concentraciones por medio del uso de una curva de calibración que se construyó con los patrones del elemento de interés en el rango adecuado. Por último, se realiza los cálculos finales, el análisis de los datos obtenidos y se genera el informe de los resultados (Vanina, 2019). En la actualidad existen varios tipos de equipos que funcionan con plasma acoplado inductivamente, algunos de ellos se muestran en la Figura 17 a continuación:



Figura 17. Modelos de equipos de espectrometría basados en plasma acoplado inductivamente.
Fuente: (Universidad de Málaga).

F. Protocolo de Análisis TCLP

El ensayo TCLP se realiza según el estándar U.S. EPA-1311 (SW-846). Este procedimiento ha sido diseñado para determinar las características de toxicidad por lixiviación. El ensayo TCLP determina la movilidad de los contaminantes inorgánicos presentes en una muestra y si los filtrados generados dan lugar a clasificar el material como peligroso. Dentro de las fases identificadas se tienen las fases solubles o biodisponibles de cada elemento. Luego de tener la muestra preparada, el siguiente paso en el protocolo del método TCLP es determinar el tipo de fluido lixivante que se utilizará en el ensayo de extracción. Este se determina basándose en la capacidad de neutralización ácida del material de la muestra.

Para determinar el tipo de fluido de extracción, se debe agregar 5 gr de muestra previamente molida a un frasco de erlenmeyer, agregar 96.5 ml de agua destilada y 3.5 ml de HCl, tapar y revolver por 5 minutos usando un agitador magnético. Luego registrar el pH, si el pH es mayor a 5.0 se debe utilizar el Fluido de Extracción No. 1, y si el pH es menor a 5.0 se debe utilizar el Fluido de Extracción No. 2.

El Fluido de Extracción No. 1 se prepara diluyendo 5,7 ml de ácido ascético concentrado (17,5N) a 500ml de agua destilada y se adicionan 64.3 ml de hidróxido de sodio (1N) diluido en un volumen de 1 litro de agua destilada. El pH resultante debe ser de 4,88 a 4,98. El Fluido de Extracción No. 2 se prepara diluyendo 5,7 ml de ácido ascético concentrado (17,5N) a un volumen de 1 litro de agua destilada. El pH resultante debe ser de 2,83 a 2,93. Luego se determina la cantidad de fluido de extracción que se utilizará en el ensayo. Para tal fin, utilizar una relación 20:1 con respecto a la fase sólida de la muestra, como se detalla en la Tabla 5:

Tabla 5. Cantidad de fluido de extracción por peso de fase sólida de la muestra.

Peso de la Muestra	Porcentaje de la Fase Sólida	Peso de la Fase Sólida	Peso de la Fase Líquida	Volumen de Fluido de Extracción	Volumen de Líquido Total
50 gr	50%	25,0 gr	25,0 gr	475 ml	500 ml
50 gr	75%	37,5 gr	12,5 gr	737,5 ml	750 ml
50 gr	100%	50,0 gr	---	1000 ml	1000 ml

Fuente: Elaboración Propia.

Pesar el recipiente de vidrio que se utilizará en el extractor antes de realizar el análisis. Agregar la muestra y el líquido de extracción al recipiente de vidrio y cerrarlo. Montar recipiente de análisis en el extractor rotatorio.

Efectuar el ensayo de extracción, configurando el extractor rotatorio (ver Figura 18) con una rotación de 30 RPM por 18 a 20 horas. Después de 18 a 20 horas de extracción, separara el material contenido en el recipiente de extracción en sus componentes líquido y sólido. Filtrar a través de un filtro de papel de 1 a 1,5 micras y seguidamente con un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8 micras. El líquido resultante de esta filtración se denomina “Extracto de TCLP” o “Líquido Fase II”. Registrar y comprara los pH del “Líquido Fase I” y del “Líquido Fase II” o “Extracto”. Cabe destacar que en muestras sólidas no existe “Líquido Fase I”, en cuyo caso se descarta esta comparación.

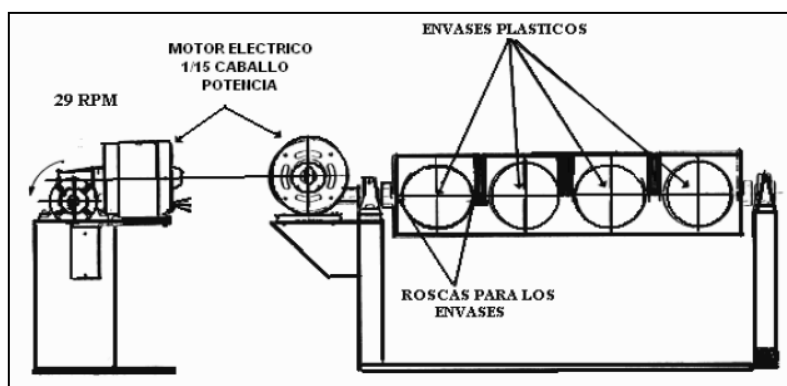


Figura 18. Esquema de funcionamiento del extractor rotatorio.
Fuentes: Boada (2004).

Al finalizar el ensayo, someter al “Extracto de TCLP” a una detección de metales pesados por análisis AAS, ICP-MS o ICP-AES, utilizando el protocolo de muestras en estado líquido. A continuación, en la Figura 19 se muestran algunos equipos extractores que actualmente se utilizan en ensayos TCLP.



Figura 19. Modelos de equipos extractores para ensayos TCLP. 1) Modelo de Labments Equipments (China), 2) Modelo de Green Lab Equipments (India).
Fuentes: Boada (2004).

5.4.3.2. Protocolo de Análisis de Muestras en Estado Líquido

A. Protocolo de Análisis Físico-Químicos 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 no dejan de tener importancia, ya que 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 de las muestras de agua.

Los principales análisis físico-químicos convencionales del agua incluyen: temperatura, pH, alcalinidad total, dureza total, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos totales disueltos y en suspensión, cromatografía de intercambio iónico, contenido de cloruros, contenido de sulfuros y gas carbónico disuelto o libre (Fundación Nacional de Salud de Brasil, 2004).

Existen otras pruebas bacteriológicas del agua que también son importantes en la evaluación de la contaminación ambiental, pero que no se clasifican como análisis físico-químicos, entre las cuales se tienen: coliformes totales, coliformes termotolerantes, recuento de bacterias heterotróficas, coliformes totales, coliformes termotolerantes, coliformes totales y *Escherichia coli*. (Fundación Nacional de Salud de Brasil, 2004). Este tipo de análisis no son objeto del alcance de esta investigación.

Los protocolos de análisis físico-químicos convencionales, sobre todo los relacionados con la hidroquímica, están muy bien documentados desde hace bastante tiempo y no serán detallados en este trabajo. El listado de los principales análisis físico-químicos del agua se mencionan a continuación en la Tabla 6:

Tabla 6. Principales Análisis Físico-Químicos Convencionales.

