

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental**



**Influencia de la unidad minera artesanal San Vicente en la calidad del suelo por cianuro libre,  
centro poblado de Algamarca - Cajabamba**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Presentado por el Bachiller:

**ERICK REYNALDO DÍAZ SILVA**

Asesores:

**ING. M.Cs. JOSÉ RAMIRO DÍAZ CUMPÉN**

**ING. JORGE SILVESTRE LEZAMA BUENO**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2023**



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

Secretaría Académica



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los veintidós días del mes de febrero del año dos mil veintitrés, se reunieron en el **Aula 101** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 063-2023-FCA-UNC, de fecha 16 de enero del 2023**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"INFLUENCIA DE LA UNIDAD MINERA ARTESANAL SAN VICENTE EN LA CALIDAD DEL SUELO POR CIANURO LIBRE, CENTRO POBLADO DE ALGAMARCA - CAJABAMBA"**, realizada por el Bachiller **ERICK REYNALDO DÍAZ SILVA** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las once horas y seis minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de quince (15); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las doce horas y veinte minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

  
Ing. M. Sc. Manuel Roberto Roncal Rabanal  
PRESIDENTE

  
Ing. M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna  
SECRETARIO

  
Ing. M. Cs. Adolfo Máximo López Aylas  
VOCAL

  
Ing. M. Cs. José Ramiro Díaz Cumpén  
ASESOR

  
Ing. Jorge Silvestre Lezama Bueno  
ASESOR

COPYRIGHT © 2023 by  
ERICK REYNALDO DÍAZ SILVA  
Todos los derechos reservados

## **Dedicatoria**

*Para mi madre Maribel, mis hermanas Rosario y Mávila y mis sobrinos Cecilia, Manuel, Fabricio y Juan Pablo; por todo su amor y apoyo incondicional.*

## **Agradecimiento**

*A mis asesores Ing. José Díaz Cumpén e Ing. Jorge Lezama Bueno, por su valioso aporte, esta investigación no hubiera llegado a su culminación sin su soporte y confianza.*

*Al Sr. Jacinto Otiniano Vare, por su tiempo y apoyo generoso.*

*A Christian Bazán, por compartir sus experiencias y conocimientos.*

*A Jhynna Ortiz, G, N, C, por su amor y comprensión.*

*A todos ellos mi reconocimiento e infinita gratitud.*

## Índice de Contenidos

Capítulo I .....	1
Introducción .....	1
Capítulo II.....	4
Revisión Bibliográfica .....	4
1.1 Antecedentes de la investigación.....	4
1.2 Bases teóricas .....	7
1.2.1 Unidad minera.....	7
1.2.2 Fuentes de cianuro .....	7
1.2.3 Compuestos relacionados con el cianuro .....	8
1.2.3.1 Cianuro libre. ....	9
1.2.3.2 Cianuros complejos de hierro. ....	11
1.1.1 El uso del cianuro en la minería de oro.....	11
1.1.2 Regulaciones para el uso del cianuro.....	13
1.1.3 Suelos.....	14
1.1.4 Calidad del suelo.....	15
1.1.5 Textura del suelo.....	16
1.1.6 pH del suelo .....	17
1.1.7 Materia orgánica del suelo .....	19
1.1.8 Intercambio catiónico.....	20
1.1.9 Geología de Algamarca.....	21
1.1.10 Índice de geoacumulación.....	22
1.2 Definición de términos básicos .....	23
Capítulo III.....	25
Marco Metodológico.....	25
2.1 Ubicación del área de estudio.....	25
2.1.1 Área de estudio .....	26
2.2 Materiales .....	29

2.2.1	Material experimental .....	29
2.2.2	Materiales de campo .....	29
2.3	Metodología.....	30
2.3.1	Muestreo de identificación.....	30
2.3.2	Muestreo de nivel de fondo.....	33
2.3.3	Parámetros analizados.....	35
2.3.4	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	35
Capítulo IV.....		36
Resultados y Discusión.....		36
4.1	Concentración de cianuro libre.....	36
4.2	Textura de los suelos .....	38
4.3	pH de los suelos.....	41
4.4	Materia orgánica de los suelos .....	43
4.5	Capacidad de intercambio catiónico.....	45
4.6	Relación del cianuro libre y la textura de los suelos .....	47
4.7	Relación del cianuro libre y el pH de los suelos .....	47
4.8	Relación del cianuro libre y la materia orgánica de los suelos.....	49
4.9	Relación del cianuro libre y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos ...	51
4.10	Diferencias entre el cianuro libre de los suelos influenciados por la unidad minera y valor del cianuro del nivel de fondo.....	53
4.11	Diferencias entre el pH de los suelos influenciados por la unidad minera y el valor de pH de nivel de fondo.....	54
4.12	Diferencias entre el contenido de materia orgánica (MO) de los suelos influenciados por la unidad minera y la materia orgánica de nivel de fondo .....	54
4.13	Diferencias entre la CIC (Capacidad de intercambio catiónico) de los suelos influenciados por la unidad minera y el CIC de nivel de fondo .....	55
4.14	Análisis geoespacial del cianuro libre .....	56
4.15	Determinación del impacto ambiental de acuerdo al índice de geoacumulación.....	58
Capítulo V.....		61
Conclusiones y Recomendaciones.....		61
5.1	Conclusiones.....	61
5.2	Recomendaciones.....	62
Capítulo VI.....		63
Referencias.....		63

Capítulo VII .....	69
Apéndice .....	69

## Índice de Tablas

Tabla 1. Estándar de Calidad Ambiental para suelo para cianuro libre .....	14
Tabla 2. Grupos texturales de los suelos.....	17
Tabla 3. Niveles de pH del suelo .....	18
Tabla 4. Materia orgánica del suelo.....	20
Tabla 5. Índice de geoacumulación .....	23
Tabla 6. Coordenadas del área de la unidad minera San Vicente.....	26
Tabla 7. Coordenadas del área de muestreo del nivel de fondo.....	27
Tabla 8. Metodologías utilizadas para el muestreo de suelos.....	30
Tabla 9. Coordenadas y altitud de los puntos de muestreo de Identificación.....	33
Tabla 10. Coordenadas y altitud de los puntos de muestreo del nivel de fondo.....	34
Tabla 11. Cianuro libre de los suelos con influencia de la unidad minera .....	36
Tabla 12. Cianuro libre de los suelos sin influencia de la unidad minera .....	36
Tabla 13. Textura de los suelos con influencia de la unidad minera .....	39
Tabla 14. Textura de los suelos sin influencia de la unidad minera .....	40
Tabla 15. pH de los suelos con influencia de la unidad minera.....	41
Tabla 16. pH de los suelos sin influencia de la unidad minera.....	42
Tabla 17. Materia orgánica de los suelos con influencia de la unidad minera .....	43
Tabla 18. Materia orgánica de los suelos sin influencia de la unidad minera .....	44
Tabla 19. CIC de los suelos con influencia de la unidad minera.....	45
Tabla 20. CIC de los suelos sin influencia de la unidad minera.....	46
Tabla 21. Evaluación del contenido de cianuro libre y el pH de los suelos .....	48
Tabla 22. Evaluación del contenido de cianuro libre y la materia orgánica de los suelos.....	49
Tabla 23. Evaluación del contenido de cianuro libre y la capacidad de intercambio catiónico de los suelos.....	51
Tabla 24. Prueba de T- Studen para el contenido de cianuro libre en suelos influenciados por la unidad minera y en suelos de nivel de fondo.....	53
Tabla 25. Prueba de T- Studen para el pH de los suelos influenciados por la unidad minera y el pH en suelos de nivel de fondo.....	54

Tabla 26. Prueba de T- Studen para el contenido de materia orgánica de los suelos influenciados por la unidad minera y en suelos de nivel de fondo.....	55
Tabla 27. Prueba de T- Studen para la CIC de los suelos influenciados por la unidad minera y la CIC en suelos de nivel de fondo .....	56
Tabla 28. Índice de geoacumulación a los 10 cm .....	58
Tabla 29. Índice de geoacumulación a los 20 cm .....	59

## Índice de Figuras

Figura 1. Equilibrio HCN/CN en función del pH.....	10
Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.....	25
Figura 3. Área de la unidad minera “San Vicente”.....	27
Figura 4. Ubicación de puntos de muestreo de nivel de fondo.....	28
Figura 5. Rejillas regulares .....	31
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo de Identificación .....	32
Figura 7. Concentración de cianuro libre a 10 cm y 20 cm de profundidad.....	38
Figura 8. Textura de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad .....	41
Figura 9. pH de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad.....	43
Figura 10. Materia orgánica de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad .....	45
Figura 11. CIC de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad.....	46
Figura 12. Cianuro libre y el pH de los suelos a 10 cm de profundidad.....	48
Figura 13. Cianuro libre y el pH de los suelos a 20 cm de profundidad.....	48
Figura 14. Cianuro libre y materia orgánica de los suelos a 10 cm de profundidad.....	50
Figura 15. Cianuro libre y materia orgánica de los suelos a 20 cm de profundidad.....	50
Figura 16. Cianuro libre y capacidad de intercambio catiónico de los suelos a 10 cm de profundidad.....	52
Figura 17. Cianuro libre y capacidad de intercambio catiónico de los suelos a 20 cm de profundidad.....	52
Figura 18. Mapa de análisis geoespacial de cianuro libre a los 10 cm .....	57
Figura 19. Mapa de análisis geoespacial de cianuro libre a los 20 cm .....	57
Figura 20. Análisis gráfico del índice de geoacumulación a los 10 cm.....	59
Figura 21. Análisis gráfico del índice de geoacumulación a los 20 cm.....	60

## Resumen

Se determinó las concentraciones de cianuro libre para determinar el impacto ambiental que causa la unidad minera artesanal San Vicente en la calidad del suelo, en el centro poblado de Algamarca, para lo cual se utilizó un muestreo de identificación utilizando un muestreo estadístico sistemático y equidistante (rejillas regulares) representadas por un total de nueve puntos de muestreo, además se realizó un muestreo de fondo (aleatorio simple) en un área no influenciada, de tal forma que se pudieron realizar las comparaciones correspondientes. Los resultados revelaron que en la unidad minera la concentración media de cianuro es de 0.272 mg/Kg, la cual es 2.7 veces mayor que en el nivel de fondo que contiene 0.10 mg/Kg, sin embargo, ninguna superó el ECA para suelo, además los parámetros fisicoquímicos evidenciaron que el pH en la unidad minera (6.90) presenta un aumento de 1.16 veces que los niveles de fondo (5.95), la materia orgánica en la unidad minera (1.078%) presenta una disminución en 2.37 veces que los niveles de fondo (2.55%) y la CIC en la unidad minera (14.256 cmol(+)/kg) presenta una disminución en 1.69 veces respecto a los niveles de fondo (24.150 cmol(+)/kg). Con respecto a la distribución vertical, el cianuro libre disminuye a los 20 cm de profundidad, el pH disminuye a los 20 cm de profundidad, el porcentaje de materia orgánica aumenta a mayor profundidad, del mismo modo la CIC aumenta a los 20 cm de profundidad. Además, según al índice de geoacumulación (Igeo) analizado, el mayor Igeo se presenta a los 10 cm de profundidad en el Punto P-04, mientras que, a los 20 cm el mayor Igeo se presenta en el Punto P-05. Por lo tanto, se concluye que la influencia de la unidad minera San Vicente es significativa.

**Palabras clave:** Cianuro libre, contaminación de suelos, unidad minera.

### **Abstract**

Free cyanide concentrations were determined to determine the environmental impact caused by the San Vicente artisanal mining unit on soil quality, in the town of Algamarca, for which identification sampling was used using systematic and equidistant statistical sampling (regular grids) represented by a total of nine sampling points, in addition a background sampling (simple random) was carried out in an uninfluenced area, in such a way that the corresponding comparisons could be made. The results revealed that in the mining unit the average concentration of cyanide is 0.272 mg/Kg, which is 2.7 times higher than in the background level that contains 0.10 mg/Kg, however, none exceeded the ECA for soil, in addition The physicochemical parameters showed that the pH in the mining unit (6.90) presents an increase of 1.16 times that the background levels (5.95), the organic matter in the mining unit (1.078%) presents a decrease of 2.37 times that the levels of background (2.55%) and the CEC in the mining unit (14,256 cmol(+)/kg) presents a decrease of 1.69 times with respect to background levels (24,150 cmol(+)/kg). Regarding the vertical distribution, the free cyanide decreases at 20 cm depth, the pH decreases at 20 cm depth, the percentage of organic matter increases at greater depth, in the same way the CEC increases at 20 cm depth. In addition, according to the geoaccumulation index (Igeo) analyzed, the largest Igeo occurs at a depth of 10 cm at Point P-04, while at 20 cm the largest Igeo occurs at Point P-05. Therefore, it is concluded that the influence of the San Vicente mining unit is significant.

**Keywords:** Free cyanide, soil contamination, mining unit.

## **Capítulo I**

### **Introducción**

La minería moderna debe gran parte de su permanencia a la cianuración, pues esta sustancia química es la más prometedora para reemplazar completamente la utilización de mercurio como método antiguo y típico de la actividad metalúrgica (Programa de las naciones unidas para el medio Ambiente [PNUMA], 2018). Debido a que el cianuro tiene una eficiencia de extracción oro del mineral en un 95% a 98%, incluso hace concebible obtener minerales de bajos estatutos que en épocas anteriores no eran rentables, por otro lado, presenta un bajo financiamiento del 2.56% en relación con la ganancia, pues una tonelada de cianuro extrae 6 Kg de oro aproximadamente, lo cual evidencia un vínculo de precios muy conveniente (Ortiz, 2015, p. 42).

La explotación mineral independientemente de su escala genera impactos en los ecosistemas tanto durante y después de su desarrollo, pues las minas luego de ser explotadas no se cierran adecuadamente, en tanto montañas de sus residuos ocupan los alrededores (Ortiz, 2015). De esta manera, en la mayoría de pequeños asentamientos de minería artesanal, las sustancias residuales de los compuestos empleados en la obtención de oro como la amalgamación con mercurio y la lixiviación con cianuro, se convierten en pasivos ambientales que son focos de contaminación por agua ácida de mina, debido a que en las prácticas de los mineros no se consideraron medidas de bioseguridad (López et al., 2016).

Las mineras artesanales se han convertido en una fuente vital de remuneración para los mineros, principalmente en las comunidades rurales donde las opciones financieras son limitadas. A nivel nacional de acuerdo con los datos en el Registro Integral de Formalización Minera (REINFO), los mineros inscritos a nivel nacional ascienden a 87777, de estos 1293 están inscritos en la región Cajamarca, 313 en la provincia de Cajabamba y 287 en el distrito de Cachachi (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2022). No obstante, la minería ilegal en el país aún continúa desarrollándose y no se tienen datos precisos de cuantas personas se dedican a esta ilícita actividad.

En el caso de la unidad minera San Vicente, durante el período 2008-2016 realizaron el proceso de cianuración, proceso que dejó pasivos ambientales producto de los residuos vertidos sin ningún tipo de control en relaveras adyacentes a la unidad minera.

El cianuro es altamente reactivo y muy tóxico, en el medio ambiente puede ingresar al aire, al agua y al suelo como consecuencia de actividades industriales. En el aire, el cianuro está presente principalmente como cianuro de hidrógeno gaseoso. Una pequeña porción del cianuro en el aire está presente como pequeñas partículas de polvo. Este polvo eventualmente se deposita sobre el suelo y el agua (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR], 2016).

En el agua superficial formará cianuro de hidrógeno y se evaporará. Una porción del cianuro en el agua será transformada por microorganismos (plantas y animales de tamaño muy pequeño) a sustancias químicas menos perjudiciales o formará un complejo con metales, como por ejemplo el hierro.

Se ha identificado que el cianuro libre tiene una movilidad potencialmente alta en el suelo. Una vez en el suelo, el cianuro puede ser removido a través de varios procesos. Algunos compuestos de cianuro en el suelo pueden formar cianuro de hidrógeno y volatilizarse, mientras que otros serán transformados a otras sustancias químicas por los microorganismos en el suelo, sin embargo, se ha detectado cianuro en aguas subterráneas de algunos vertederos y en sitios para disposición de residuos industriales.

La movilidad en el suelo y las aguas subterráneas, depende de factores como el pH, la humedad y el tipo de superficie, lo que resulta en la difusión a través del recurso terrestre y la liberación a la atmósfera, además, en concentraciones altas, el cianuro es tóxico a muchos microorganismos por lo que el cianuro permanece sin ser cambiado a otras formas y atraviesa el suelo llegando así hasta el agua subterránea.

Es necesario realizar estudios en suelos para determinar la movilidad y el impacto del cianuro, ya que los suelos son base para el desarrollo de la agricultura, las funciones esenciales de los ecosistemas, y la seguridad alimentaria, por lo tanto, son la clave para sostener la vida en la Tierra. Por ello se planteó estudiar el cianuro libre en el suelo en Algamarca, considerando que en esta zona continúa desarrollando actividades mineras artesanales y mega minería, que constituyen las principales fuentes que afectan al lugar; esto con la finalidad de aportar un sustento valioso para las estrategias y propuestas de remediación de pasivos ambientales.

Es por ello, que el objetivo de la presente investigación fue determinar la influencia de la unidad minera artesanal San Vicente en la calidad del suelo por cianuro libre, como una muestra de lo que viene ocurriendo en el centro poblado de Algamarca.