Parámetro	Características Principales	Método de Análisis Físico-Químico
Temperatura	Cantidad de calor en el agua. Influye en todas las propiedades de agua, especialmente en la conductividad eléctrica y la solubilidad de las sales.	Termómetro
pH	Grado de acidez del agua representa la concentración de iones de hidrógeno en una solución. El valor del pH varía de 0 a 14. Por debajo de 7 el agua es considerada ácida, por arriba de 7 es alcalina. El agua con pH 7 es neutra.	pH-metro
Alcalinidad Total	Capacidad del agua para neutralizar el ácido. Equivale a la totalidad de hidrógeno (iones ácidos) presentes en el agua. Se calcula por la suma de la concentración de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, expresada en términos del carbonato de calcio.	Titulación con Ácido Sulfúrico
Dureza Total	Se refiere a la suma de las concentraciones de iones calcio y magnesio en el agua, expresados como carbonato de calcio. Está relacionado con el contenido de carbonatos disueltos en el agua	Titulación con EDTA
Conductividad Eléctrica	La conductividad es la medida de la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Proporciona una evaluación de la concentración total de iones disueltos en el agua.	Conductímetro
Turbidez	Presencia de materiales sólidos en suspensión, que reducen su transparencia. Puede ser provocada por la presencia de sustancias orgánicas o inorgánicas.	Método Nefelométrico (con turbidímetro)
Sólidos Totales, Disueltos y en Suspensión	Representa la concentración total de sustancias orgánicas o inorgánicas presentes en el agua, tanto disueltas como en suspensión.	Filtrado y Método Gravimétrico
Cromatografía de Intercambio Iónico	Proceso que permite la separación de iones y moléculas polares, basado en las propiedades de carga de las moléculas. Ayuda a la concentración de aniones y cationes de una muestra de agua.	Método de las Resinas de Intercambio Iónico
Cloruros	Los cloruros están presentes en forma de cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de magnesio. Está relacionado con el contenido de sales disueltas en el agua.	Titulación con Nitrato de Plata
Sulfuros	El sulfuro se encuentra con frecuencia en aguas subterráneas especialmente en aguas termales. En el agua los sulfuros disueltos se encuentran en forma de H_2S , HS^- o como $S=$ depende del pH.	Método Yodométrico (con yodo)
Gas Carbónico Disuelto	CO_2 disuelto en el agua. El gas carbónico contenido en el agua puede contribuir significativamente en la corrosión de las estructuras metálicas. Su contenido generalmente es mayor en aguas subterráneas que en aguas superficiales.	Titulación con Hidróxido de Sodio

Fuente: Fundación Nacional de Salud de Brasil (2004)

B. 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, descrito en el punto 5.4.3.1, Apartado C.

5.4.4. Paso IV: Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP) sobre los Resultados de los Análisis de las Muestras

5.4.4.1. Proceso de Validación de los Resultados

Es importante asegurar que los parámetros de calidad, obtenidos en el proceso de validación, se sigan manteniendo a lo largo del tiempo en el trabajo de rutina de aplicación de nuestro método analítico en el laboratorio. Esto se alcanza mediante un conjunto de actuaciones que permitan garantizar la calidad de los resultados en condiciones normales y que también permitan detectar posibles causas de errores analíticos.

Por tanto, debe existir una estrecha relación entre validación y evaluación de la calidad de los ensayos, estableciendo para ello una serie de controles de calidad internos y unos criterios de aceptación en cada serie analítica. Se debe recordar que la veracidad se expresa cuantitativamente en términos de “sesgo” y que puede determinarse:

- a) Comparando la respuesta del método frente a un material de referencia certificado con un valor conocido
- b) Comparando la respuesta frente a un método de referencia normalizado
- c) Con el uso de la técnica de la adición/recuperación.

En cada serie analítica (cada 10 o 20 muestras) se debe verificar que se siguen manteniendo la exactitud y el sesgo requerido y que, debido a la posible ausencia de materiales de referencia certificados (procedimiento excesivamente costoso), se puede comprobar mediante la técnica de adición/recuperación.

5.4.4.2. Reducción del Grado de Incertidumbre de los Resultados

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. Para ello se utilizan las herramientas del control estadístico de la calidad (CEC), tales como análisis de variabilidad del contenido de componentes minerales metálicos de las muestras, gráficos de control para los componentes contaminantes (minerales pesados y otras sustancias químicas como el mercurio y el cianuro) y regresiones lineales entre los componentes de minerales no metálicos para identificar correlaciones.

El control de la variabilidad de las concentraciones de elementos contaminantes en las muestras de suelos y/o de aguas través de los gráficos de control 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 muestreo y/o análisis.

Si en los gráficos de control de los resultados de las concentraciones de elementos contaminantes se presentan valores dentro de los límites de control superior (LS) e inferior (LI), se dice que dichos parámetros se encuentran 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. Si al revisar los procedimientos de muestreo y análisis de la muestra se verifica que se siguió con los protocolos recomendados, entonces se procede a efectuar una revisión de los límites superior (LS) e inferior (LI) de dichos parámetros.

5.4.5. Paso V: Certificación y Oficialización de los Resultados

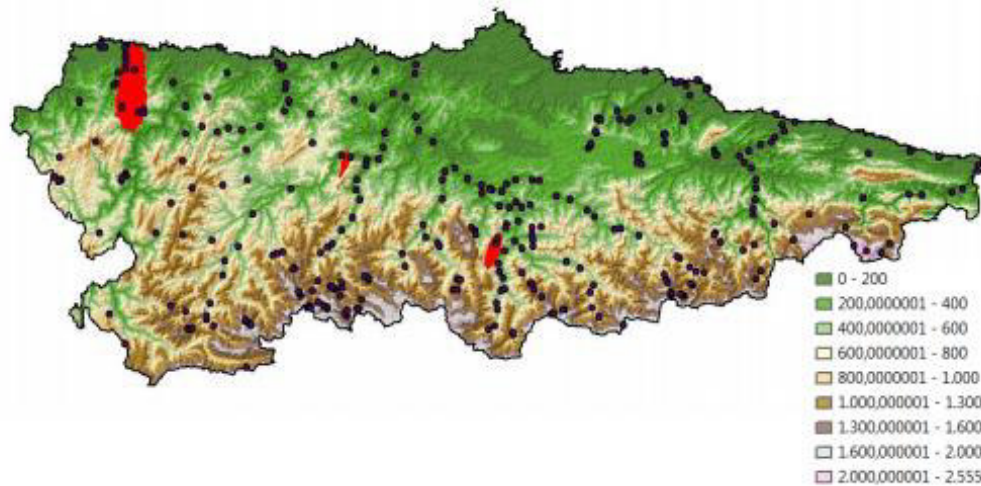
Luego de que los resultados pasen por las pruebas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) se proceden a certificarlos (proceso interno de la empresa operadora) y a oficializarlos (reportarlos ante los organismos o entes gubernamentales reguladores como el MINEM y el MINAM), con el fin de que queden 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, reclamos o litigios.

5.4.6. Paso VI: Incorporación de los Resultados a los Sistemas de Información

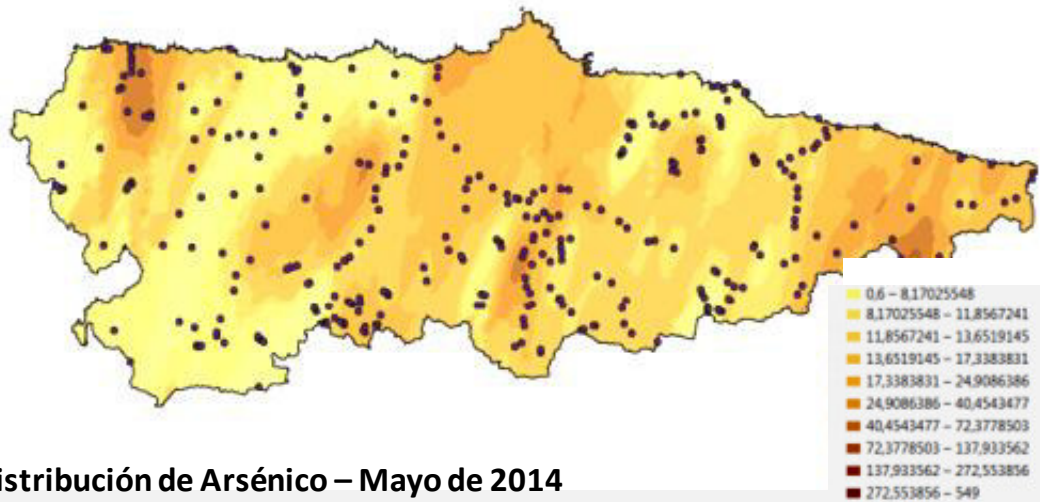
Los datos certificados y oficializados pueden incorporarse ahora a los sistemas de información de la empresa operadora y de los entes gubernamentales, siendo almacenados en bases de datos y graficados dentro de mapas y/o Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permite apoyar en monitoreo de 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, 2015). Este tipo de monitoreo a través de mapas constituye una herramienta muy útil para apoyar los Sistemas de Gestión Ambiental (SGA), sin embargo, su uso aún no ha sido generalizado (ver Figura 20).

Ubicación de Puntos Control con Datos de Contenido de Minerales Pesados



Distribución de Arsénico – Junio de 2011



Distribución de Arsénico – Mayo de 2014

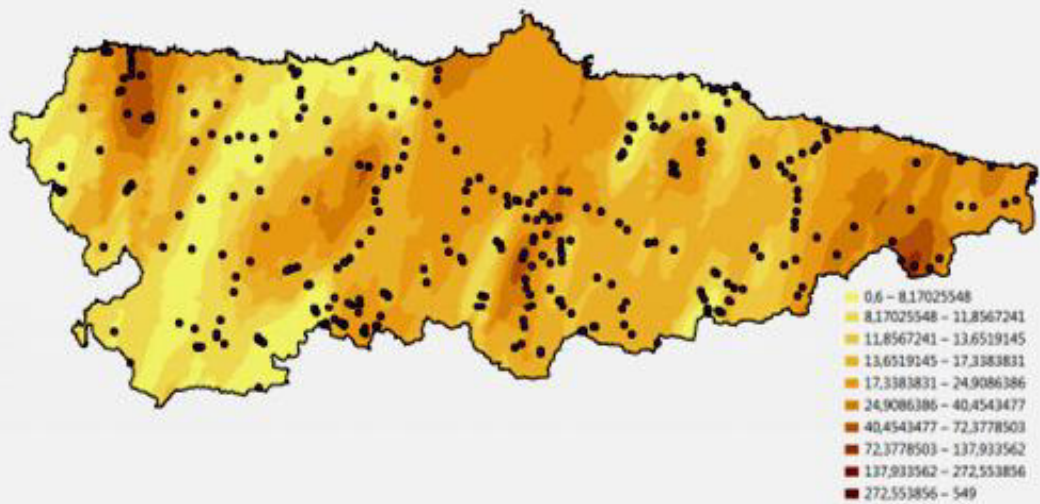


Figura 20. Ejemplo de uso de los sistemas de información Geográfica (SIG) y los mapas de distribución de minerales pesados o sustancias contaminantes. Modificado de: Domínguez (2015).

5.4.7. Paso VII: Toma de Decisiones y Ajustes en el Sistema de Gestión Ambiental

Para que se logre la disminución del grado de incertidumbre en los valores del contenido o porcentaje de metales pesados, resulta necesario establecer un programa permanente de supervisión y control de cada una de las etapas del proceso de extracción, muestreo y análisis.

Una herramienta adicional que puede utilizarse dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) es el modelo conceptual del sitio, el cual es la herramienta de planificación que organiza la información que ya se conoce sobre el sitio; el modelo ayuda a identificar información adicional que debe obtenerse para realizar la evaluación.

El proceso de planificación sistemática enlaza las metas del proyecto a actividades individuales necesarias para alcanzar esas metas, mediante la identificación de deficiencias de datos en el modelo. Luego se utiliza el modelo para dirigir la recolección de la información necesaria y permite que el modelo conceptual del sitio evolucione y madure; a medida que progresa el estudio de impacto ambiental (EIA) en el caso de que este sea requerido.

De la misma manera, se construyó un diagrama causa-raíz que permitió identificar las posibles causas de un aumento en la incertidumbre de los resultados de los análisis de sustancias contaminantes en muestras de suelos y agua, el cual se muestra a continuación en la Figura 21.