## Capítulo II

### Revisión Bibliográfica

#### 1.1 Antecedentes de la investigación

Diversos autores investigaron la presencia de contaminación de cianuro en suelos cercanos a campos mineros a nivel internacional, tal es el caso de Razanamahandry et al., (2018) que tuvo el objetivo de identificar los factores que influyen en la distribución espacial de la contaminación por cianuro con la finalidad de predecir el mapa de riesgo de contaminación por cianuro a nivel de cuenca, para ello se recolectaron muestras de suelo en el sitio norte de Zougnazagmiline (norte) y partes del sitio sur de Galgouli (sur) de Burkina Faso, que cubren áreas de 22 km<sup>2</sup> y 20 km<sup>2</sup> respectivamente, posteriormente se midieron las concentraciones de cianuro libre en cada muestra. Los resultados demostraron que, la distribución horizontal de cianuro en el suelo, a nivel superficial, sigue el curso del río aguas abajo; mientras que, respecto a la distribución vertical, la concentración disminuye a mayor profundidad. Además, se concluye que un factor determinante en la propagación del cianuro es el tipo de suelo para zonas áridas, mientras que para zonas húmedas el tipo de suelo y la conductividad del suelo son los factores determinantes.

Pérez e Higuera (2008), estudiaron el comportamiento electroquímico del cianuro, principalmente el efecto del pH, la concentración de cianuro y la concentración de oxígeno disuelto en solución sobre los fenómenos de adsorción y reducción de cianuro empleando un electrodo de carbón vítreo. Se encontró que el comportamiento electroquímico de las soluciones cianuradas en cuanto a procesos de oxidación–reducción guardan coherencia con los potenciales termodinámicos

obtenidos para las concentraciones del ión de referencia  $\text{CN}^-$  y  $\text{O}_2$ , que son función directa del pH (pp. 3-4).

Gordillo (2018) en Colombia, estudió la biodegradación del cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería del oro, encontrando que los microorganismos como *Pseudomonas fluorescens* y *Thiobacillus sp* son capaces de realizar la tarea de disminuir la concentración de cianuro, ya que presentan altas capacidades de degradación en condiciones óptimas de pH del suelo con valores entre 5.5 y 8.8, temperatura entre 15°C y 45°C, nutrientes principalmente fósforo y nitrógeno y tipo de suelo con bajo contenido de arcilla. La utilización de *Pseudomonas fluorescens* con un tiempo de proceso hasta de 3 días, ha logrado un porcentaje de remoción de hasta 60%. Pintail System Inc, logró reducir 46.6 ppm de cianuro a 0.2 ppm. Usando *Thiobacillus sp*, requiere entre 7 y 24 horas para llegar a un 99.9% de eficiencia en la remoción de cianuro (pp. 69-70).

En nuestro país las investigaciones sobre la acumulación de cianuro en el suelo son escasas, se desarrollaron algunas relacionadas con los compuestos de cianuro y la minería que describen ciertos efectos y posibles causas.

Ponce (2018) tuvo como objetivo determinar la influencia del complejo metalúrgico La Oroya en la calidad del suelo por metales pesados, cianuro libre y cromo hexavalente en la zona de Huaynacancha en Junín un sistema no experimental – transectorial descriptivo y un nivel de investigación descriptivo – correlacional. Los resultados revelaron que existen concentraciones excesivas de 11.8 mg/Kg de cianuro libre, por lo que se concluyó que la mala calidad del suelo en el área de estudio está influenciada por la actividad minera, la deposición atmosférica continua de material particulado rico en estos elementos y la precipitación de lluvia ácida en el suelo (pp. 126-127).

Gutiérrez (2018) estudió el análisis del proceso de eliminación de sustancias tóxicas de efluentes contaminados con cianuro en plantas metalúrgicas de obtención de oro, determinó mediante pruebas de laboratorio que el método de la detoxificación del cianuro con peróxido de hidrógeno, es el más efectivo oxidante para convertir el cianuro en cianato que es compuesto ambientalmente más limpio que no produce sub productos corrosivos (pp. 92-95).

En Cajamarca específicamente en el centro poblado de Algamarca, se desarrollaron diagnósticos y algunos proyectos de investigación, realizados por instituciones gubernamentales y algunas ONGs.

Álvarez y Aroca (2015), realizaron una propuesta de diagnóstico ambiental preliminar para la asociación de mineros artesanales San Blas de Algamarca, en donde describen que durante su monitoreo realizado en los suelos y las fuentes de agua superficial cercanas al proyecto presentan cierto grado de afectación ambiental, principalmente debido a metales pesados, los cuales, al no ser extraídos durante el proceso de refinación, se concentran en los desmontes y efluentes mineros, llegando a entrar en contacto con el suelo y agua mediante procesos de mezcla y lixiviación (pp. 182-183).

GRUFIDES (2017) presentó los resultados de contaminación de las aguas del valle del Condebamba por minería informal y la minera Shahuindo SAC, dando como resultados que en muchos parámetros superan el ECA (estándar de calidad ambiental) en calidad de agua en las quebradas Choloque, Chupalla, Shahuindo, Higuerón, Merinos, Pacae, Sauce, Contra Hierba, Moyan, Shingomate, río Cañaris, río Condebamba, por la presencia de algunos metales pesados como plomo, zinc, arsénico, cadmio, cobre, sin embargo, no existen registros respecto de cianuro libre. Además, en una de sus recomendaciones exhortan al Ministerio de Energía y Minas realice la remediación de pasivos ambientales. (párr. 2).

De acuerdo al OEFA (2018), la microcuenca Cañarís aguas arriba, presenta concentraciones de As, Cd, Cu y Fe que supera los ECA para agua. Aguas abajo, contiene efluentes As y Cu que superan referencialmente el valor límite de exposición permisible (PEL) de la Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQGs), debido a aportes de la quebrada Caipuro (QCai1) y del efluente (EF-Alg1) ubicado en la bocamina “Nivel 5”, que presentó pH ácido y concentraciones de sólidos suspendidos totales, As, Cd, Cu, Zn y Fe disuelto, que superaron los LMP de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas (pp. 85-97).

## **1.2 Bases teóricas**

### ***1.2.1 Unidad minera***

Área donde el titular de actividad minera realiza las actividades de la industria minera: cateo, prospección, exploración, explotación, labor general, beneficio, comercialización y transporte minero. (MINEM, 1992).

### ***1.2.2 Fuentes de cianuro***

El cianuro en el medio ambiente proviene de fuentes naturales y artificiales, en primer lugar, se incluyen organismos biológicos y plantas en crecimiento, donde la ingestión de plantas que contienen cianuro (en forma de glucósidos cianógenos) expone a las personas y los animales al cianuro, así existen más de 2.000 plantas producen glucósidos cianogénicos como el sorgo, maíz, frijol de lima, lino, cereza, albaricoque y melocotón, batatas, yuca y almendras (USDA, 2019). Por el contrario, la generación artificial de cianuro proviene de la industria minera durante los procesos de galvanización, blanqueo de metales y la recuperación de oro con el método de lixiviación (Guerrero, 2005 citado en Mayorca, 2018).

### ***1.2.3 Compuestos relacionados con el cianuro***

Nava y otros (2007) señalan que, como resultado del proceso de cianuración, de la degradación natural de los efluentes del proceso o del tratamiento químico de éstos, se forman diversos compuestos solubles relacionados con el cianuro, entre los que figuran, además del cianuro libre y de los complejos metálicos de cianuro, el tiocianato, el cianato y el amoníaco. Todos estos compuestos son importantes, tanto desde el punto de vista toxicológico como desde el punto de vista de tratamiento.

Los principales compuestos relacionados con el cianuro son:

- El cianuro libre (CN). Comprende el ácido cianhídrico (HCN) y el ion cianuro (CN<sup>-</sup>) presentes en la solución.
- Los complejos metálicos de cianuro. Son todos aquellos compuestos metal-cianuro solubles que, según su estabilidad, se clasifican en fuertes o estables (hierro, oro, cobalto, etc.) y débiles (cobre, zinc).
- El cianuro total (CNT). Comprende el cianuro presente en la solución, en todas sus formas, incluyendo los cianuros estables (cianuros de hierro).
- El tiocianato (SCN<sup>-</sup>). La presencia del tiocianato en las soluciones de cianuración se debe a la reacción del cianuro con átomos de azufre inestable durante la aireación previa o durante la lixiviación.
- El amoníaco (NH<sub>3</sub>). La presencia de amoníaco en efluentes mineros se debe, principalmente, a la hidrólisis del cianato. Durante el proceso de cianuración se genera cianato, aunque la mayor parte viene de la oxidación del cianuro (pp. 2-3).

Los cianuros son relativamente móviles en el suelo, reactivos e inestables. Una vez en el suelo, el cianuro puede ser removido a través de varios procesos. Sin embargo, se ha detectado cianuro en aguas subterráneas de unos pocos vertederos y en sitios para disposición de residuos industriales. Las concentraciones altas de cianuro que se encuentran en algunos filtrados de vertederos y en la basura que se almacena en algunos sitios son tóxicas para los microorganismos del suelo. Debido a que estos microorganismos ya no pueden transformar el cianuro a otras formas químicas, el cianuro puede pasar a través del suelo hacia el agua subterránea. (ATSDR , 2016).

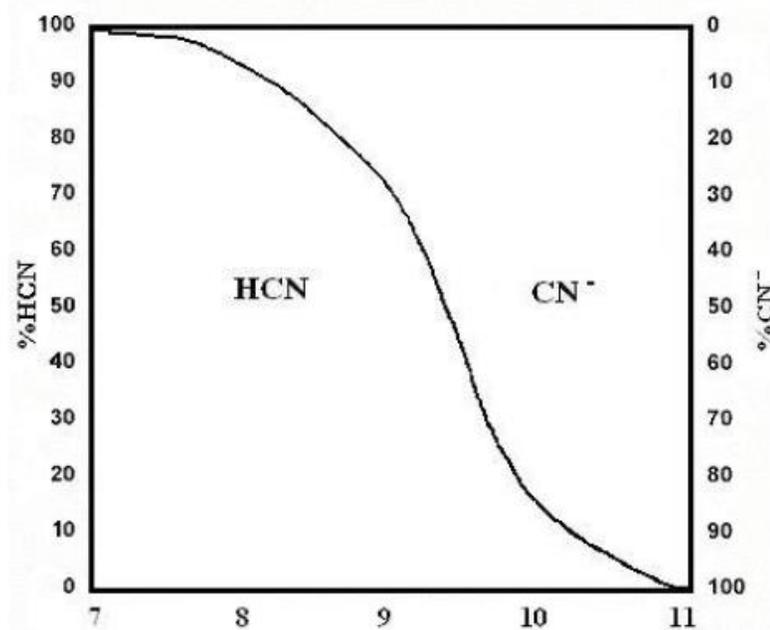
**1.2.3.1 Cianuro libre.** Instituto Internacional de Gestión del Cianuro (2021), define al cianuro libre como el ion de cianuro no complejo ( $\text{CN}^-$ ) y cianuro de hidrógeno gaseoso o acuoso ( $\text{HCN}$ ). Por ejemplo, algunos compuestos de cianuro en el suelo pueden dar forma al cianuro de hidrógeno y disiparse, mientras que otros se transforman en otras sustancias químicas por microorganismos terrestres. (Razanamahandry et al., 2018).

Una de las reacciones más importantes que afectan a la concentración de cianuro libre es la volatilización de  $\text{HCN}$ , que, al igual que la mayoría de los gases, se separa del agua y escapa al aire, este compuesto es un gas muy tóxico. Los procesos naturales pueden reducir por sí solos a valores muy bajos la concentración de cianuro libre de las soluciones en lugares al aire libre y cuán aireada se encuentre el agua cianurada. Sin embargo, en las plantas de extracción de oro, los operadores mantienen el pH de la solución a valores cercanos a 10.5 con el fin de impedir la volatilización. Esto preserva el cianuro en el sistema de extracción de oro, donde es necesario y, al mismo tiempo, limita el riesgo de inhalación por parte de los trabajadores de altas concentraciones de  $\text{HCN}$  gaseoso en un espacio cerrado. (Cahuana, 2016, p.22).

De acuerdo con Álvarez (2005) en condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN<sup>-</sup> son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9,4. Las proporciones relativas de ambos compuestos en función del pH quedan reflejadas en la siguiente figura (p. 32).

**Figura 1.**

*Equilibrio HCN/CN en función del pH*



*Nota.* Tomado de Parámetros de estabilidad del cianuro libre (p. 32), por Scott and Ingles, 1981

**1.2.3.2 Cianuros complejos de hierro.** Los cianuros de hierro desde el punto de vista ambiental, requieren especial atención debido a su gran estabilidad en ausencia de luz y su tendencia a disociarse en su presencia. Aunque esos complejos resisten la degradación natural hasta la disipación total del cianuro libre y de los complejos de cianuro metálico más rápidamente degradables, los ferricianuros son capaces de desprender niveles tóxicos de ácido cianhídrico cuando se exponen a intensa radiación ultravioleta (Gaviria y Meza, 2006, pp. 3-4).

El cianuro de hierro existe hasta pH bajos, pero puede ser descompuesto fotolíticamente por la luz ultravioleta, liberando cianuro libre. Pruebas conducidas en áreas poco ventiladas y en presencia de luz solar han demostrado que concentraciones tan bajas como 1 mg/L de cianuro de hierro son letales a las pocas horas. No obstante, estos experimentos no reflejan condiciones naturales realistas y no consideran la atenuación por hidrólisis, oxidación, adsorción y volatilización. De aquí que la toxicidad de los cianuros de hierro está relacionada con su potencial para descomponerse y liberar cianuro libre, no al compuesto en sí. No existe evidencia de acumulación de cianuro libre en efluentes debido a la descomposición del cianuro de hierro, la formación de este último es rápidamente removida en ambientes naturales por volatilización, oxidación o acomplejándose en un cianuro WAD (cianuro disociable con ácido débil) menos tóxico. (Pérez e Higuera, 2008, pp. 6-7).

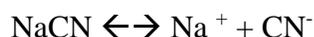
### ***1.1.1 El uso del cianuro en la minería de oro***

En el proceso de cianuración para la obtención de oro y plata a partir de sus minerales, el análisis químico del cianuro es una operación compleja y de gran importancia para su control y para la descarga de sus efluentes. El cianuro se encuentra formando diferentes compuestos, cada

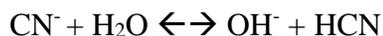
uno de ellos con diferente estabilidad y, por lo tanto, diferente toxicidad, diferente método de análisis y diferente método de eliminación. (Nava y otros, 2007, p.5).

La lixiviación con cianuro es enmarcada dentro de un proceso concerniente a la industria química que comprende estrategias electroquímicas, donde el mineral se descompone dando forma a un complejo con las soluciones de cianuro, seguidamente es sedimentado con zinc granulado, y finalmente se aísla mediante técnicas metalúrgicas (Lopez et al., 2016).

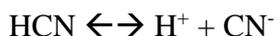
El cianuro utilizado más comúnmente en sitios mineros se encuentra en la forma cianuro de sodio, NaCN. Las sales simples de cianuro, como el cianuro de sodio, pueden ser disueltas e ionizadas en agua para formar sus respectivos cationes e iones de cianuro libre:



Los iones de cianuro hidrolizados en agua forman HCN (Cianuro de hidrógeno) e iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), con un incremento correspondiente en el pH:



Siendo el HCN un ácido débil, se disocia incompletamente en agua, de la siguiente manera:



De las reacciones de equilibrio, la mitad del cianuro total existe como HCN y la otra mitad como ión CN<sup>-</sup>, a pH mayores que 10, más del 90% del cianuro total se encuentra como ión CN<sup>-</sup>, y a pH menores que 8, como HCN.

Por otra parte, se tiene que tanto el cianuro de hidrógeno como el cianuro libre pueden oxidarse formando cianatos en presencia de oxígeno y bajo condiciones oxidantes adecuadas, estas reacciones son indeseables durante la lixiviación ya que las especies de cianuro que se forman no disuelven los metales (Pérez e Higuera, 2008, pp. 2-3).

La ecuación global de la cianuración es la siguiente (Ecuación de Elsner), esto para la disolución del oro en una solución cianurada alcalina y aireada:



El ataque por el cianuro es preferentemente conducido en medio alcalino y pH entre 10 a 11.5 para evitar la formación del ácido cianhídrico (HCN), que se produce en un medio ácido y conduce no solo a una pérdida de reactivos sino, sobre todo, a la emanación de un gas extremadamente tóxico. La alcalinidad del medio es controlada, en general, por la adición de cal. (Alvillo-Rivera et al., 2021).

Por otro lado, en la minería existen estrategias para la destrucción del cianuro de manera artificial como el cloruro antiácido, peróxido de hidrógeno, sulfato de hierro, isocianato con dióxido de azufre, asimismo de manera natural mediante la luz ultravioleta y oxígeno (Correa y Neyra, 2019, 26-27). Además, los procesos propios de la biósfera pueden disminuir las bajas concentraciones de cianuro en ambientes aireados, no obstante, en las plantas de extracción de oro generalmente los trabajadores mantienen la solución en valores cerca de 10.5 de pH para evitar la volatilización, lo cual causa que el cianuro se preserve y a la vez limite el riesgo de inhalación por parte de los operadores (Cahuana, 2016, p. 34).

### ***1.1.2 Regulaciones para el uso del cianuro***

- **Legislación peruana.** Según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, aprobados mediante Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, se tiene la Tabla 1:

**Tabla 1.***Estándar de Calidad Ambiental para suelo para cianuro libre*

Parámetro en mg/kg PS	Suelo Agrícola	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivo	Método de ensayo
Cianuro libre	0.9	0.9	8.0	EPA 9013 SEMWW-AWWA- WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/ó ISO 17690:2015

*Nota.* Adaptado de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, del Ministerio del Ambiente, 2017, D.S N° 011-2017-MINAM. Dominio público.

### **1.1.3 Suelos**

Están referidos a un conjunto de partículas en la capa superior de la corteza terrestre que tiene propiedades distintivas del movimiento básico de la roca infrayacente, como resultado de intuición entre el clima, los seres vivos, la roca madre y el relieve (Maldonado, 2018, p. 24). De esta manera, el suelo es el elemento crítico de los sistemas de soporte vital porque proporciona varios bienes y servicios de los ecosistemas que tienen efectos sobre el bienestar humano (Neina, 2019, p.8), pues proporciona nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas de cultivo porque mantiene una comunidad biótica diversa y activa, exhibe una estructura de suelo típica y permite una descomposición sin perturbaciones (Bünemann et al., 2018, párr.6).

Para Bohn (1993) las interacciones químicas de los suelos con la atmósfera y el agua percolada, determinan en gran medida la composición de la atmosfera del suelo y las aguas subterráneas. Estas reacciones son, además muy importantes para limpiar el aire y el agua después de la contaminación natural y la percolada por el hombre (pp. 45-46).

Para Seoáñez (1999), el suelo, desde el punto de vista de la ingeniería ambiental, ejerce varias funciones, puede reaccionar ante la presencia de vertidos y residuos industriales como:

- Filtro: el paso del agua a través del suelo hace que este, por sus características actúe como filtro, reteniendo materias y productos que podrían alterar otros sectores del medio natural.
- Tampón: trata de minimizar las alteraciones incorporando productos, transformándolos, etc.
- Transformación de productos: el suelo degrada muchas sustancias y las metaboliza, las inmoviliza y las destruye, utilizándolas muchas veces, una vez transformadas en productos inocuos. (pp. 157-159).

#### ***1.1.4 Calidad del suelo***

Según Doran y Parkin (1994), la calidad del suelo se puede evaluar mediante indicadores que reflejen los cambios en la capacidad del suelo y en su función. Los indicadores comúnmente utilizados corresponden a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. (párr. 4).

Las definiciones más contemporáneas de calidad del suelo se basan en varias de sus funciones y no solo en un uso específico, aunque este concepto continúa evolucionando. El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America sintetizó esta definición como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat. Para que este concepto sea funcional es necesario contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. (Dumanski *et al.*, 1998).

### ***1.1.5 Textura del suelo***

La textura es una propiedad única del suelo que tiene un efecto profundo en el comportamiento de los suelos, como la capacidad de retención de agua, la retención y el suministro de nutrientes, el drenaje y la lixiviación de nutrientes, por ejemplo, los suelos más gruesos generalmente tienen una menor capacidad para retener nutrientes que los suelos más finos. Sin embargo, esta capacidad se reduce a medida que los suelos de textura fina sufren una lixiviación intensa en ambientes húmedos (McClellan, 2021, párr. 2).

La textura de un suelo se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla expresados como porcentajes en peso, los cuales permiten clasificar el suelo texturalmente usando el triángulo textural, de esta manera los suelos con la textura más fina se denominan suelos arcillosos, mientras que los suelos con la textura más gruesa se denominan arenas. Sin embargo, un suelo que tiene una mezcla relativamente uniforme de arena, limo y arcilla y exhibe las propiedades de cada uno por separado se llama franco (Jensen et al., 2017).

La textura del suelo está estrechamente relacionada con las propiedades coloidales importantes que las arcillas imparten a los suelos, que incluyen la retención e intercambio iónico y molecular, la adsorción de gases y agua, la contracción y la expansión (Bohn, 1993, p. 56).

Esta propiedad influye en la fertilidad de los suelos al influir en:

- La aireación.
- La capacidad de retención de agua.
- La capacidad de retención de nutrientes.

La mayoría de los suelos tienen las características del complejo adsorbente que les confieren las arcillas, a causa de la actividad eléctrica y la abundancia de éstas. (Seoáñez, 1999, p. 91).

**Tabla 2.***Grupos texturales de los suelos*

<b>Grupos Texturales</b>		
<b>Símbolo</b>	<b>Grupos</b>	<b>Textura</b>
G	Gruesa	Arena (A)
		Arena franca (AF)
MG	Moderadamente Gruesa	Franco arenosa (FA)
		Franca (F)
M	Media	Franca limosa (FL)
		Limo (L)
MF	Moderadamente Fina	Franco arcillosa (FAr)
		Franco arcillo arenosa (FArA)
F	Fina	Franco arcillo limosa (FArL)
		Arcillo arenosa (ArA)
		Arcillo limosa (ArL)
		Arcilla (Ar)

*Nota.* Adaptado del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022, D.S. N° 005-2022-MIDAGRI. Dominio público.

La estructura del suelo es quien determina junto con la textura, las capacidades de circulación del agua y de aireación. Los suelos de textura arenosa tienen un exceso de porosidad eficaz (macro), que se traduce en una aireación adecuada, pero en poca reserva de agua útil y poca capacidad de campo. (McClellan, 2021, párr.13).

### **1.1.6 pH del suelo**

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de la acidez y alcalinidad del suelo, lo que representa la concentración de hidrógeno en la solución terrestre, así esta propiedad química es vital porque influye en la conducta y la evolución de los componentes necesarios en el rendimiento de los cultivos, la liberación de nutrientes del suelo y la actividad microbiana del suelo (Zhang,

Wu y Liu, 2019, p. 4). Además, controla la solubilidad, la movilidad y la biodisponibilidad de los oligoelementos a través de reacciones de precipitación- disolución como resultado de las cargas dependientes del pH en las fracciones de suelo mineral y orgánico, por ejemplo, las cargas negativas dominan en pH alto mientras que las cargas positivas prevalecen en valores de pH bajos (Neina, 2019, p. 2).

La mayoría de suelos tienen una carga negativa debido a las cargas de este mismo signo de los silicatos laminares y a la materia orgánica, aunque los suelos altamente intemperizados poseen una carga positiva a pH bajo. (Bohn, 1993, p. 85).

Cargas positivas y negativas pueden ser balanceadas por cantidades equivalentes de aniones y cationes, respectivamente. El pH, en el cual la superficie transporta igual cantidad de cargas positivas y negativas, es llamado carga de punto cero (CPZ) o punto cero de carga neta. El CPZ es una propiedad importante de los óxidos de hierro. En suelos que presentan estos óxidos, el pH puede influir en la adsorción de cationes y aniones, así como en arcillas dispersas en el agua, por la interacción entre los óxidos y la carga negativa de las arcillas silicatadas (Acevedo et al., 2004).

### **Tabla 3.**

#### *Niveles de pH del suelo*

<b>Rangos (pH)</b>	<b>Clases</b>
Menos de 3,5	Ultra ácido
3,6 - 4,4	Extremadamente ácido
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino

Rangos (pH)	Clases
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalino
Más de 9,0	Muy fuertemente alcalino

*Nota.* Adaptado del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022, D.S. N° 005-2022-MIDAGRI. Dominio público.

Una modificación al alza o baja del pH puede ocasionar alteraciones muy importantes en lo que se refiere a no disponibilidad (carencias o bloqueos) de elementos por un lado o excesos (toxicidad) por otro.

El pH es un factor clave para la degradación de compuestos cianurados, en soluciones con  $\text{pH} < 9.2$  el cianuro tiene a volatilizarse y perderse como cianuro libre en la forma de ácido cianhídrico (HCN) tóxico, aunque el HCN puede ser asimilado y degradado por algunos microorganismos, resulta poco claro establecer si la disminución ocurre por acción de los microorganismos o por pérdida a través de la volatilización. Muchas investigaciones orientadas a la biorremediación de cianuro se han realizado con pH cercanos a la neutralidad, sin embargo, existe algunos reportes de degradación de cianuro por diferentes microorganismos a pH alcalinos. (Neina, 2019, p.3).

### ***1.1.7 Materia orgánica del suelo***

La materia orgánica del suelo es una acumulación de materia de plantas muertas, parcialmente descompuestas y residuos de animales y plantas resintetizados parcialmente. En una unidad de masa, esta porción orgánica es la fracción químicamente más activa del suelo. Dicha porción almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes (CIC) y regula los cambios de pH, propicia también las reacciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbono. (Bohn, 1993, p.156).

**Tabla 4.***Materia orgánica del suelo*

Nivel	Materia Orgánica (%)	Fósforo disponible (ppm)	Potasio disponible (ppm)	Capacidad de intercambio catiónico (cmol (+) / kg de suelo)
Muy bajo	-	-	-	Menor de 6
Bajo	Menor de 2	Menor de 7	Menor de 100	6 - 12
Medio	2 – 4	7 – 14	100 - 240	12 - 14
Alto	Mayor de 4	Mayor de 14	Mayor de 240	Mayor de 14

*Nota.* Adaptado del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022, D.S. N° 005-2022-MIDAGRI. Dominio público.

La materia orgánica del suelo proporciona nitrógeno, fósforo y azufre para el crecimiento de la vegetación sirve como fuente de energía para los organismos de la microflora, y microfauna del suelo y fomenta la buena estructura de este. Además, influye indirectamente en la absorción vegetal de micronutrientes y cationes de metales pesados y en el funcionamiento (disponibilidad) de los herbicidas y otros productos químicos. (Bohn, 1993, p. 162).

### **1.1.8 Intercambio catiónico**

En el suelo se presenta por una parte el sistema o complejo coloidal sólido, con una serie de iones adsorbidos en la superficie de los coloides, y por otra la solución del suelo líquida en contacto intenso con el complejo coloidal, con el que intercambia iones. Se trata pues del número de enlaces negativos que pueden adsorber e intercambiar cationes de la solución acuosa. (Neina, 2019, p.6).

- **Capacidad de intercambio catiónico.** Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo como arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas, donde los cationes serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno, lo cual indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH entre otras

(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

La carga predominante negativa de los coloides del suelo retiene cationes en la película de agua sobre las superficies del coloide. Esta retención reduce la pérdida de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$  por lixiviación, al mismo tiempo que mantiene estos cationes disponibles para que sean captados por la vegetación. (McClellan, 2021, párr. 18).

- **Capacidad de intercambio aniónico.** En el suelo, la intensidad de intercambio aniónico es bastante menor que la de los cationes. Sin embargo, ciertos suelos retienen los aniones en forma intercambiable, como ocurre con  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$  y  $\text{PO}_4^{-3}$ . En los suelos ácidos, ricos en hidróxidos, es donde la intensidad de intercambio de aniones es mayor, sobre todo si existe caolinita. (Seoáñez, 1999, p. 103).

Los aniones son atraídos por los sitios cargados positivamente sobre una superficie, o repelidos por las cargas negativas. Los silicatos laminares de la fracción arcillosa de los suelos, normalmente se encuentran con carga negativa, de manera que los aniones tienden a ser repelidos de las superficies minerales. (Bohn, 1993, p. 207).

### ***1.1.9 Geología de Algamarca***

La formación geológica en Algamarca, ha sido producto de una alteración supergénica, es decir, de procesos de meteorización, donde se produjo oxidación. En estas capas es común encontrar los minerales oro y plata vinculados con la jarosita y la hematita. Por otro lado, en las capas en la que está presente el azufre, el oro suele encontrarse en granos menudos y muchas veces se vincula a la pirita, mientras que la plata se presenta en su mayoría como un sulfosal. Además, otros elementos como arsénico, cobre, potasio, bismuto, bario, hierro, plomo y mercurio se

encuentran enriquecidos en esta zona debido a las condiciones hidrotermales que se presentaron (García, 2018, p.76).

Los resultados obtenidos para la modificación del estudio de impacto ambiental del proyecto minero Shahuindo, evidencian un potencial de generación de acidez para gran parte de las muestras, principalmente cuando el contenido en azufre como sulfuro es superior al 0.1%. Se discrimina que el contenido en azufre es el factor de mayor relevancia en la producción de acidez. (MWH Perú S.A, 2015).

#### ***1.1.10 Índice de geoacumulación***

El índice de geoacumulación (Igeo) permite la evaluación de la contaminación mediante la comparación de las concentraciones actuales y preindustriales. Originalmente utilizado con los sedimentos del fondo (Müller, 1969, párr.5), también se puede aplicar en la evaluación de la contaminación del suelo.

Se calcula usando la siguiente ecuación:

#### **Ecuación 1.**

*Índice de geoacumulación*

$$\mathbf{Igeo} = \log_2[Cn / 1.5Bn]$$

*Nota.* Adaptado de Índice de geoacumulación, clases Igeo y designaciones derivadas de calidad de sedimentos, Müller, 1981, Instituto de Investigación de Sedimentos de la Universidad de Heidelberg Alemania. Sin copyright indicado.

Dónde:

- Igeo: Índice de geoacumulación (geoaccumulation index).
- Cn: Es el contenido del elemento examinado en el entorno examinado (muestra) en mg/Kg.

- Bn: Es el contenido del elemento examinado en el entorno de referencia (fondo geoquímico) en mg/Kg.
- 1.5: La constante 1.5 nos permite analizar las fluctuaciones naturales en el contenido de una sustancia dada en el ambiente y las influencias antropogénicas muy pequeñas.

Müller (1981) ha distinguido seis clases del índice de geoacumulación que se indican en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Índice de geoacumulación*

Descripción	Rango	Clase
No contaminado	$I_{geo} \leq 0$	0
No contaminado a moderadamente contaminado	$0 < I_{geo} < 1$	1
Moderadamente contaminado	$1 < I_{geo} < 2$	2
De moderado a fuertemente contaminado	$2 < I_{geo} < 3$	3
Fuertemente contaminado	$3 < I_{geo} < 4$	4
De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado	$4 < I_{geo} < 5$	5
Extremadamente contaminado	$I_{geo} \geq 5$	6

*Nota.* Adaptado de Índice de geoacumulación, clases  $I_{geo}$  y designaciones derivadas de calidad de sedimentos, Müller, 1981, Instituto de Investigación de Sedimentos de la Universidad de Heidelberg Alemania. Sin copyright indicado.

## 1.2 Definición de términos básicos

- **Cianuro total:** se refiere a la suma total de todas las formas químicas inorgánicas de cianuro que se disocian y liberan cianuro libre cuando se someten a reflujos en condiciones fuertemente ácidas, el cual se determina analíticamente mediante destilación de ácido fuerte o radiación UV y exposición a ácido fuerte. (Gobierno de Columbia Británica, 2017, p.1).

- **Cianuro libre:** Forma de cianuro en hidrógeno molecular (HCN) biodisponible por encima de pH 11 o cianuro iónico (CN<sup>-</sup>) presente a un pH de 7 o menos en agua. El cianuro difusible se recupera y determina mediante análisis de microdifusión o difusión de gas (Gobierno de Columbia Británica, 2017, p.2).
- **Nivel de fondo o fondo geoquímico:** Es la concentración en el suelo de los químicos que no fueron generados por la actividad objeto de análisis y que se encuentran en el suelo de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la actividad bajo análisis. (MINAM, 2014, p.5).

## Capítulo III

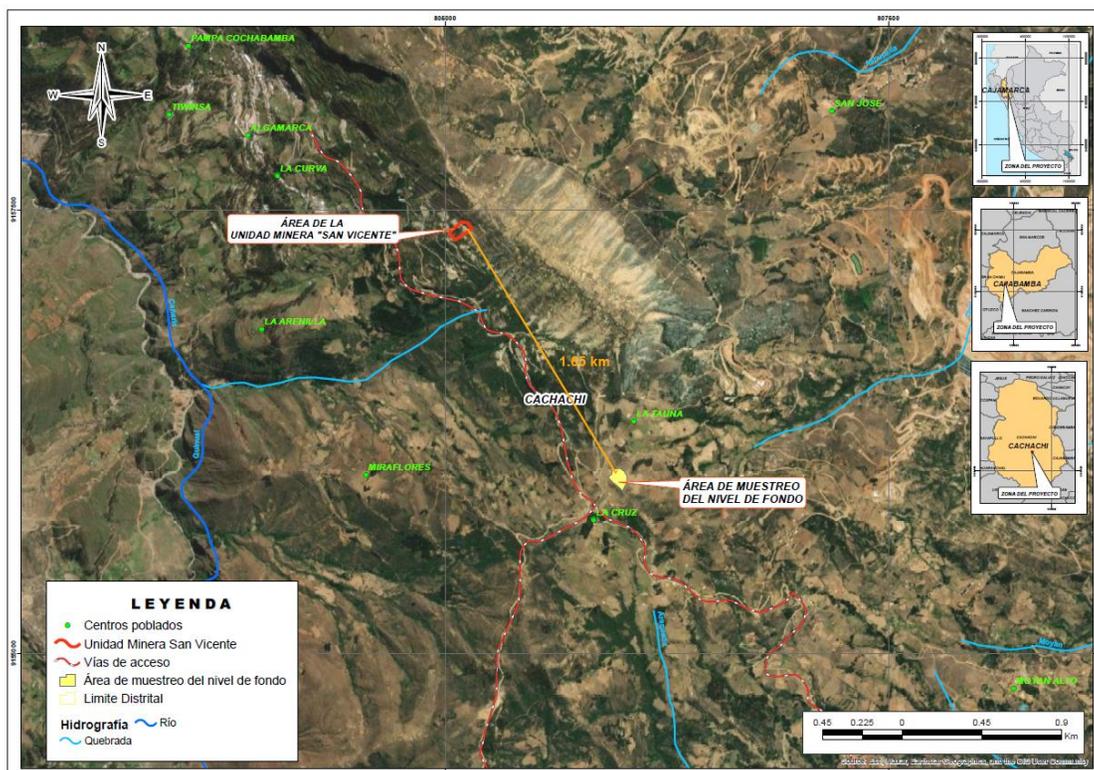
### Marco Metodológico

#### 2.1 Ubicación del área de estudio

El presente estudio de investigación se llevó a cabo en el centro poblado de Algamarca, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca. Geográficamente se ubica en la región nor andina del país, en la margen izquierda del río Cañaris, perteneciente a la cuenca Crisnejas.