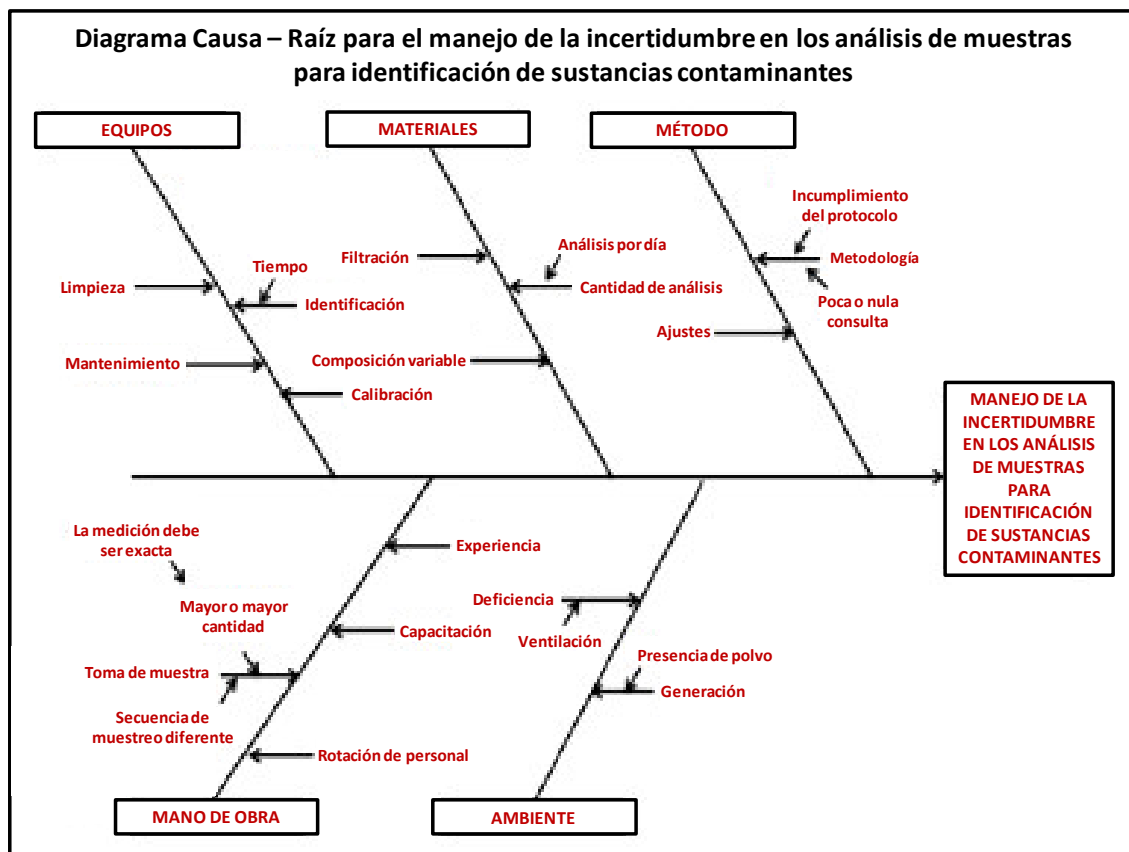


Figura 21. Diagrama Causa – Raíz para el manejo del grado de incertidumbre en los análisis de sustancias contaminantes en muestras de suelos y agua. Modificado de: Andrade (2013).

En el caso de la presente investigación, se presenta como ejemplo un Modelo Conceptual Básico (ver Figura 22), donde se identifican las fuentes potenciales de contaminación que puede desarrollarse a través de un catastro de plantas de beneficio, y donde se intenta identificar otros potenciales focos de contaminación por la presencia de pasivos ambientales, laboratorios de servicio, talleres mecánicos, entre otros.

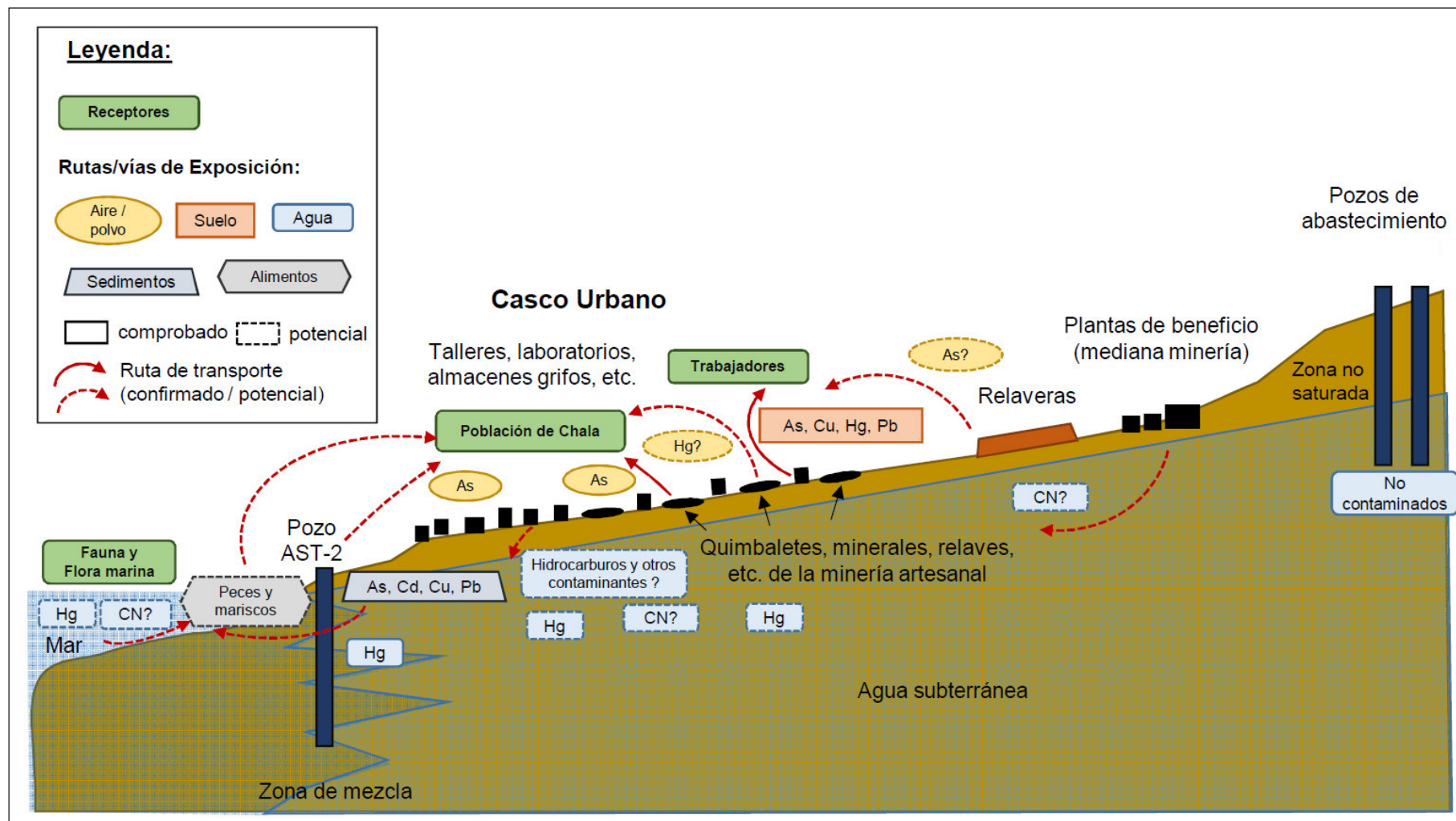


Figura 22. Modelo Conceptual de Diseminación de Contaminantes producidos por la actividad minera en el ambiente. Modificado de: Andrade (2013).

5.5. Contrastación de hipótesis

5.5.1. Contrastación de la hipótesis general

La hipótesis general **H_G** representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que **H₀** es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_G: La implementación del control estadístico de la calidad (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.

H₀: La implementación del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA no 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.

Interpretación

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), que consta de siete (7) etapas, con el fin de mejorar la evaluación de los estudios de impacto ambiental (EIA). Esto permitirá identificar los correctivos necesarios, optimizar la toma de decisiones y realizar los ajustes operacionales requeridos dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de las empresas mineras.

Por consiguiente, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; es decir, se demuestra que: *La implementación del control estadístico de la calidad (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.*

5.5.2. Contrastación de las hipótesis específicas

Hipótesis Específica 1

La hipótesis específica H_{E1} representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que H_0 es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_{E1} : Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.

H_0 : Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú no tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.

Interpretación

En los últimos años, los entes gubernamentales peruanos como el MINEM y el MINAM han multiplicado esfuerzos para que las empresas operadoras y las contratistas mineras cumplan las regulaciones sobre impacto ambiental, pero aún falta mucho por hacer, debido a que se han multiplicado en el Perú las denuncias por contaminación ambiental debido a las actividades mineras.

En consecuencia, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; en este sentido, se concluye que: *Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.*

Hipótesis Específica 2

La hipótesis específica H_{E2} representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que H_0 es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_{E2} : El monitoreo de la variabilidad de los de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los

EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

H₀: El monitoreo de la variabilidad de los de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) no es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

Interpretación

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 desviación estándar relativa (σ/M) es un parámetro de mucha utilidad, ya que permite efectuar comparaciones entre valores de desviación estándar de varios compuestos diferentes.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; de esta manera, se puede afirmar que: *El monitoreo de la variabilidad de los de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.*

Hipótesis Específica 3

La hipótesis específica **H_{E3}** representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que **H₀** es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_{E3}: El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la actividad minera.