#### Figura 2.

*Mapa de ubicación del área de estudio*



### 2.1.1 Área de estudio

Los muestreos fueron realizados en dos áreas, la primera, constituye el área del muestreo de identificación (área con influencia de la unidad minera) y la segunda el área de muestreo del nivel de fondo (área sin influencia de la unidad minera), ambas áreas se encuentran separadas a una distancia de 1.6 Km una de la otra.

En la Tabla 6 se puntualizan las coordenadas UTM de los seis vértices que conciertan el área de la unidad minera.

**Tabla 6.**

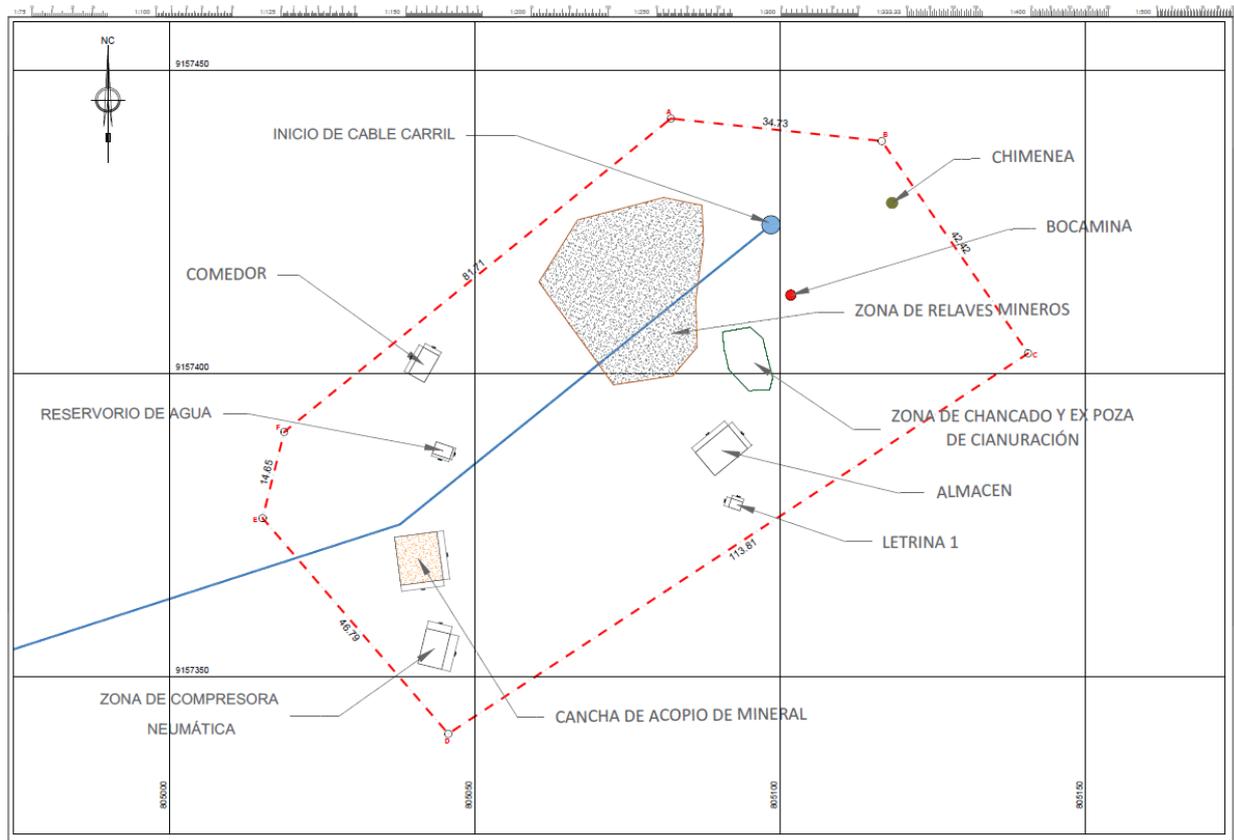
*Coordenadas del área de la unidad minera San Vicente*

Vértice	Este	Norte
A	805082.1130	9157441.9885
B	805116.6481	9157438.2768
C	805140.6284	9157403.2828
D	805045.6694	9157340.5530
E	805015.2592	9157376.1067
F	805018.8051	9157390.3259
ÁREA TOTAL	6781.51 m <sup>2</sup>	
PERIMETRO	334.11 m	

*Nota.* Adaptado del Instrumento de Gestión Ambiental y Fiscalización para la Formalización de Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal [IGAFOM], 2018. Dominio público.

**Figura 3.**

Área de la unidad minera “San Vicente”



*Nota.* Adaptado del Instrumento de Gestión Ambiental y Fiscalización para la Formalización de Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal [IGAFOM], 2018. Dominio público.

En la Tabla 7 se puntualizan las coordenadas UTM de los vértices que conciertan el área de muestreo del nivel de fondo.

**Tabla 7.**

*Coordenadas del área de muestreo del nivel de fondo*

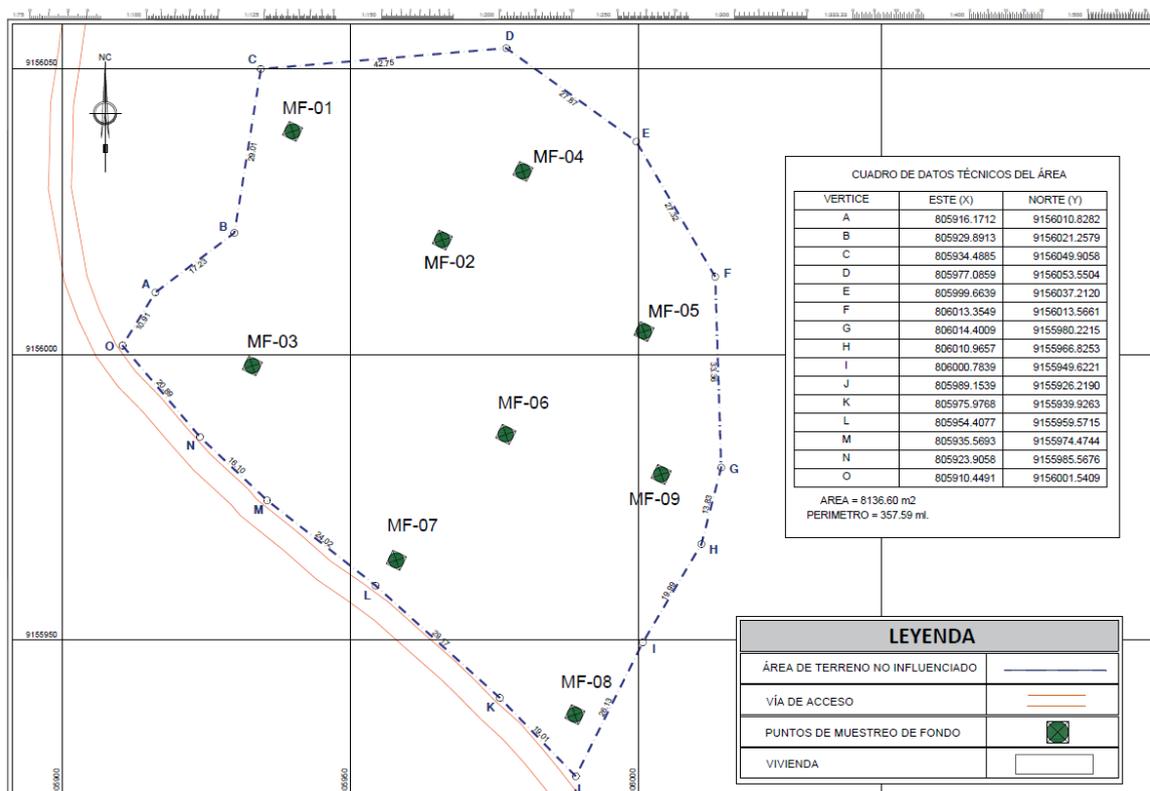
Vértice	Este	Norte
A	805916.1712	9156010.8282
B	805929.8913	9156021.2579
C	805934.4885	9156049.9058
D	805977.0859	9156053.5504

Vértice	Este	Norte
E	805999.6639	9156037.2120
F	806013.3549	9156013.5661
G	806014.4009	9155980.2215
H	806010.9657	9155966.8253
I	806000.7839	9155949.6221
J	805989.1539	9155926.2190
K	805975.9768	9155939.9263
L	805954.4077	9155959.5715
M	805935.5693	9155974.4744
N	805923.9058	9155985.5676
O	805910.4491	9156001.5409
ÁREA TOTAL	8136.60 m <sup>2</sup>	
PERIMETRO	357.59 m	

*Nota.* Estos datos fueron obtenidos en campo. Las coordenadas UTM se encuentran en metros; El sistema de coordenadas en UTM WGS 84 – 18L.

**Figura 4.**

*Ubicación de puntos de muestreo de nivel de fondo*



## **2.2 Materiales**

### ***2.2.1 Material experimental***

- Muestras de suelos con influencia de la unidad minera San Vicente. (muestreo de identificación).
- Muestras de suelos sin influencia de la unidad minera (muestreo de nivel de fondo).

### ***2.2.2 Materiales de campo***

- Equipos de protección personal (Guantes, Mascarillas quirúrgicas, Zapatos de seguridad).
- Cámara fotográfica.
- GPS Garmin Oregon.
- Wincha de 50 m.
- Wincha de 5 m.
- Espátulas de acero inoxidable.
- Cuchillo de acero.
- Bolsas plásticas de polietileno con cierre hermético capacidad 1kg.
- Frascos plásticos con tapa.
- Pissetas.
- Agua destilada.
- Etiquetas.
- Cinta de embalaje transparente.
- Cooler.
- Marcador indeleble.
- Plumones.
- Libreta de apuntes.

- Lápices.
- Pizarra acrílica.
- Balanza de 5 Kg.
- Estacas.
- Plástico.

## 2.3 Metodología

De acuerdo a lo establecido en la “Guía para muestreo de suelos” del Ministerio del Ambiente del año 2014, aprobada con Resolución N° 085-2014-MINAM, se realizaron dos tipos de muestreo:

- Muestreo de identificación. En los suelos influenciados por la unidad minera.
- Muestreo de nivel de fondo: En los suelos sin influencia de la unidad minera.

**Tabla 8.**

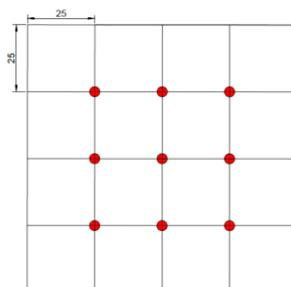
*Metodología utilizada para el muestreo de suelos*

Tipo de muestreo	Patrón de muestreo	Área	Tipo de muestra	Total de muestras
De identificación	Sistemático y equidistante	Con influencia de la unidad minera	Simple	9 a los 10 cm
				9 a los 20 cm
De nivel de fondo	Aleatorio simple	Sin influencia de la unidad minera	Compuesta	1 de los 10 cm
				1 de los 20 cm

*Nota.* Adaptado de guía de muestreo de suelos, 2014. Dominio público.

### 2.3.1 Muestreo de identificación

Se realizó un muestreo sistemático y equidistante, utilizando el patrón de muestreo con distribución uniforme de rejilla regular.

**Figura 5.***Rejillas regulares*

*Nota.* Adaptado de guía de muestreo de suelos, 2014. Dominio público.

Para contar con un límite de confianza aceptable, se determinó el tamaño de la muestra respetando el número mínimo de puntos de muestreo indicado en la guía, la cual establece que, para un muestreo de identificación y de acuerdo al área de la unidad minera (0.68 hectáreas) el número mínimo es de seis puntos.

Teniendo en cuenta ello, se determinó la distancia de rejilla de 25 m de separación (red de distanciamiento rígido), haciendo un total de nueve puntos de muestreo, con lo cual se superó el número mínimo indicado.

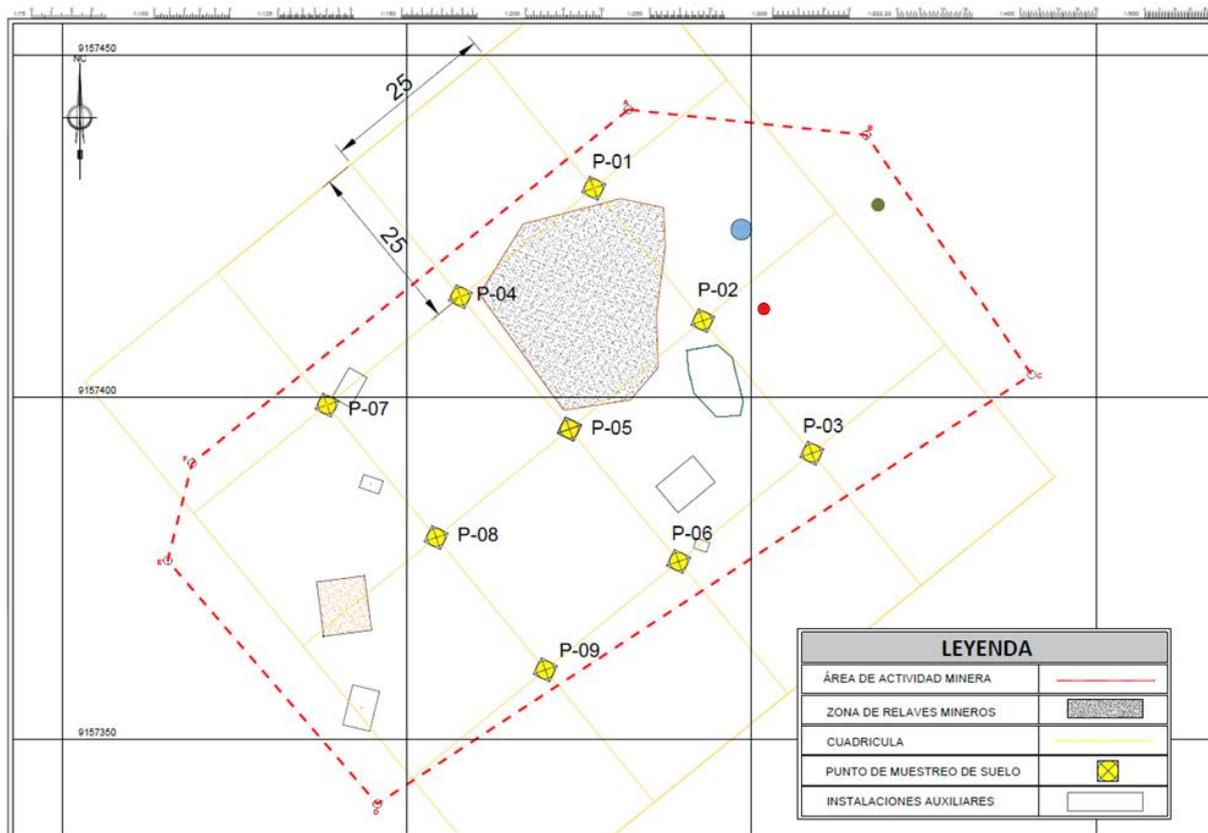
Las rejillas se trazaron con wincha y cordel, luego se pusieron las estacas en cada punto de intersección de las rejillas para su rápida identificación. En cada punto se procedió a excavar hoyos de 40 cm largo x 40 cm de ancho x 40 cm de profundidad, si bien las muestras fueron extraídas a los diez y veinte centímetros, se cavó una mayor profundidad con la finalidad de no alterar la toma de muestras.

Finalmente se obtuvieron muestras simples desde la superficie hasta los veinte centímetros de profundidad, obteniendo un kilogramo de muestra para el análisis de cianuro libre y un kilogramo de muestra para los análisis de pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo. Luego se obtuvo de cada punto otra muestra, la cual fue extraída a los diez centímetros de profundidad.

Asimismo, para una adecuada conservación de las muestras colectadas, se procedió a guardarlas en frascos con tapa para el análisis de cianuro libre y en bolsas herméticas para los demás parámetros, finalmente fueron colocados en tres coolers herméticos, los cuales fueron llevados al laboratorio SGS del Perú S.A.C para su análisis.

**Figura 6.**

*Ubicación de los puntos de muestreo de Identificación*



En la Tabla 9 se presentan las coordenadas y la altitud pertenecientes a los puntos de muestreo de identificación.

**Tabla 9.***Coordenadas y altitud de los puntos de muestreo de Identificación*

<b>Punto de Muestreo</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Referencia</b>
P-01	805089	9157417	3392	A 4 m de la relavera
P-02	805101	9157395	3393	A 9 m de la relavera
P-03	805111	9157374	3391	A 34 m de la relavera
P-04	805068	9157405	3376	A 1 m de la relavera
P-05	805081	9157385	3375	A 2.5 m de la relavera
P-06	805091	9157364	3373	A 27 m de la relavera
P-07	805044	9157400	3361	A 27 m de la relavera
P-08	805056	9157378	3359	A 26 m de la relavera
P-09	805067	9157355	3360	A 38 m de la relavera

*Nota.* Estos datos fueron obtenidos en campo. Las coordenadas UTM se encuentran en metros; El sistema de coordenadas en UTM WGS 84 – 18L; la altura se encuentra expresada en “m.s.n.m.”.

### **2.3.2 Muestreo de nivel de fondo**

Para la determinación de los niveles de fondo, a fin de obtener puntos de muestreo representativos, se tomó en cuenta los criterios de selección del lugar:

- a) En primer lugar, la ubicación del área de muestreo ya que debía encontrarse en los exteriores de la unidad minera, pero no muy apartada de esta, es por ello que se seleccionó un área ubicada a 1.6 Km al sureste de la unidad minera; además la ubicación del área es importante para evitar que contenga materiales de depósito o acumulados por arrastre mecánico de las aguas superficiales o el viento.
- b) En segundo lugar, se tomó en cuenta el relieve de la zona, su geografía y geología, ya que debía ser similar al del área de estudio (Formación Santa).
- c) En tercer lugar, se tomó en cuenta el área climática y de vegetación, similares al del área de estudio (zona de clima semi seco, semi frio, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda; y ubicada en la zona de vida bosque húmedo Montano Tropical).

Se realizó un muestreo aleatorio simple para escoger los nueve puntos en los que se recolectaron muestras simples para finalmente conformar una muestra compuesta. Una vez escogidos, se tomaron muestras de un kilogramo, tanto de los 10 centímetros como de los 20 centímetros de profundidad. A diferencia del muestreo de identificación, se procedió a realizar el mezclado y cuarteo para escoger las muestras compuestas, las cuales se guardaron para su conservación y fueron enviadas al laboratorio SGS del Perú S.A.C para su análisis.

En la Tabla 10 se detalla la altitud y las coordenadas de los puntos.

**Tabla 10.**

*Coordenadas y altitud de los puntos de muestreo del nivel de fondo*

<b>Punto de Muestreo</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altitud (msnm)</b>
MF-01	805940	9156039	3358
MF-02	805966	9156020	3359
MF-03	805933	9155998	3361
MF-04	805980	9156032	3357
MF-05	806001	9156004	3362
MF-06	805977	9155986	3361
MF-07	805958	9155964	3360
MF-08	805989	9155937	3360
MF-09	806004	9155979	3362

*Nota.* Estos datos fueron obtenidos en campo. Las coordenadas UTM se encuentran en metros; El sistema de coordenadas en UTM WGS 84 – 18L; la altura se encuentra expresada en “m.s.n.m.”.

Finalmente, cada valor obtenido fue comparado con los valores del Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor del año 2022.

### ***2.3.3 Parámetros analizados***

El cianuro libre fue el parámetro escogido para evaluar los suelos en el área de estudio. Asimismo, se tomaron en cuenta los parámetros: pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo para diagnosticar las características fisicoquímicas de este.

Cabe resaltar, que los parámetros elegidos se encuentran vinculados de manera directa con la minería y la contaminación que esta actividad puede producir en el suelo.

### ***2.3.4 Técnicas de procesamiento y análisis de datos***

Para el análisis estadístico, se utilizó el método de análisis de correlación y regresión lineal, con lo cual se determinó la influencia de la concentración del cianuro libre, sobre los parámetros fisicoquímicos del suelo (pH, textura del suelo, materia orgánica, CIC). La correlación cuantifica como están relacionadas dos variables, mientras que la regresión lineal consiste en generar una ecuación (modelo) que, basándose en la relación existente entre ambas variables, permita predecir el valor de una a partir de la otra. Este análisis se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson utilizando el software de SPSS.

Además, se utilizó la prueba estadística de la T-stuends, para determinar si existe diferencias significativas entre los valores obtenidos en los suelos influenciados y en los suelos sin influencia de la unidad minera, utilizando el software de SPSS.

Adicionalmente, se realizó el procesamiento a partir de la base de datos con el programa ArcGis 10.5, generando mapas de isoconcentraciones (distribución espacial de las concentraciones de cianuro libre).

## Capítulo IV

### Resultados y Discusión

#### 4.1 Concentración de cianuro libre

**Tabla 11.**

*Cianuro libre de los suelos con influencia de la unidad minera*

Punto de muestreo	Cianuro libre (mg/Kg)		ECA suelo agrícola	ECA suelo residencial/ parques	ECA suelo comercial/ industrial/ extractivo
	10 cm	20 cm			
P-01	0.27	0.24			
P-02	0.40	0.37			
P-03	0.26	0.21			
P-04	0.48	0.38			
P-05	0.46	0.45	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>8.0</b>
P-06	0.25	0.19			
P-07	0.23	0.18			
P-08	0.16	0.12			
P-09	0.14	0.11			

**Tabla 12.**

*Cianuro libre de los suelos sin influencia de la unidad minera*

Punto de muestreo	Cianuro libre (mg/Kg)		ECA suelo agrícola	ECA suelo residencial/ parques	ECA suelo comercial/ industrial/ extractivo
	10 cm	20 cm			
Nivel de fondo	0.09	0.11	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>8.0</b>

En la Figura 7, de acuerdo al muestreo del nivel de fondo, se observa que a los 10 cm de profundidad hay menor cantidad de cianuro libre que a los 20 cm de profundidad, sin embargo, en las muestras de identificación en los suelos influenciados por la unidad minera, la situación es inversa, las concentraciones de cianuro se encuentran en mayor

cantidad a los 10 cm de profundidad que a los 20 cm, además, todas las muestras de identificación superan los niveles de fondo.

De acuerdo a los Estándares de Calidad Ambiental para suelo, las concentraciones de cianuro libre del muestreo de identificación, no superan los estándares de calidad ambiental para suelo agrícola, suelo residencial/parques ni el de suelo comercial/industrial/extractivo.

Estos resultados son respaldados por Razanamahandry (2018) quien refiere que los principales parámetros ambientales que controlan la distribución de contaminantes son las precipitaciones, la temperatura, el tipo de suelo y la distancia a la fuente de contaminación. Además, varios parámetros químicos, como el pH y el contenido de materia orgánica, también pueden ayudar a explicar la distribución espacial del contaminante.

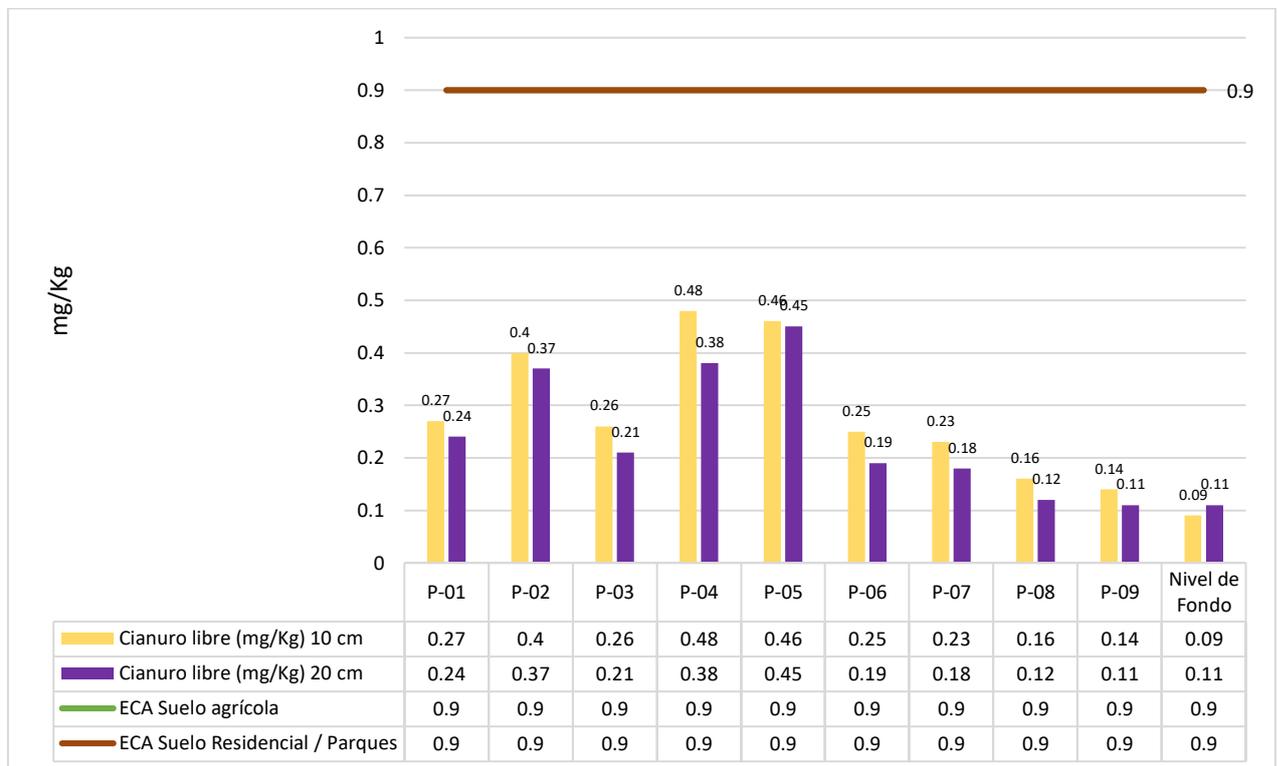
Verticalmente, los niveles de fondo muestran menor contenido de cianuro libre a los 10 cm de profundidad, ya que el comportamiento subterráneo en el suelo se rige por procesos químicos y biológicos (Kjeldsen, 1999). Los procesos químicos relevantes son las reacciones de tipo adsorción, volatilización, complejación, sulfuración y disolución-precipitación; por lo que, al estar con mayor contacto superficial, el cianuro libre tiene mayor probabilidad de volatilización. Por otro lado, la actividad microbiana y la absorción de plantas pueden afectar el comportamiento del cianuro en el medio ambiente (Kumar, 2017).

En el área de la unidad minera la situación cambia, ya que las mayores concentraciones de cianuro libre se encuentran a los 10 cm de profundidad, principalmente los puntos más cercanos a la relavera, resultados similares a los encontrados por Razanamahandry (2018), siendo las concentraciones más altas de

cianuro libre encontradas alrededor de los sitios de cianuración, ya que, al ser la fuente de contaminación, sigue lixiviando contenidos de cianuro.

### Figura 7.

*Concentración de cianuro libre a 10 cm y 20 cm de profundidad*



## 4.2 Textura de los suelos

La textura de los suelos, se muestran en las tablas 13 y 14, además, también se incluyen los tipos de textura identificados de acuerdo al método del triángulo textural.

**Tabla 13.***Textura de los suelos con influencia de la unidad minera*

<b>Punto</b>	<b>P-01 (10 cm)</b>	<b>P-01 (20 cm)</b>	<b>P-02 (10 cm)</b>	<b>P-02 (20 cm)</b>	<b>P-03 (10 cm)</b>	<b>P-03 (20 cm)</b>	<b>P-04 (10 cm)</b>	<b>P-04 (20 cm)</b>	<b>P-05 (10 cm)</b>	<b>P-05 (20 cm)</b>	<b>P-06 (10 cm)</b>	<b>P-06 (20 cm)</b>	<b>P-07 (10 cm)</b>	<b>P-07 (20 cm)</b>	<b>P-08 (10 cm)</b>	<b>P-08 (20 cm)</b>	<b>P-09 (10 cm)</b>	<b>P-09 (20 cm)</b>
Arena (0.05- 2.00mm)	94%	89%	86%	86%	85%	92%	88%	89%	92%	92%	90%	92%	95%	91%	80%	79%	68%	79%
Limo (0.002- 0.05mm)	5%	9%	11%	11%	12%	8%	9%	6%	5%	6%	8%	8%	5%	8%	14%	15%	22%	15%
Arcilla (<0.002 mm)	1%	2%	3%	3%	3%	0%	3%	5%	3%	2%	2%	0%	0%	1%	6%	6%	10%	6%
<b>Textura*</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>

\* *Nota.* Valor de acuerdo al Triángulo textural del Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.

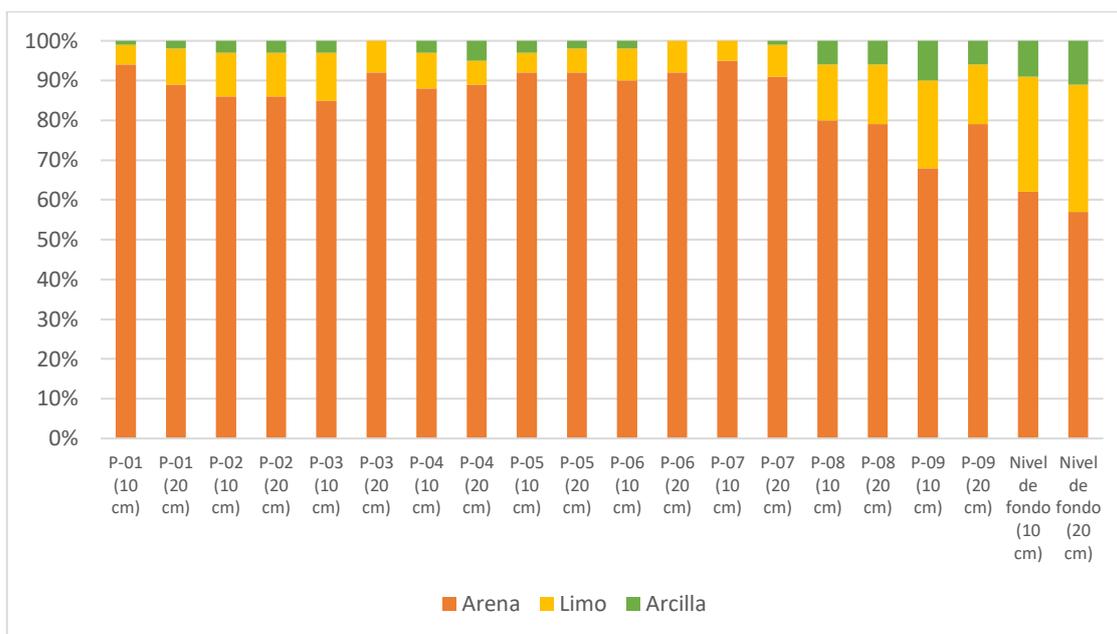
**Tabla 14.***Textura de los suelos sin influencia de la unidad minera*

<b>Punto</b>	<b>Nivel de fondo (10 cm)</b>	<b>Nivel de fondo (20 cm)</b>
Arena (0.05-2.00 mm)	62%	57%
Limo (0.002-0.05 mm)	29%	32%
Arcilla (<0.002 mm)	9%	11%
<b>Textura*</b>	<b>Franco arenoso</b>	<b>Franco arenoso</b>

\* *Nota.* Valor de acuerdo al Triángulo textural del Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.

En la Figura 8, de acuerdo al muestreo de fondo y los suelos influenciados por la unidad minera, predominan para ambos los suelos arenosos, también llamados suelos ligeros, no poseen propiedades coloidales ni retienen los nutrientes, además presentan mala estructura, alta aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua. (Seoáñez, 1999).

Además, los resultados también muestran que verticalmente tanto a los 10 cm y 20 cm de profundidad, los suelos son arenosos, sin diferencias significativas, esto debido que en general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas (Sposito, 1989), y no por la acción de una sustancia como el cianuro, por lo cual no se modifica la estructura del suelo y su porosidad.

**Figura 8.***Textura de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad*

### 4.3 pH de los suelos

**Tabla 15.***pH de los suelos con influencia de la unidad minera*

Punto	pH		Clase*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
P-01	6.23	6.15	Ligeramente ácido	Ligeramente ácido
P-02	8.90	8.62	Fuertemente alcalino	Fuertemente alcalino
P-03	6.16	5.89	Ligeramente ácido	Moderadamente ácido
P-04	9.22	8.77	Muy fuertemente alcalino	Fuertemente alcalino
P-05	9.16	9.09	Muy fuertemente alcalino	Muy fuertemente alcalino
P-06	6.19	5.75	Ligeramente ácido	Moderadamente ácido
P-07	6.11	5.62	Ligeramente ácido	Moderadamente ácido
P-08	5.66	5.52	Moderadamente ácido	Fuertemente ácido
P-09	5.65	5.56	Moderadamente ácido	Fuertemente ácido

\* Nota. Valor de acuerdo al Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.