H₀: El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) no permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la actividad minera.

Interpretación

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 solo están basadas 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 control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

De esta manera, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; en este sentido, se concluye que: *El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la actividad minera.*

CAPÍTULO VI.

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Discusión de Resultados

En relación al Objetivo Específico 1

Tomando como referencia los resultados conseguidos de la revisión documental, puede afirmarse que los métodos de evaluación de impacto ambiental (EIA) utilizados en los proyectos del sector minero en el Perú son empleados para las medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas. Según el Anuario Minero del Ministerio de Energía y Minas de Perú (2019), la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) atendió 197 informes de estudios de impacto ambiental (EIA), de los cuales el 69,1% (136 informes) fueron aprobados, el 9,1% (18 informes) fueron desaprobados y el 21,8% restante (43 informes) fueron resueltos bajo la categoría de otros (correcciones).

En los últimos años, los entes gubernamentales peruanos como el MINEM y el MINAM han multiplicado esfuerzos para que las empresas operadoras y las contratistas mineras cumplan las regulaciones sobre impacto ambiental, pero aún falta mucho por hacer, debido a que se han multiplicado en el Perú las denuncias por contaminación ambiental debido a las actividades mineras, y en las poblaciones cercanas a las zonas de explotación minera se han reportado un gran número de personas con altos niveles de metales pesados (como arsénico, plomo, mercurio) en la sangre y el cabello (Jaime Tranca, Actualidad Ambiental, Artículo del Viernes 19 de Julio, 2019).

En diciembre de 2019, se presentó el informe del Observatorio de Conflictos Mineros en el Perú (OCM). El informe enfatiza que desde el mes de mayo se ha producido un alza sostenida de la conflictividad social ligada a actividades

mineras. Por supuesto, que muchos conflictos sociales no han tenido mucha resonancia, en medio de la fuerte crisis política que el país ha experimentado durante los años 2019 y 2020, casos como el de Las Bambas, Tía María, entre varios otros, han estado presentes y han requerido en varias ocasiones la presencia de comisiones de ministros.

Paralelamente a los conflictos mineros más notorios, el informe del OCM resalta algunos puntos que constituyen la base de las demandas sociales. Algunos casos han evidenciado la precariedad y la falta de legitimidad de los instrumentos de certificación ambiental: Estudios de Impacto Ambiental, Informes Técnicos Sustentatorios, entre otros, están siendo cuestionados en algunos conflictos como el de Las Bambas y el de Tía María (Observatorio de Conflictos Mineros en el Perú, 2019).

En relación al Objetivo Específico 2

A partir de los resultados obtenidos de la revisión documental, puede aseverarse que el monitoreo de la variabilidad de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

Para el cumplimiento del objetivo específico 2, se analizaron 2 casos de estudio sobre variabilidad de los resultados. La utilización de herramientas del control estadísticos de la calidad (CEC/CEP) tales como los histogramas, la estimación de la mediana (M), la desviación estándar (σ) y la desviación estándar relativa (σ/M) permite obtener un mejor control sobre la variabilidad, en nuestro caso, de las concentraciones de los minerales y elementos contaminantes como los metales pesados.

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 desviación estándar relativa (σ/M) se estima por la relación entre

la desviación estándar (σ) y el valor de la mediana (M), que ayuda a cuantificar la variabilidad, mientras más alto sea este valor, mayor es su variabilidad. Es un parámetro de mucha utilidad, ya que permite efectuar comparaciones entre valores de desviación estándar de varios compuestos diferentes.

Estos resultados están en concordancia con los trabajos de Uscuchagua (2016), Andrade (2013) y el Ministerio del Ambiente de Perú (2016), los cuales indican que el monitoreo de la variabilidad es importante para asegurar el control de calidad de los resultados.

En relación al Objetivo Específico 3

De acuerdo con los resultados derivados de la revisión documental, es posible afirmar que el uso de la técnica del control estadístico de la calidad (CEC/CEP), como los gráficos de control y los gráficos de correlación o regresión lineal, permite evaluar estudios de impacto ambiental (EIA) y ayuda a la toma de decisiones para reducir la contaminación ambiental.

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 solo están basadas 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 control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

Estos resultados están en concordancia con el trabajo de Andrade (2013), el cual afirma que “mediante los gráficos de control se monitorea de forma visual la estabilidad de un proceso, representando la variabilidad de las mediciones para detectar la presencia de un exceso de variabilidad no esperable por puro azar, y probablemente atribuible a alguna causa específica que se podrá investigar y corregir”.

En relación al Objetivo General

Por medio de la integración del marco teórico investigado y los resultados de los objetivos específicos 1, 2 y 3, se pudo cumplir con el objetivo general de esta investigación: *Proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en la evaluación del monitoreo para mejorar la evaluación de los EIA lo que permitirá tomar medidas para reducir los impactos y reducir los efectos de la contaminación*

El procedimiento que se está proponiendo 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 estudios de impacto ambiental (EIA), consta de siete (7) etapas:

- Paso 1: Muestreo
- Paso 2: Ejecución de los Protocolos de Preparación de las Muestras
- Paso 3: Ejecución de los Protocolos de Análisis de las Muestras
- Paso 4: Control Estadístico de la Calidad (CEC/CEP)
- Paso 5: Certificación y Oficialización de los Resultados
- Paso 6: Incorporación de los Resultados a los Sistemas de Información
- Paso 7: Toma de Decisiones y Ajuste

Estos pasos se plasmaron en un flujograma o diagrama de flujo, que consiste en una imagen estructurada de los pasos de un proceso en orden secuencial. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 13.

Es importante resaltar que para que se logre la disminución del grado de incertidumbre en los valores del contenido o porcentaje de metales, resulta necesario establecer un programa permanente de supervisión y control de cada una de las etapas del proceso de extracción, muestreo y análisis. Esto permitirá identificar los correctivos necesarios, optimizar la toma de decisiones y realizar los ajustes operacionales requeridos dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de las empresas mineras.

Estos resultados están en concordancia con los trabajos de Khadour (2010), Andrade (2013), Blanco y Parichagua (2020), y el Ministerio del Ambiente de Perú (2016), en los cuales se presentaron flujos de trabajo que recomiendan implementar en las organizaciones para implementar un sistema de gestión ambiental (SGA), que este basado en el control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

6.2. Conclusiones

Primera

En los últimos años, los entes gubernamentales peruanos como el MINEM y el MINAM han multiplicado esfuerzos para que las empresas operadoras y las contratistas mineras cumplan las regulaciones sobre impacto ambiental, pero aún falta mucho por hacer, debido a que se han multiplicado en el Perú las denuncias por contaminación ambiental debido a las actividades mineras.

En consecuencia, se acepta la hipótesis específica No. 1 del investigador y se rechaza la hipótesis nula; en este sentido, se concluye que: *Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.*

Segunda

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 desviación estándar relativa (σ/M) es un parámetro de mucha utilidad, ya que permite efectuar comparaciones entre valores de desviación estándar de varios compuestos diferentes.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis específica No. 2 del investigador y se rechaza la hipótesis nula; de esta manera, se puede afirmar que: *El monitoreo de la variabilidad de los de los contaminantes por medio del control estadístico*

de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.

Tercera

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 solo están basadas 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 control estadístico de la calidad (CEC/CEP).

De esta manera, se acepta la hipótesis específica No. 3 del investigador y se rechaza la hipótesis nula; en este sentido, se concluye que: *El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la actividad minera.*

Cuarta

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), que consta de siete (7) etapas, con el fin de mejorar la evaluación de los estudios de impacto ambiental (EIA). Esto permitirá identificar los correctivos necesarios, optimizar la toma de decisiones y realizar los ajustes operacionales requeridos dentro del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de las empresas mineras.

Por consiguiente, se acepta la hipótesis general del investigador y se rechaza la hipótesis nula; es decir, se demuestra que: *La implementación del control estadístico de la calidad (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.*

6.1. Recomendaciones

Primera

Al Ministerio de Energía y Minas (MINEM): Implementar las técnicas de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) como un requisito dentro de los instrumentos de gestión ambiental (IGA) o de evaluación de impacto ambiental (EIA) que entregan las empresas operadoras y contratistas mineras, para el monitoreo y control de los procesos relacionados con la cadena productiva de los proyectos mineros, y especialmente, en lo relacionado al monitoreo de compuestos y/o elementos contaminantes como los metales pesados.

Segunda

Al Ministerio de Energía y Minas (MINEM): Mantener actualizada la página web donde se publican los IAG o EIA que han resultado aprobados, debido a que actualmente no se encuentran digitalizados ni cargados todos los informes que se han realizado en los últimos 3 años, lo que dificulta la realización de este tipo de investigaciones.

Tercera

Al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Ministerio del Ambiente (MINAM): Crear un sistema de información geográfica (SIG) de carácter nacional y acceso público (similar al ArcGIS online) donde se publique la información básica de las concesiones mineras (ubicación, límites y áreas) y una base de datos de análisis geoquímicos validados, que incluya los análisis mineralógicos y/o elementales de suelos y aguas, entre otros, de manera que no resulte tan engorroso a los investigadores buscar “datos duros” sobre contaminación ambiental por compuestos y/o elementos como los metales pesados.

Cuarta

Al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Ministerio del Ambiente (MINAM): Estimular el uso de equipos portátiles de espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF) y el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP), ya que debido a su tamaño reducido estos equipos presentan mayor maniobrabilidad y versatilidad a la hora de efectuar los análisis en campo,

y presentan un costo mucho menor, siempre y cuando se utilicen muestras con la correcta preparación (pulverización y uso de soluciones ácidas indicadas) y se implemente el control de calidad de los ensayos a través de análisis de laboratorios en un número reducido de muestras.

Quinta

Al Ministerio del Ambiente (MINAM): Efectuar más trabajos de investigación de campo similares al realizado en el 2016 en el Distrito de Chala, Arequipa, debido a que son estudios independientes de las empresas operadoras y contratistas mineras que proporcionan datos muy valiosos para la investigación de la situación actual de la contaminación ambiental por compuestos y/o elementos como los metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2003). *NPL Abandoned Mine Land Sites and Cleanup Leads*. Washington, DC.
- Allan, R. J., y Salomons, W. (1995). Heavy metal aspects of mining pollution and its remediation. *Special Issue Journal of Geochemical Exploration*, 52(1-2): 1-284.
- Andrade, Y. (2013). *Implementación de Control Estadístico de Procesos para el Control de la Calidad y la Mejora Continua en la Industria Minera*, presentado como Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma de México (UNAM).
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la investigación científica*. Editorial Espíteme. 6ta Edición. Caracas, Venezuela.
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., y Wolff, H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*". Springer, ISBN 3-540-28603-9
- Berk, J. y Berk, S. (2000). *Gestión de la calidad para el sector tecnológico*.
- Blanco E. y Paricahua H. (2020) Tesis "*Identificación y Valoración de Impactos Ambientales Generados por las Actividades de la Minería Informal, en el Cerro Luicho del Distrito de Colta, Provincia de Paucar del Sara Sara, Ayacucho*", presentada Universidad Tecnológica del Perú.
- Boada, L. (2004). *Análisis de Toxicidad de un Residuo por medio del método de extracción y lixiviación. Método 1310A (EP) y Método 1311 (TCLP)*. Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.

- Corbett, C., and Klassen, R. (2006). *Extending the Horizons: Environmental Excellence as Key to Improving Operations*. *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 5–22, Jan. 2006.
- Corbett, C., and Pan, J. (2002). *Evaluating environmental performance using statistical process control techniques*. *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 139, no. 1, pp. 68–83, May. 2002.
- Crowder, S., Hawkins, M., Reynolds, M., and Yashchin, E. (1998). *Process control and statistical inference*. *Qual. Technol.*, vol. 30, no. 4, p. 423.
- Fundación Nacional de Salud de Brasil (2013). *Manual Práctico de Análisis de Agua*. Cuarta Edición. Brasil.
- García-Díaz, J. (2010). Monitoring and forecasting nitrate concentration in the groundwater using statistical process control and time series analysis: a case study. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 25, no. 3, pp. 331–339, Feb. 2010.
- Geoinnova. *Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente*. Recuperado de: <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>
- Harris, D., (2003). *Quantitative Chemical Analysis*. W.H. Freeman and Company. New York.
- Hartley, N. y Wood, C. (2005). Public participation in environmental impact assessment—implementing the Aarhus Convention. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25. pp. 319–340, 2005.
- Hernández, C. y Da Silva, F. (2015). *Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de la calidad*.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación Científica*. (6ta Ed.) México D.F. Editorial McGraw-Hill.

Hitachi (s.f.). *Dispositivos de medición*. Recuperado de: <http://www.hitachi.com>

Hudson, T., Fox, F., and Plumlee, G. (1999). *Metal Mining and the Environment*, p.7,20-27,31-35,38-39. Published by the American Geosciences Institute Environmental Awareness Series.

Hurtado, J. (2014). *Metodología de la Investigación Holística*. Fundación Sypal. 3ra Edición. Caracas, Venezuela.

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (2016). *Manual de operación del difractor de rayos X D8 Advance, Bruker AXS*. Laboratorio de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología. División de Materiales Avanzados.

Ishikawa, K. (1976). *Guide to Quality Control*. Nordic International Limited. Hong Kong.

Khadour, L. (2010). *Total Quality Environmental Management (TQEM) Framework Towards Sustainability*, propuesto como Trabajo de Grado para Titulación de Doctor en Filosofía en la Universidad de Nottingham.

Laboratorio Nacional de Referencia de España (2017). *Análisis de elementos mediante las técnicas de espectrometría atómica o espectrometría de masas. Protocolo de preparaciones y validaciones de muestras de alimentos*. Madrid, España.

MacCarthy B., y Wasusri, T. (2002). A review of non-standard applications of statistical process control (SPC) charts. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 19, no. 3, pp. 295–320,2002.