**Tabla 16.***pH de los suelos sin influencia de la unidad minera*

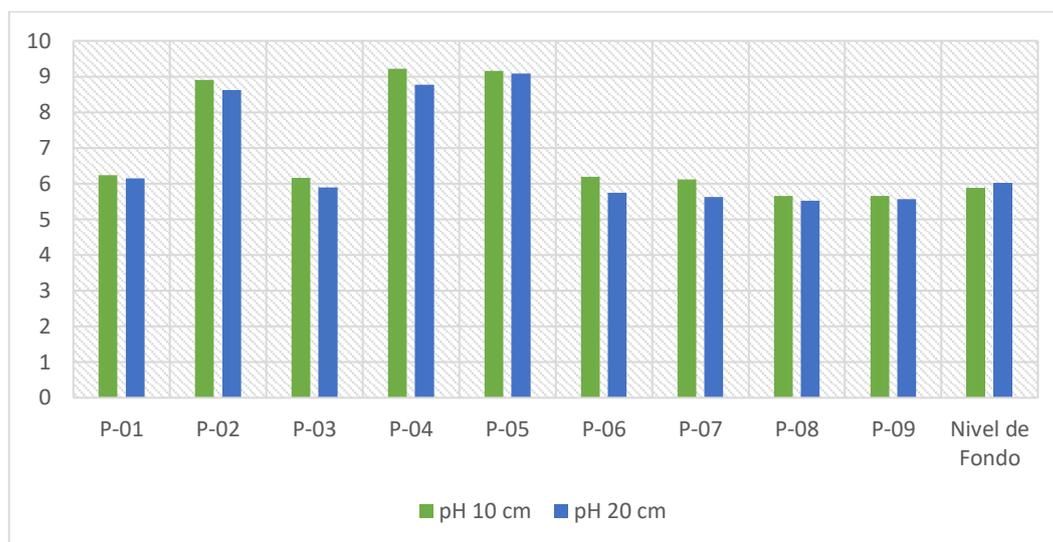
Punto	pH		Clase*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
Nivel de fondo	5.88	6.02	Moderadamente ácido	Moderadamente ácido

\* *Nota.* Valor de acuerdo al Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.

En la Figura 9, se muestra que los valores de pH encontrados en los suelos influenciados por la unidad minera, no tiene diferencias significativas con los niveles de fondo, siendo predominantes los valores ácidos, a excepción de los puntos cercanos a la relavera, en donde predominan los valores alcalinos. De acuerdo con Pérez e Higuera (2008), estos valores de pH se deben a la relación directa que existe entre el pH, la concentración de cianuro y la concentración de oxígeno disuelto en solución.

El pH es un factor clave para la degradación de compuestos cianurados, al tener valores de  $\text{pH} < 9.2$  el cianuro tiene a volatilizarse y perderse como cianuro libre en la forma de ácido cianhídrico (HCN) tóxico (Neina, 2019), sin embargo, en pH alcalino como en los puntos P-02, P-04 y P-05 se evita la volatilización, por lo cual los valores de cianuro libre son más altos.

De acuerdo los niveles de fondo, se observa que verticalmente a los 10 cm de profundidad el pH es menor (más ácido) que, a los 20 cm de profundidad, sin embargo, en las muestras de identificación en los suelos influenciados por la unidad minera, la situación es inversa, el pH a los 10 cm es más alcalino que a los 20 cm de profundidad, dicha situación se presenta debido a factores como la materia orgánica y las concentraciones de cianuro, ya que generan cargas negativas que dominan en pH alcalinos mientras que las cargas positivas prevalecen en valores de pH ácidos (Neina, 2019).

**Figura 9.***pH de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad*

#### 4.4 Materia orgánica de los suelos

**Tabla 17.***Materia orgánica de los suelos con influencia de la unidad minera*

Punto	Materia orgánica (%)		Nivel*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
P-01	0.1	0.2	Bajo	Bajo
P-02	0.3	0.4	Bajo	Bajo
P-03	0.3	0.7	Bajo	Bajo
P-04	0.2	0.3	Bajo	Bajo
P-05	0.2	0.2	Bajo	Bajo
P-06	0.3	1.0	Bajo	Bajo
P-07	4.1	4.3	Alto	Alto
P-08	1.4	1.8	Bajo	Bajo
P-09	1.7	1.9	Bajo	Bajo

\* Nota. Valor de acuerdo al Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.

**Tabla 18.***Materia orgánica de los suelos sin influencia de la unidad minera*

Punto	Materia orgánica (%)		Nivel*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
Nivel de fondo	2.4	2.7	Medio	Medio

\* *Nota.* Valor de acuerdo al Reglamento de Clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022

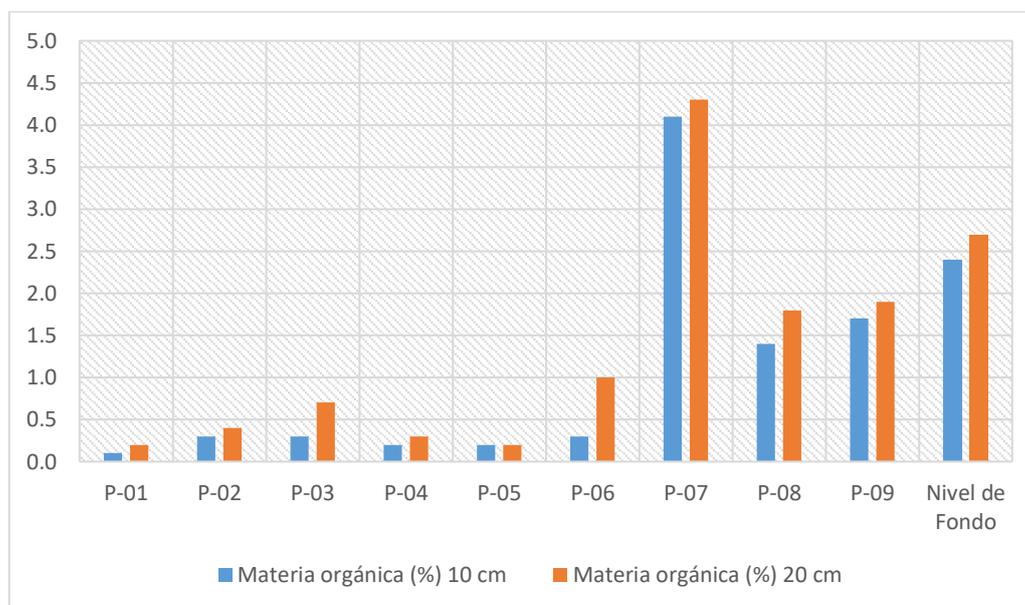
En la Figura 10, de acuerdo con los análisis obtenidos, en los suelos influenciados por la unidad minera encontramos porcentajes de materia orgánica que oscilan entre los valores de 0.1 a 4.3 siendo predominantes los niveles bajos, esto debido a la característica típica de los suelos arenosos que tienen bajo contenido de materia orgánica (Seoáñez, 1999). Dichos valores tienen diferencias significativas con los niveles de fondo, a excepción del punto P-07, que presenta niveles altos de materia orgánica, esta situación se debe a la cercanía del punto P-07 con el comedor de la unidad minera, donde diariamente son arrojados restos orgánicos de comida.

De acuerdo al muestreo de nivel de fondo, verticalmente se observa que el nivel de materia orgánica, a los 10 cm de profundidad la materia orgánica es menor que a los 20 cm de profundidad, dicha situación se presenta también en las muestras de identificación en los suelos influenciados por la unidad minera.

Que la materia orgánica se encuentre a mayor profundidad se debe a que en suelos arenosos, las sustancias químicas solubles, los minerales y la materia orgánica son arrastradas o se lixivian, hacia las capas más profundas del suelo, mientras los elementos menos solubles permanecen en las capas superiores del suelo (Bohn, 1993).

**Figura 10.**

*Materia orgánica de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad*



#### 4.5 Capacidad de intercambio catiónico

**Tabla 19.**

*CIC de los suelos con influencia de la unidad minera*

Punto	Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/kg)		Nivel*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
P-01	3.8	5.4	Muy bajo	Muy bajo
P-02	4.8	5.8	Muy bajo	Muy bajo
P-03	8.7	11.4	Bajo	Bajo
P-04	5.1	5.6	Muy bajo	Muy bajo
P-05	4.7	5.3	Muy bajo	Muy bajo
P-06	7.8	11.2	Bajo	Bajo
P-07	21.2	22.6	Alto	Alto
P-08	12.8	13.4	Medio	Medio
P-09	16.9	18.1	Alto	Alto

\* Nota. Valor de acuerdo al Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022

**Tabla 20.**

*CIC de los suelos sin influencia de la unidad minera*

Punto	Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/kg)		Nivel*	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
Nivel de fondo	22.0	26.3	Alto	Alto

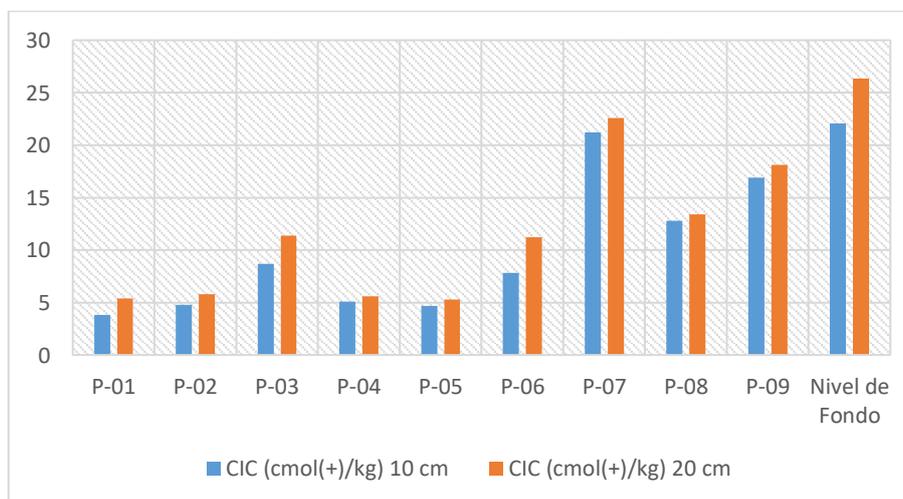
\* *Nota.* Valor de acuerdo al Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022

En la Figura 11, de acuerdo al muestreo de nivel de fondo, a los 10 cm de profundidad la CIC es menor que a los 20 cm de profundidad, dicha situación se presenta también en las muestras de identificación en los suelos influenciados por la unidad minera. Esto se debe a que la CIC está relacionada directamente con la materia orgánica y las arcillas del suelo (Bohn, 1993), por lo que, de acuerdo a lo anteriormente mostrado el contenido de materia orgánica y arcilla son de niveles bajos.

Los suelos identificados son arenosos, este tipo de suelos tienen menor CIC, por lo tanto, los cationes son retenidos sólo en una baja proporción, contribuyendo a que el pH del suelo sea ligeramente más ácido a 20 cm de profundidad (Seoáñez, 1999).

**Figura 11.**

CIC de los suelos a 10 y 20 cm de profundidad



#### **4.6 Relación del cianuro libre y la textura de los suelos**

De acuerdo a la investigación realizada el cianuro libre no modifica la textura del suelo, debido a que la estructura física del suelo está determinada por el tipo de material geológico del que se origina, (Sposito 1989) y no por la acción de una sustancia como el cianuro libre.

#### **4.7 Relación del cianuro libre y el pH de los suelos**

En la Tabla 21 y Figuras 12 y 13, se observa que el cianuro libre encontrado en los suelos a profundidades de 10 y 20 cm influye en el pH de los suelos, dado que el valor de significación para cada caso es menor al 0.05.

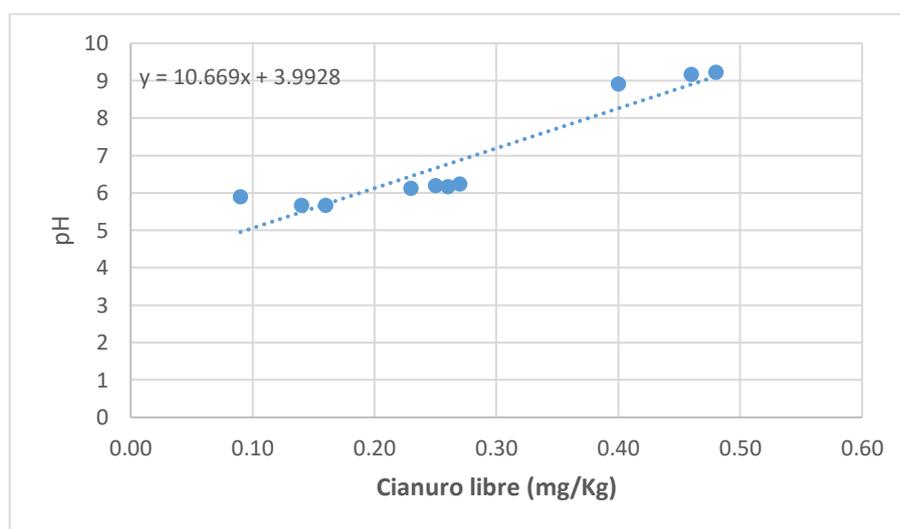
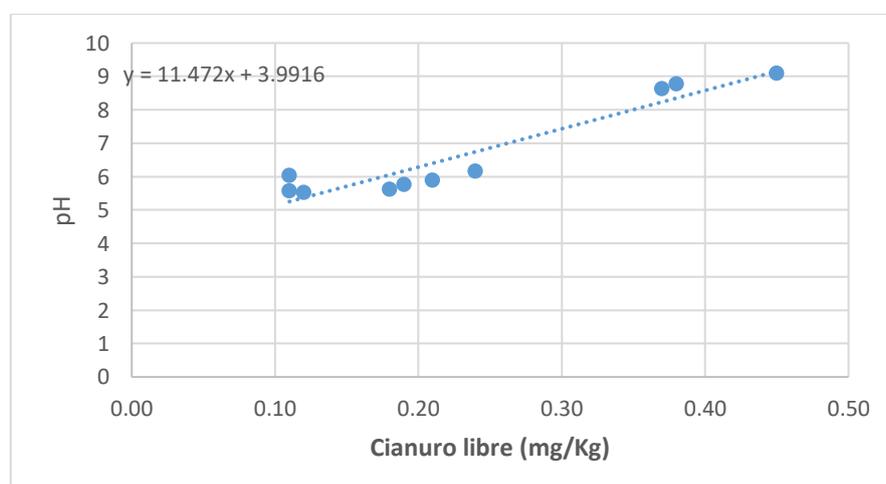
Además, el gráfico de la relación cianuro libre – pH, muestra una pendiente ascendente, por lo que las variables tienen una relación positiva, directamente proporcional y muy fuerte para cada caso ( $r=0.938$  para 10 cm y  $r=0.948$  para 20 cm), es decir, que un aumento de cianuro libre afecta al pH volviendo al suelo más alcalino. Por otro lado, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para el caso de los 10 cm de profundidad es de 0.8799, el cual indica que el 87.99 % del pH del suelo está influenciado por el cianuro libre, de igual manera para el caso de los 20 cm, el cianuro libre afecta al pH en un 89.86 %.

De acuerdo a lo indicado anteriormente, existe una relación directa entre cianuro libre sobre el pH y en sentido contrario, el pH sobre el cianuro libre de acuerdo a lo indicado Cahuana (2016), quien plantea que el pH de la solución a valores cercanos a 10.5 impide su volatilización.

Es importante indicar que las ecuaciones de regresión lineal, permitieron crear modelos lineales para describir la relación entre variables. Las ecuaciones son aplicables para los rangos de valores obtenidos en la presente investigación.

**Tabla 21.***Evaluación del contenido de cianuro libre y el pH de los suelos*

	Correlación de Pearson (r)	Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> )	Ecuación lineal	Valor de significación
<b>pH a 10 cm</b>	0.938	0.8799	pH = 10.669x + 3.9928	0.0001
<b>pH a 20 cm</b>	0.948	0.8986	pH = 11.472x + 3.9916	0.0000

**Figura 12.***Cianuro libre y el pH de los suelos a 10 cm de profundidad***Figura 13.***Cianuro libre y el pH de los suelos a 20 cm de profundidad*

#### 4.8 Relación del cianuro libre y la materia orgánica de los suelos

En la Tabla 22 y Figuras 14 y 15, se observa que el cianuro libre encontrado en los suelos a profundidades de 10 y 20 cm influye en la materia orgánica de los suelos, dado que el valor de significación para cada caso es menor al 0.05. Además, el gráfico de la relación cianuro libre – materia orgánica, muestra una pendiente descendente, por lo que las variables tienen una relación negativa, inversamente proporcional y moderada para cada caso ( $r = -0.571$  para 10 cm y  $r = -0.642$  para 20 cm), es decir, que un aumento de cianuro libre disminuye el contenido de materia orgánica del suelo.

De acuerdo a lo indicado anteriormente, al tener suelos arenosos y bajos en contenido de materia orgánica, existe poca acción de microorganismos (Bohn, 1993), si a esto se le suma que, en concentraciones altas, el cianuro es tóxico a estos pocos microorganismos (ATSDR, 2016), esto explica la disminución de los valores de materia orgánica.

Por otro lado, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para el caso de los 10 cm de profundidad es de 0.3256, el cual indica que el 32.56 % de la materia orgánica del suelo está influenciado por el cianuro libre, de igual manera para el caso de los 20 cm es de 0.4127, el cual indica que el cianuro afecta a la MO en un 41.27 %.