Malvern Panalytical (s.f.). *Productos de Malvern Panalytical*. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products>

- Maurer, D., Mengel, M., Robertson, G., Gerlinger, T. y Lissner, A. (1999). Statistical process control in sediment pollutant analysis. *Environ. Pollut.*, vol. 104, no. 1, pp. 21–29, Jan. 1999.
- Mill, C. (1988). *The Quality Audit: A Management Evaluation Tool*. McGraw-Hill. New York.
- Ministerio del Ambiente de Perú (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM*. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>
- Ministerio del Ambiente de Perú (2016). *Evaluación preliminar de la contaminación ambiental causada por la pequeña minería y minería artesanal en la zona urbana del Distrito de Chala, Arequipa*. Informe del MINAM, Perú.
- <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/evaluacion-preliminar-contaminacion-ambiental-causada-pequena-mineria>
- MoreStream (s.f.). *Productos de Espectrómetros*. Recuperado de: <https://www.moresteam.com/>
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (s.f.). *Engineering Statistics*. Recuperado de: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- Observación de Conflictos Mineros del Perú (2019). *Informe del Observatorio de Conflictos Mineros (OCM) Diciembre 2019*. No. 246. Recuperado de: www.cooperaccion.org.pe
- Olympus (s.f.). *Soluciones para la industria*. Recuperado de: <https://www.olympus.es/company/es/negocios/soluciones-para-la-industria/>
- O'Reilly (s.f.). *Spectrometers*. Recuperado de: <https://www.oreilly.com/>

- Organización Mundial de la Salud (2016). *Manual: Sistema de Gestión de la Calidad en el Laboratorio*. Nueva York.
- Organización Mundial de la Salud (2020). *Guía breve de los métodos analíticos para determinar el contenido de plomo de la pintura*. Segunda Edición. Nueva York.
- Orloff, J. (2020). *The Difference Between SPC and SQC*. Recuperado de: <https://www.mastercontrol.com/gxp-lifeline/spc-vs-sqc/>
- Ortiz, W. (2019). *Comparación entre el Análisis de Fluorescencia de Rayos X Portátil e ICP-MS en elementos guía para la exploración geoquímica del Área de Antabamba-Apurímac*, presentada como Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero Geólogo en la Universidad Nacional del Altiplano, Perú.
- Owen, T., (2000). *"Fundamentos de la espectrometría UV-visible moderna"*. Recuperado de: <http://www.agilent.com/cs/library/primers/public/5980-1397ES.pdf>
- Palella, S. y Martins, F. (2012). *Metodología de la Investigación Cuantitativa*. FEDUPEL. 3ra Edición. 1ra Reimpresión. Caracas, Venezuela:
- Romero, A. (2015). *Tratamiento de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (Kikuyo) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la Región Central del Perú*. Tesis para optar el grado académico de maestro en seguridad y medio ambiente en minería
- Sánchez Flores, F. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102-122. doi: <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>
- Sancho, J., Pastor, J., and Martinez, J. (2014). *Variability analysis by Statistical Control Process and Functional Data Analysis. Case of study applied to*

power system harmonics assessment. Key Eng. Mater., vol. 615, p. 118–123.

Scallan, P. (2003). *Selección de métodos de garantía de calidad.*

Tamayo, M. (2004). *El proceso de la Investigación Científica.* Editorial Limusa. Noriega Editores. 4ta Edición. México.

Thermo Fisher (s.f.). *Espectrómetros.*

<https://www.thermofisher.com/ve/en/home.html>

Tranca, J., de Actualidad Ambiental (2019). *Reportaje: Perú: Existen más de 7 mil personas afectadas por contaminación con metales pesados*".

<https://www.actualidadambiental.pe/peru-existen-mas-de-7-mil-personas-afectadas-por-contaminacion-con-metales-pesados/#:~:text=Seg%C3%BAn%20Wilbert%20Rozas%2C%20Comisi%C3%B3n%20de,de%20miner%C3%ADa%20y%20de%20hidrocarburos%E2%80%9D>

Universidad de Burgos (s.f.). *Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS).*

<https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>

Universidad de Cartagena (s.f.). *Técnicas-espectrométricas-y-afines/espectrometro-de-emision-atomica-de-plasma.* Recuperado de:

<https://www.upct.es/sait/es/tecnicas-espectrometricas-y-afines/espectrometro-de-emision-atomica-de-plasma>

Universidad de Málaga (s.f.). *Catálogo de infraestructuras*

<https://catalogoinfraestructuras.uma.es/espectrometria-atomica.php>

Uscuchagua, M. (2016). *Optimización de metodologías de evaluación de impacto ambiental del sector minero en las regiones Junín, Pasco y Huánuco.* Tesis presentada como Trabajo de Grado en la Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

- Vanina, B. (2019). *Comparación de dos métodos (ICP-OES vs. ICP-MS) para la determinación de arsénico en agua*, Tesis para la obtención del título de Licenciatura en Bromatología". Mendoza, Argentina.
- Vedpal, J. (2013). *Conceptos básicos del control de procesos en la fabricación textil*.
- Woodall, W. (2000). Controversies and contradictions in statistical process control Response. *J. Qual. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 341–350, 2000.
- Woodall, W. y Montgomery, C. (1999). Research issues and ideas in statistical process control. *J. Qual. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 376–386, 1999.
- Zhang, G. (2003). *Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. Neurocomputing*, vol. 50. pp. 159–175, 2003.
- Zimmerman, S., Dardeau, M., Crozier, G. and Wagstaff, B. (1996). The second battle of Mobile Bay - Using SPC to control the quality of water monitoring. *Comput. Ind. Eng.*, vol. 31, no. 1–2, pp. 257–260, 1996.
- Zorilla, S. y Torres, M. (2000). *Guía para elaborar la Tesis*". Universidad Nacional de México (UNAM). Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición. México.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia

Título: Proceso innovador para mejorar la metodología de monitoreo en la evaluación de impacto ambiental del sector minero utilizando el control estadístico de calidad (CEC / CEP)						
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
¿De qué manera el proceso innovador de uso de control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA permite mejorar la evaluación de los datos de monitoreo y ayudar a tomar medidas para reducir los efectos de la contaminación ambiental en la minería?	Proponer un proceso innovador de uso del control estadístico de la calidad (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.	La implementación del control estadístico de la calidad (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.	Variable Independiente (X) Monitoreo de Contaminantes	Muestreo de Suelos y Aguas	- Muestras en estado sólido (suelos) - Muestras en estado líquido /aguas)	Método: Analítico, deductivo, e hipotético. Tipo de Investigación: Aplicada Diseño de Investigación: Experimental Nivel o Alcance: Descriptivo – interpretativa. Enfoque de Investigación: Cuantitativo – Cualitativo Población: La población estará conformada por los proyectos mineros en el Perú. Muestra: La muestra está conformada por los estudios de impacto ambiental aprobados en el 2018-2018. Técnica de recolección datos: Datos de Laboratorio, Técnica de la observación Métodos de Análisis de Datos: Análisis e interpretación de resultados.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS		Protocolos de Preparación y Análisis de Muestras	- Protocolos para muestras en estado sólido (suelos) - Protocolos para muestras en estado líquido /aguas)	
¿Cuáles son los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú son empleados para la implementación de medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas?	Examinar si los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú son empleados para la implementación de medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.	Los métodos de los EIA aplicados a los proyectos del sector minero del Perú tienen relación directa con la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación, compensación y seguimiento de las mismas.		Control Estadístico de la Calidad de los Resultados	- Validación de los resultados - Reducción del grado de incertidumbre de los resultados	
¿Cómo se podría monitorear la variabilidad de los contaminantes aplicando el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) en los EIA para reducir la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental?	Conocer como el monitoreo de la variabilidad de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.	El monitoreo de la variabilidad de los de los contaminantes por medio del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) es un aspecto preventivo en los EIA que conduce a una reducción de la incertidumbre sobre el origen de los contaminantes que causan impacto ambiental.	Variable Dependiente (Y) Estudios de Impacto Ambiental	Impactos Ambientales de la Minería	- Contaminación de suelos y aguas - Modificaciones al equilibrio ambiental - Impacto sobre la salud de los seres vivos	
¿Cómo utilizar el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) como una nueva técnica para evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental originada por la actividad minera?	Determinar como el control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental originada por la actividad minera.	El uso de las técnicas del control estadístico de la calidad (CEC/CEP) permite evaluar los EIA y tomar decisiones oportunas que ayuden a reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la actividad minera.		Sistema de Gestión Ambiental	- Certificación y Oficialización de los Resultados - Sistemas de Información - Toma de Decisiones y Ajustes	