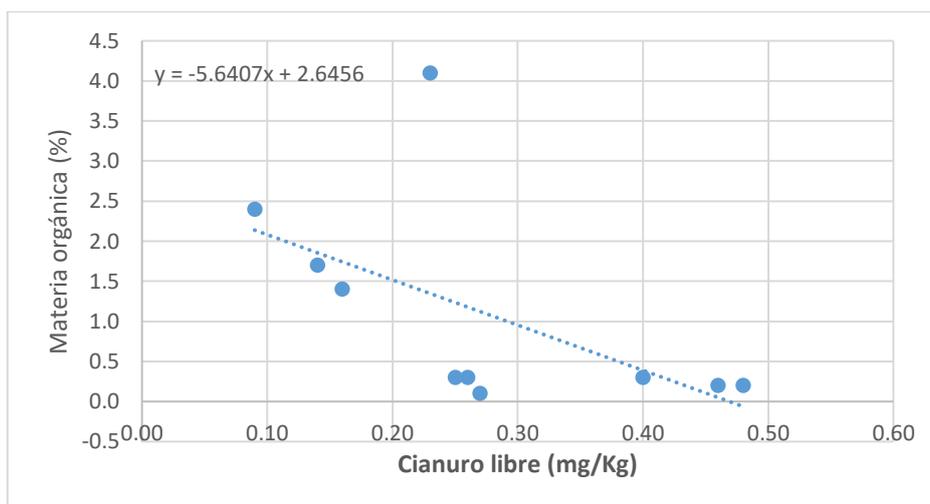
**Tabla 22.**

*Evaluación del contenido de cianuro libre y la materia orgánica de los suelos*

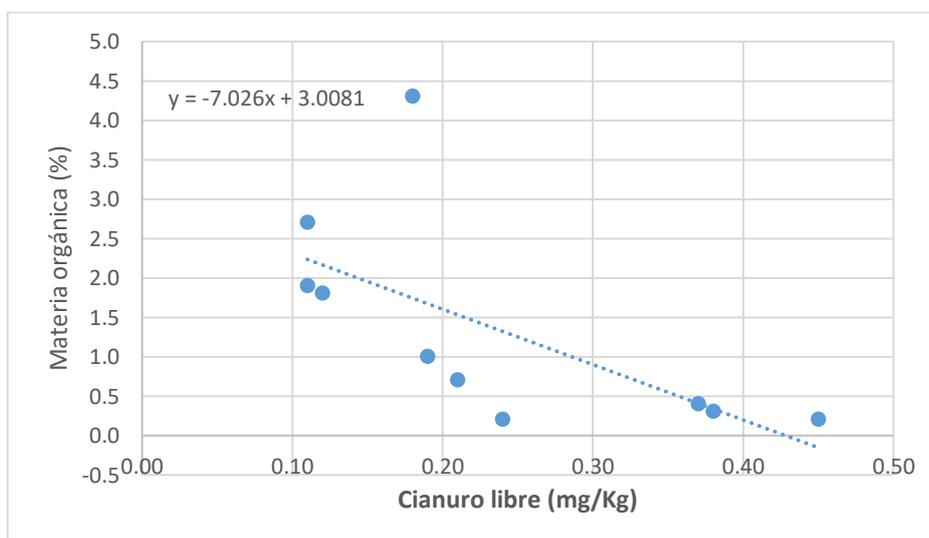
	<b>Correlación de Pearson (r)</b>	<b>Coefficiente de determinación (<math>r^2</math>)</b>	<b>Ecuación lineal</b>	<b>Valor de significación</b>
<b>MO a 10 cm</b>	-0.571	0.3256	MO = -5.6407x + 2.6456	0.08498
<b>MO a 20 cm</b>	-0.642	0.4127	MO = -7.026x + 3.0081	0.04518

**Figura 14.**

*Cianuro libre y materia orgánica de los suelos a 10 cm de profundidad*

**Figura 15.**

*Cianuro libre y materia orgánica de los suelos a 20 cm de profundidad*



#### 4.9 Relación del cianuro libre y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos

En la Tabla 23 y Figuras 16 y 17, se observa que el cianuro encontrado en los suelos a profundidades de 10 y 20 cm influye en la CIC de los suelos, dado que el valor de significación para cada caso es menor al 0.05. Además, el gráfico de la relación cianuro libre – CIC, muestra una pendiente descendente, por lo que las variables tienen una relación negativa, inversamente proporcional y moderada para cada caso ( $r = -0.771$  para 10 cm y  $r = -0.771$  para 20 cm), es decir, que un aumento de cianuro libre disminuye la CIC del suelo.

De acuerdo a lo indicado, la CIC depende principalmente de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica (McClellan, 2021), tal como se explicó anteriormente el cianuro libre disminuye la materia orgánica y por consiguiente también existe una disminución de la CIC.

Por otro lado, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para el caso de los 10 cm de profundidad es de 0.5944, el cual indica que el 59.44 % de la CIC del suelo está influenciado por el cianuro libre, de igual manera para el caso de los 20 cm, el cianuro libre afecta a la CIC en un 59.4 %.

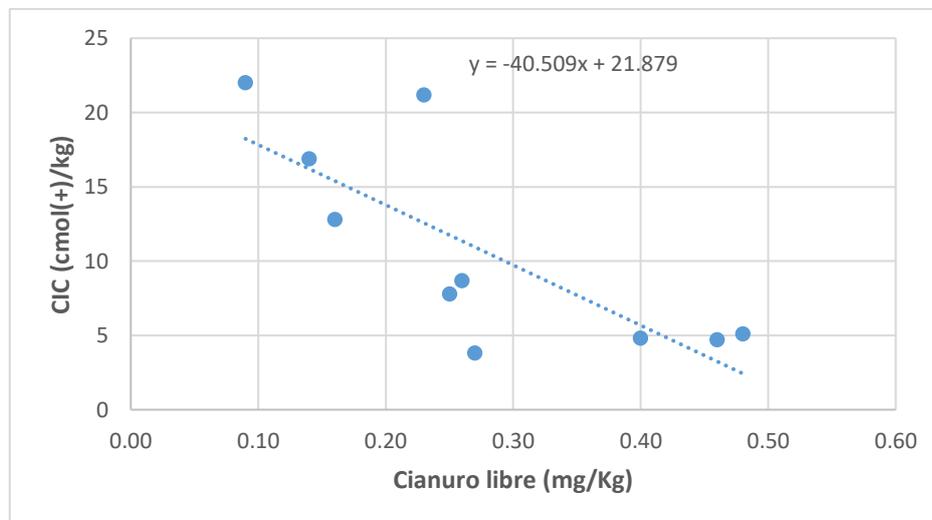
**Tabla 23.**

*Evaluación del contenido de cianuro libre y la capacidad de intercambio catiónico de los suelos*

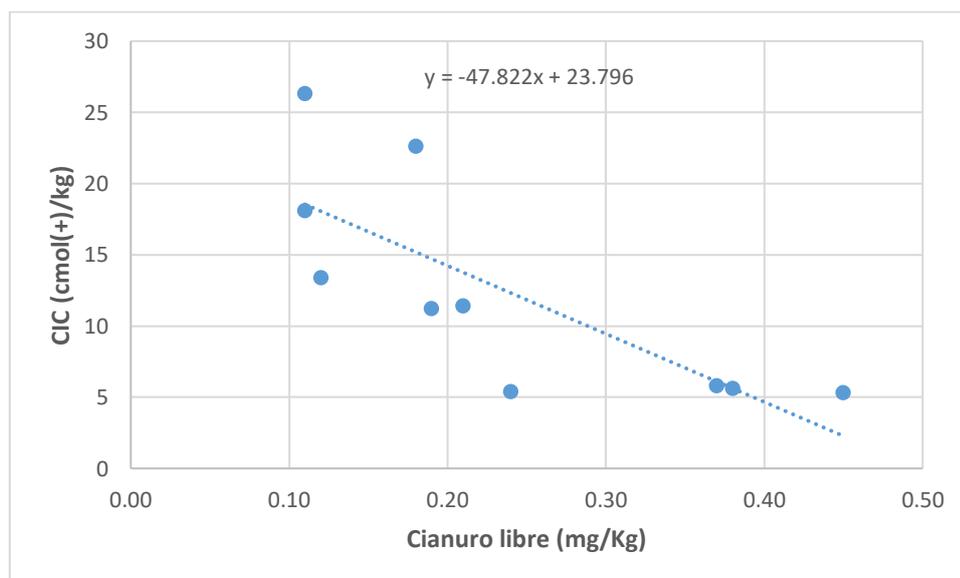
	Correlación de Pearson (r)	Coefficiente de determinación ( $r^2$ )	Ecuación lineal	Valor de significación
<b>CIC a 10 cm</b>	-0.771	0.5944	$CIC = -40.509x + 21.879$	0.009
<b>CIC a 20 cm</b>	-0.771	0.594	$CIC = -47.822x + 23.796$	0.009

**Figura 16.**

*Cianuro libre y capacidad de intercambio catiónico de los suelos a 10 cm de profundidad*

**Figura 17.**

*Cianuro libre y capacidad de intercambio catiónico de los suelos a 20 cm de profundidad*



#### 4.10 Diferencias entre el cianuro libre de los suelos influenciados por la unidad minera y valor del cianuro del nivel de fondo

En la Tabla 24, se observa la media del contenido de cianuro libre en los suelos influenciados por la unidad minera (0.272 mg/Kg) y los suelos en donde se realizó el muestreo de los niveles de fondo (0.10 mg/Kg), así como también la diferencia entre ellos (0.172 mg/Kg), este último indica que la unidad minera incrementa 2.7 veces más el cianuro libre en los suelos.

Por otro lado, la prueba de t-Student, indica que las diferencias entre las medias son significativas, dado que, el valor de significación (P-Valor = 0.003) es menor al 0.05. Por lo cual se concluye que existen diferencias significativas en cuanto al cianuro libre de los suelos influenciados por la unidad minera y los niveles de fondo, comprobando estadísticamente lo ya sustentado.

**Tabla 24.**

*Prueba de T- Studen para el contenido de cianuro libre en suelos influenciados por la unidad minera y en suelos de nivel de fondo*

	<b>Suelos con influencia de la U.M</b>	<b>Suelos sin influencia de la U.M</b>	<b>Diferencias de medias</b>
Media	0.272 (mg/Kg)	0.10 (mg/Kg)	0.172 (mg/Kg)
Desviación estándar	0.122	0.01	0.112
Grados de libertad		8	
Estadístico t		4.19	
Valor p		0.003	

#### 4.11 Diferencias entre el pH de los suelos influenciados por la unidad minera y el valor de pH de nivel de fondo

En la Tabla 25, se observa la media del pH en los suelos influenciados por la unidad minera (6.90) y los suelos en donde se realizó el muestreo de los niveles de fondo (5.95), así como también la diferencia entre ellos (0.95), este último indica que la unidad minera incrementa 1.16 veces más el pH de los suelos.

Por otro lado, la prueba de t-Student, indica que las diferencias entre las medias no son significativas, dado que, el valor de significación (P-Valor = 0.105) es mayor al 0.05. Por lo cual se concluye que no existen diferencias significativas en cuanto al pH de los suelos influenciados por la unidad minera, y los niveles de fondo, comprobando estadísticamente lo ya sustentado.

#### Tabla 25.

*Prueba de T- Student para el pH de los suelos influenciados por la unidad minera y el pH en suelos de nivel de fondo*

	Suelos con influencia de la U.M	Suelos sin influencia de la U.M	Diferencias de medias
Media	6.90	5.95	0.95
Desviación estándar	1.56	0.07	1.49
Grados de libertad		8	
Estadístico t		1.83	
Valor p		0.105	

#### 4.12 Diferencias entre el contenido de materia orgánica (MO) de los suelos influenciados por la unidad minera y la materia orgánica de nivel de fondo

En la Tabla 26, se observa la media del contenido de materia orgánica en los suelos influenciados por la unidad minera (1.078) y los suelos en donde se realizó el muestreo de los niveles de fondo (2.550), así como también la diferencia entre ellos (1.472), este

último indica que la unidad minera disminuye 2.37 veces la materia orgánica de los suelos.

Por otro lado, la prueba de t-Student, indica que las diferencias entre las medias son significativas, dado que, el valor de significación (P-Valor = 0.011) es menor al 0.05. Por lo cual se concluye que existen diferencias significativas en cuanto a la materia orgánica de los suelos influenciados por la unidad minera y los suelos niveles de fondo, comprobando estadísticamente lo ya sustentado.

**Tabla 26.**

*Prueba de T- Student para el contenido de materia orgánica de los suelos influenciados por la unidad minera y en suelos de nivel de fondo*

	<b>Suelos con influencia de la U.M</b>	<b>Suelos sin influencia de la U.M</b>	<b>Diferencias de medias</b>
Media	1.078	2.550	1.472
Desviación estándar	1.32	0.15	1.17
Grados de libertad		8	
Estadístico t		-3.29	
Valor p		0.011	

**4.13 Diferencias entre la CIC (Capacidad de intercambio catiónico) de los suelos influenciados por la unidad minera y el CIC de nivel de fondo**

En la Tabla 27, se observa la media del CIC en los suelos influenciados por la unidad minera (14.256 cmol(+)/kg) y los suelos en donde se realizó el muestreo de los niveles de fondo (24.150 cmol(+)/kg), así como también la diferencia entre ellos (13.89 cmol(+)/kg), este último indica que la unidad minera disminuye 1.69 veces la CIC de los suelos.

Por otro lado, la prueba de t-Student, indica que las diferencias entre las medias son significativas, dado que, el valor de significación (P-Valor = 0.000) es menor al 0.05. Por lo cual se concluye que existen diferencias significativas en cuanto a la CIC de los

suelos influenciados por la unidad minera y los niveles de fondo, comprobando estadísticamente lo ya sustentado.

**Tabla 27.**

*Prueba de T- Studen para la CIC de los suelos influenciados por la unidad minera y la CIC en suelos de nivel de fondo*

	<b>Suelos con influencia de la U.M</b>	<b>Suelos sin influencia de la U.M</b>	<b>Diferencias de medias</b>
Media	14.256	24.150	13.517
Desviación estándar	6.17	2.15	
Grados de libertad		8	
Estadístico t		-5.78	
Valor p		0.000	

#### **4.14 Análisis geoespacial del cianuro libre**

Se presenta en las Figuras 18 y 19 los mapas de isoconcentraciones, como resultado del análisis geoespacial realizado al área de la unidad minera San Vicente.

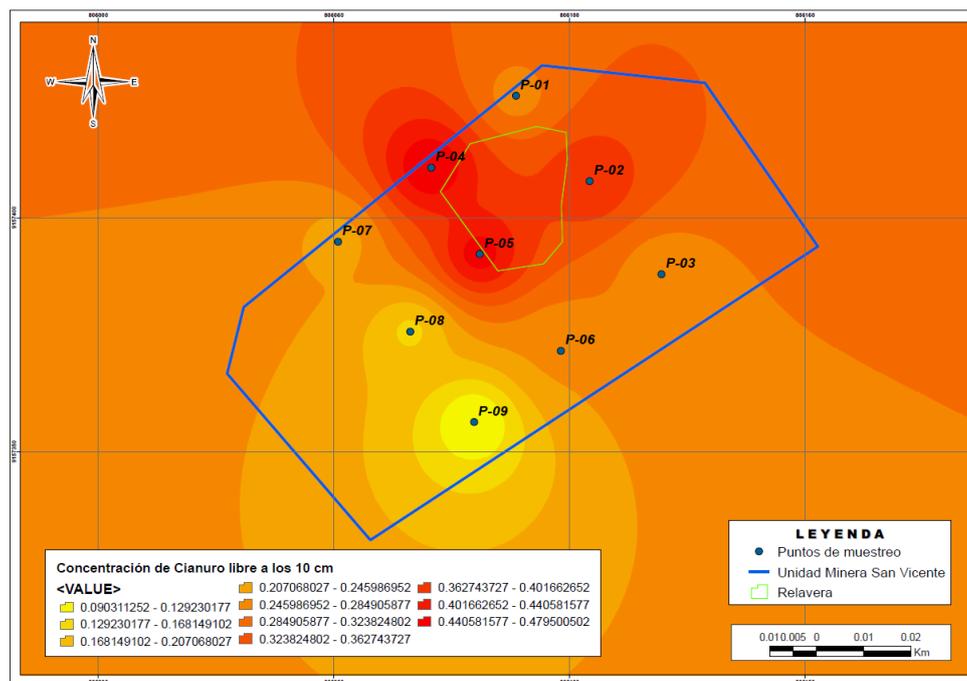
Del análisis geoespacial se observó que los puntos críticos de excesiva concentración de cianuro libre, son los que se encuentran cercanos a la ubicación de la relavera, además las concentraciones disminuyen hacia la parte baja del área de estudio, en dirección Suroeste.

Así mismo, las concentraciones mayores se encuentran a los 10 cm de profundidad en todos los puntos muestreados, y posteriormente disminuyen a los 20 cm de profundidad.

Los mapas de análisis geoespacial de la concentración del cianuro libre, muestran que las zonas aledañas a la relavera, corresponden a las zonas prioritarias para su remediación por su mayor contenido de cianuro libre.