Anexo 2. Matriz de Operacionalización de las Variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Monitoreo de Contaminantes	Muestreo de Suelos y Aguas	• Muestras en estado sólido (suelos) • Muestras en estado liquido (aguas)
	Protocolos de Preparación y Análisis de Muestras	• Protocolos para muestras en estado sólido (suelos) • Protocolos para muestras en estado liquido /aguas)
	Control Estadístico de la Calidad de los Resultados	• Validación de los resultados • Reducción del grado de incertidumbre de los resultados
Estudios de Impacto Ambiental	Impactos Ambientales de la Minería	• Contaminación de suelos y aguas • Modificaciones al equilibrio ambiental • Impacto sobre la salud de los seres vivos
	Sistema de Gestión Ambiental	• Certificación y Oficialización de los Resultados • Sistemas de Información • Toma de Decisiones y Ajustes

Anexo 3. Tablas de Evaluación Estadística de los resultados del Estudio de Impacto Ambiental del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) durante el 2016, en Distrito de Chala, Región de Arequipa.

Resultados de los Análisis de Laboratorio de las Muestras

Resultados de los Análisis ICP-OES en Muestras de Suelos

Tabla A3-1: Evaluación estadística de los resultados de los análisis ICP-OES en muestras de suelos

Metal Pesado =>	As	Cu	Pb	Hg	Cd
Nº Observaciones =>	52	52	52	52	0
LMP = ISQG =>	50,00	63,00	140,00	6,60	20,00
Mediana (M)	19,00	43,50	21,50	5,00	---
Promedio (Prom)	100,20	121,10	56,20	6,40	---
Mínimo (Min)	2,20	9,60	3,13	0,02	---
Máximo (Max)	1133,00	1094,00	306,60	58,60	---
Desv.Est. (σ)	208,30	239,80	76,20	9,40	---
Mediana + Desv. Est. ($M+\sigma$)	227,30	283,30	97,70	14,40	---
Desv. Est. Rel. (σ/M)	10,96	5,51	3,54	1,88	---
Nro. Excedencias del LMP	11	12	7	10	---
% Excedencias del LMP	21,15%	23,08%	13,46%	19,23%	---

LMP = Límite Máximo Permitido

Resultados de los Análisis ICP-OES en Muestras de Sedimentos Suelos

Tabla A3-2: Evaluación estadística de los resultados de los análisis ICP-OES en muestras de sedimentos suelos

Metal Pesado =>	As	Cu	Pb	Hg	Cd
Nº Observaciones =>	52	52	52	52	0
LMP = ISQG =>	50,00	63,00	140,00	6,60	20,00
Mediana (M)	19,00	43,50	21,50	5,00	---
Promedio (Prom)	100,20	121,10	56,20	6,40	---
Mínimo (Min)	2,20	9,60	3,13	0,02	---
Máximo (Max)	1133,00	1094,00	306,60	58,60	---
Desv.Est. (σ)	208,30	239,80	76,20	9,40	---
Mediana + Desv. Est. ($M+\sigma$)	227,30	283,30	97,70	14,40	---
Desv. Est. Rel. (σ/M)	10,96	5,51	3,54	1,88	---
Nro. Excedencias del LMP	11	12	7	10	---
% Excedencias del LMP	21,15%	23,08%	13,46%	19,23%	---

LMP = Límite Máximo Permitido

Verificación de la Calibración con Patrones NIST

Tabla A3-3: Evaluación estadística de las mediciones del patrón NIST 2702 en diferencia relativa en porcentaje

Metal Pesado =>	As	Cu	Pb	Zn	Mn	Cr	Co	Se
Mediana (M)	-2,9%	-13,3%	-1,0%	-12,5%	-2,2%	5,3%	3433,0%	21,2%
Promedio (Prom)	1,2%	-14,0%	-3,5%	-13,5%	-2,1%	2,5%	3529,0%	33,8%
Mínimo (Min)	21,4%	-26,1%	-12,7%	-20,9%	-12,4%	-18,8%	2594,0%	1,0%
Máximo (Max)	29,4%	1,1%	5,4%	-11,6%	5,5%	16,8%	5058,0%	81,8%
Desv.Est. (σ)	18,9%	7,6%	7,1%	3,1%	5,8%	12,9%	722,0%	35,7%

Comparación de Lecturas de XRF Portátil y Mediciones por ICP-OES en el Laboratorio

Resultados de los Análisis en Muestras de Suelos

Tabla A3-4: Evaluación estadística de la diferencia relativa en porcentaje entre muestras de suelos analizadas por XRF portátil e ICP-OES

Metal Pesado =>	As	Cu	Pb	Hg	Zn
Mediana (M)	87,0%	78,0%	78,0%	141,0%	166,0%
Promedio (Prom)	97,0%	84,0%	121,0%	154,0%	160,0%
Mínimo (Min)	-37,0%	-38,0%	5,0%	82,0%	45,0%
Máximo (Max)	444,0%	245,0%	411,0%	254,0%	360,0%
Desv.Est. (σ)	110,0%	72,0%	129,0%	72,0%	81,0%

Resultados del Análisis en Muestras de Sedimentos Suelos

Tabla A3-4: evaluación estadística de la diferencia relativa en porcentaje entre muestras de sedimentos sueltos analizadas por XRF e ICP-OES

Metal Pesado =>	As	Cu	Pb	Hg	Zn
Mediana (M)	9,3%	-8,5%	8,9%	94,3%	8,5%
Promedio (Prom)	8,5%	-5,3%	-14,8%	93,6%	0,2%
Mínimo (Min)	-15,0%	-32,7%	-747,1%	83,7%	-321,1%
Máximo (Max)	27,0%	22,8%	26,9%	97,9%	66,9%
Desv.Est. (σ)	10,6%	14,8%	134,1%	4,6%	62,2%