**Figura 18.**

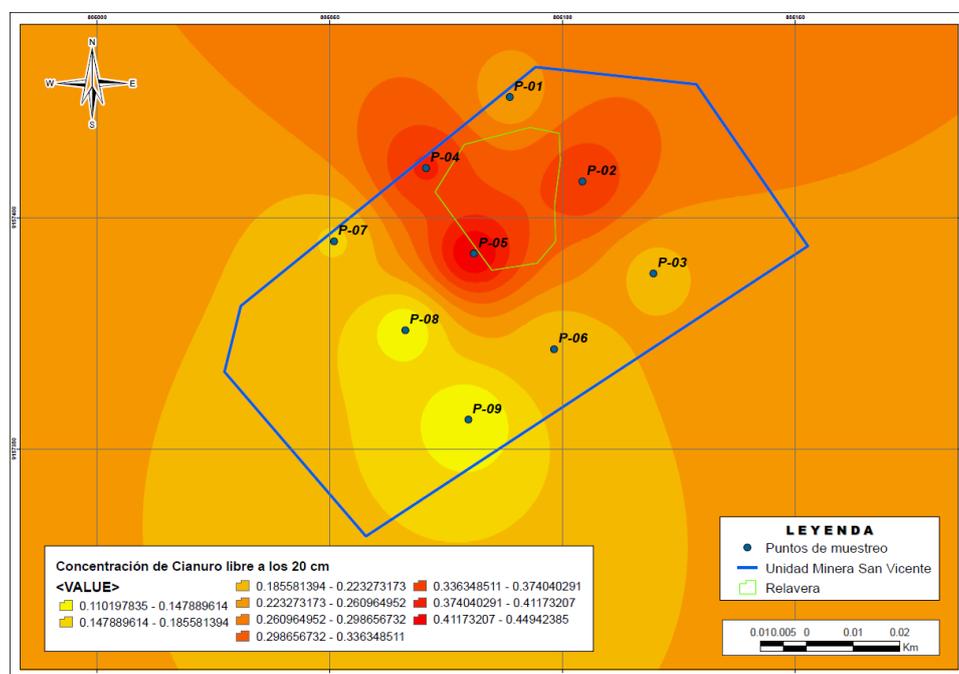
*Mapa de análisis geoespacial de cianuro libre a los 10 cm*



*Nota.* Datos obtenidos del análisis de laboratorio SGS del Perú S.A.C.

**Figura 19.**

*Mapa de análisis geoespacial de cianuro libre a los 20 cm*



*Nota.* Datos obtenidos del análisis de laboratorio SGS del Perú S.A.C.

#### 4.15 Determinación del impacto ambiental de acuerdo al índice de geoacumulación

En las Tablas 28 y 29, se presentan los resultados del cálculo del Igeo realizados en el área de estudio, de acuerdo con:

$$I_{geo} = \log_2[C_n / 1.5B_n]$$

Dónde:

- Cn: Contenido de cianuro libre en mg/Kg.
- Bn: Contenido de cianuro libre en mg/Kg del nivel de fondo.

**Tabla 28.**

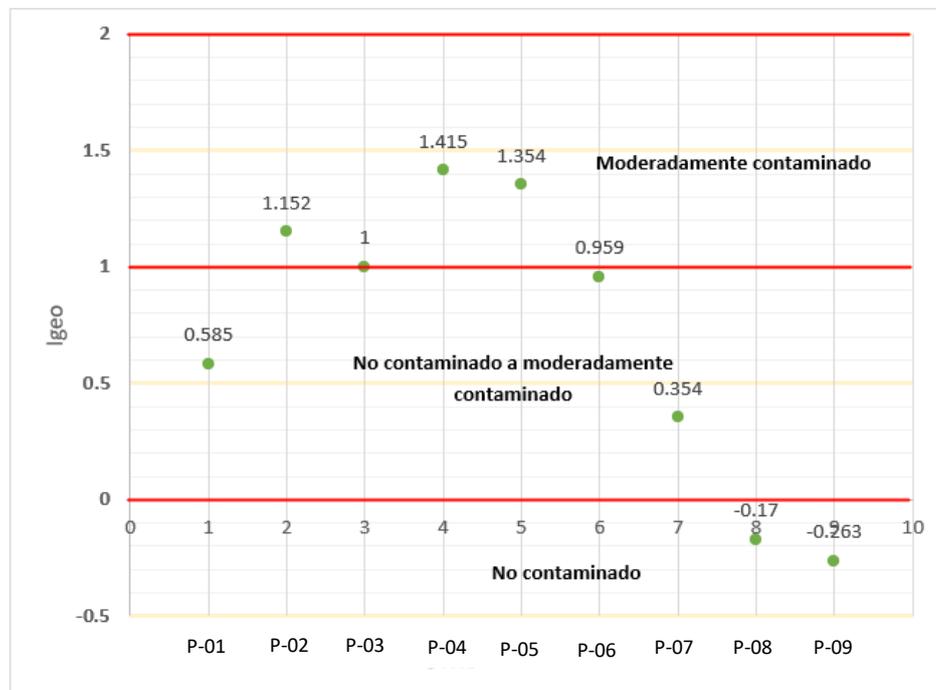
*Índice de geoacumulación a los 10 cm*

Parámetro cianuro libre	Igeo a los 10 cm	Descripción
P-01	0.585	No contaminado a moderadamente contaminado
P-02	1.152	Moderadamente contaminado
P-03	1.000	Moderadamente contaminado
P-04	1.415	Moderadamente contaminado
P-05	1.354	Moderadamente contaminado
P-06	0.959	No contaminado a moderadamente contaminado
P-07	0.354	No contaminado a moderadamente contaminado
P-08	-0.170	No contaminado
P-09	-0.263	No contaminado

En la Figura 20 se presenta el análisis gráfico del cálculo del Igeo a los 10 cm de profundidad.

**Figura 20.**

*Análisis gráfico del índice de geoacumulación a los 10 cm*

**Tabla 29.**

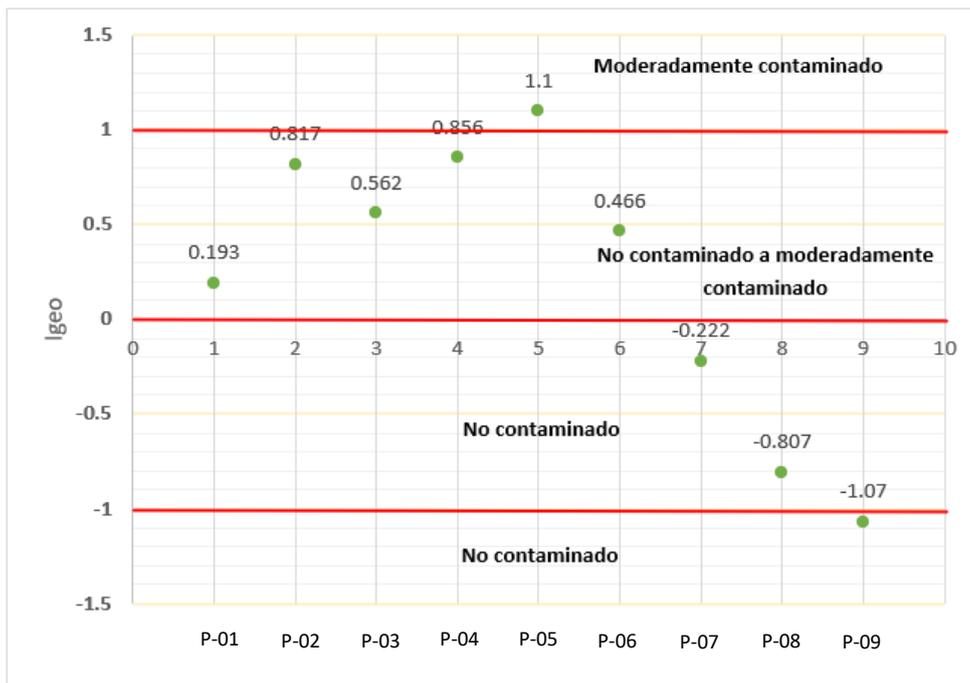
*Índice de geoacumulación a los 20 cm*

Parámetro cianuro libre	Igeo a los 20 cm	Descripción
P-01	0.193	No contaminado a moderadamente contaminado
P-02	0.817	No contaminado a moderadamente contaminado
P-03	0.562	No contaminado a moderadamente contaminado
P-04	0.856	No contaminado a moderadamente contaminado
P-05	1.100	Moderadamente contaminado
P-06	0.466	No contaminado a moderadamente contaminado
P-07	-0.222	No contaminado
P-08	-0.807	No contaminado
P-09	-1.070	No contaminado

En la Figura 21 se presenta el análisis gráfico del cálculo del Igeo a los 10 cm de profundidad.

### Figura 21.

*Análisis gráfico del índice de geoacumulación a los 20 cm*



Los resultados del análisis de geoacumulación a los 10 cm de profundidad muestran que, de los nueve puntos evaluados, los puntos cercanos a la relavera (P-02, P-03, P-04 y P-05) se califican como moderadamente contaminados; tres puntos (P-01, P-06 y P-07) se califican como no contaminados a moderadamente contaminados, y los puntos más alejados de la relavera (P-08, P-09) como no contaminados.

Los resultados del análisis de geoacumulación a los 20 cm de profundidad muestran que, la concentración disminuye en todos los puntos respecto a los 10 cm de profundidad, es así que solamente el punto P-05 (cercano a la relavera) se califica como moderadamente contaminado; cinco puntos (P-01, P-02, P-03, P-04 y P-06) se califican como no contaminados a moderadamente contaminados, y los puntos P-07, P-08 y P-09 como no contaminados.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

- Las concentraciones de cianuro libre influyen de manera negativa la calidad del suelo, los resultados indican que en la unidad minera la concentración media de cianuro es de 0.272 mg/Kg, la cual es 2.7 veces mayor que en el nivel de fondo que contiene 0.10 mg/Kg, además los parámetros fisicoquímicos evidenciaron que el pH en la unidad minera (6.90) presenta un aumento de 1.16 veces que los niveles de fondo (5.95), la materia orgánica en la unidad minera (1.078%) presenta una disminución en 2.37 veces que los niveles de fondo (2.55%) y la CIC en la unidad minera (14.256 cmol(+)/kg) presenta una disminución en 1.69 veces respecto a los niveles de fondo (24.150 cmol(+)/kg).
- Las concentraciones de cianuro libre encontradas en los suelos influenciados por la unidad minera (0.272 mg/Kg) no superan el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo; sin embargo, son más altas que los niveles de fondo (0.10 mg/Kg).
- Los valores de pH en los suelos influenciados por la unidad minera, fueron más altos a 10 cm de profundidad; sin embargo, el contenido de materia orgánica y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) fue mayor a 20 cm de profundidad.

- Los suelos que han sido influenciados por la unidad minera son más alcalinos que los suelos evaluados a nivel de fondo; sin embargo, los valores encontrados para materia orgánica y la CIC, son menores respecto a los niveles de fondo.
- De acuerdo al Índice de geoacumulación (Igeo) encontrado, se demuestra que existe un impacto ambiental negativo en la calidad del suelo, por la unidad minera, siendo el mayor Igeo presente a los 10 cm de profundidad en el Punto P-04, mientras que a los 20 cm el mayor Igeo se presenta en el Punto P-05.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda considerar la información proporcionada en la presente investigación, para la toma de decisiones respecto a la remediación de pasivos ambientales en Algamarca.
- Se recomienda desarrollar investigaciones futuras en Algamarca, considerando la biodegradación de cianuro libre utilizando microorganismos.
- Se recomienda la aplicación de medidas para inmovilizar el cianuro libre en el suelo, con la finalidad de evitar el transporte de este compuesto por agentes físicos como el agua.
- Si bien los ECA establecen los valores máximos permitidos de contaminantes presentes en el suelo, no deben ser determinantes para tomar acciones de control y remediación ambiental.

## Capítulo VI

### Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E. y Ortiz-Hernández, E. (2004). *El papel de óxidos de hierro en suelos*. Terra Latinoamericana, 22(4),485-497. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311096013>
- Álvarez-Cotrina, V y Aroca-Sagástegui, N. (2015). *Propuesta de diagnóstico ambiental preliminar para la asociación de mineros artesanales san Blas de Algamarca, Cajabamba, Cajamarca - 2015*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Trujillo.
- Álvarez García, R. (2005). *Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro*. [Tesis de posgrado, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional – Universidad de Oviedo.
- Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2016). *Resumen de Salud Pública Cianuro*. División de Toxicología y Medicina Ambiental natural [en línea], pp. 23. Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs8.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.pdf).
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitrón, G., Thangarasu-Sarasvathi, P. y Rosano-Ortega, G. (2021). *Biological treatment for the degradation of cyanide: A review*. Journal of Materials Research and Technology, vol. 12, pp. 1418-1433. ISSN 22387854. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.03.030.
- Bohn, H. (1993). *Química del suelo*. Editorial Limusa, S.A.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Van Groenigen, J.W. Y Brussaard, L. (2018). *Soil quality – A critical review*. Soil Biology and Biochemistry [en línea], vol. 120, no. September 2017, pp. 105-125. ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2018.01.030. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

Cahuana, E.J. (2016). *Manejo ambiental de efluentes del proceso de cianuración de oro en la planta de beneficiode la corporación minera ANANEA S.A. S.l.: s.n.*

Correa-Marín, H.E. y Neyra-Medina, P.A. (2019). *Cinética de oxidación del cianuro libre en agua por aplicación de ozono*. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos, ISSN 1098-6596.

Decreto Supremo N° 005-2022-MIDAGRI de 2022 [Presidencia de la República del Perú]. Aprueba el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor. Abril 24 de 2022. <https://dar.org.pe/wp-content/uploads/2022/04/2060758-1-1.pdf>

Decreto Supremo N° 013-2010-AG de 2010 [Presidencia de la República del Perú]. Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos. Noviembre 19 de 2010. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2010/ds13-2010-ag.pdf>

Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM de 2017 [con fuerza de ley]. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. 2 de diciembre de 2017.

Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of América, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

Dumanski, J. (1998). *Indicators of land quality and sustainable land management*. TheWorld Bank. Washington DC, USA.

García, F. (2018). *Propuesta Técnica, Procura, Construcción y Ampliación de Planta Adr A 36,000 Tmpd de la Empresa Minera Shahuindo S.A. S.l.: s.n.*

- Gaviria C, Ana C, y Meza S, Luis A. (2006). *Análisis de Alternativas para la Degradación del Cianuro en Efluentes Líquidos y Sólidos del Municipio de Segovia, Antioquia y en la Planta de Beneficio de la Empresa Mineros Nacionales, Municipio de Marmato, Caldas. Dyna*, 73(149), 31-44. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532006000200003&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200003&lng=en&tlng=es).
- Gobierno de Columbia Británica. (2017). *Analysis of Cyanide (Total, Weak Acid Dissociable, and Free) - PBM. Inorganics (DRAFT)* [en línea], vol. 2017. Disponible en: [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/emre/methods/bc\\_moe\\_cyanide\\_analysis\\_method\\_pbm\\_08mar2017\\_draft.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/emre/methods/bc_moe_cyanide_analysis_method_pbm_08mar2017_draft.pdf).
- Gordillo, M. (2018). *Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7134/1/083531-2018%20I-GA.pdf>
- Grufides. (11 de octubre de 2017). *OEFA presenta resultados de contaminación de las aguas del valle del Condebamba por minería informal y Minera Shahuindo SAC*. <https://grufides.org/content/oefa-presenta-resultados-de-contaminacion-de-las-aguas-del-valle-del-condebamba-por-miner>
- Gutiérrez, F. (2018). *Análisis del proceso de eliminación de sustancias tóxicas de efluentes contaminados con cianuro en plantas metalúrgicas de obtención del oro*. [en línea]. Universidad Nacional de San Agustín. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6079/IMgunifr.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- International Cyanide Management Institute. (2021). *The Cyanide Code*. cyanidecode.org [en línea]. Disponible en: <https://cyanidecode.org/languages/bienvenido-al-icmi/>.

- Jensen, J.L., Schjønning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T. y Munkholm, L.J. (2017). *Soil texture analysis revisited: Removal of organic matter matters more than ever*. PLoS ONE, vol. 12, no. 5, pp. 1-10. ISSN 19326203. DOI 10.1371/journal.pone.0178039.
- Kjeldsen, P. (1999). *Behaviour of Cyanides in soil and Groundwater: A Review*. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark [en línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/342486556/Kjeldsen-1999>
- López Bravo, M., Santos Luna, J., Quezada Abad, C., Segura Osorio, M. y Perez Rodriguez, J. (2016). *Actividad minera y su impacto en la salud humana / The mining and its impact on human health*. Ciencia Unemi, vol. 9, no. 17, pp. 92-100. ISSN 1390-4272. DOI 10.29076/issn.2528-7737vol9iss17.2016pp92-100p.
- MWH Perú S.A (MWH). (2015). *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Shahuindo SHAHUINDO SAC*. [en línea]. <https://eva.senace.gob.pe:8443/plan/senace/token?tk=EE3C2146-3DBB-3C85-E053-CE4B10AC6F4F>
- Maldonado, R.A. (2018). *Contaminación de Aguas Subterráneas por Efluentes Generados en el Campus Universitario de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez de la Ciudad de Juliaca en el año 2018*. pp. 1-20.
- Mayorca, S. (2018). *Reducción de Cianuro del Agua Industrial Contaminada Mediante Biopelícula Microbiana, Chala - Arequipa 2018*. S.l.: s.n.
- McClellan, T. (2021). *Soil Texture and Soil Structure*. Universidad de Hawai'i [en línea]. Disponible en: [https://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a\\_factor\\_ts.aspx](https://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_factor_ts.aspx).
- Ministerio del Ambiente, Perú. (2014). *Guía para Muestreo de Suelos*. [Archivo PDF]. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

- Ministerio de Energía y Minas, Perú. (1992). *Ley General de Minería*. [Archivo PDF]. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/TUO%20.pdf>
- Müller, G. (1969). *Schadstoffe in Sedimenten - Sedimente als Schadstoffe*. I Institut für Sedimentforschung der Universität Heidelberg Deutschland.
- Nava, F., Elorza, E., Uribe, A. Pérez, R. (2007). *Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos*. [en línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2247956>
- Neina, D. (2019). *The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation*. Applied and Environmental Soil Science, vol. 2019, no. 3. ISSN 16877675. DOI 10.1155/2019/5794869.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2018). *Evaluación ambiental temprana en el área de influencia de la Unidad Minera Shahuindo de Shahuindo S.A.C. en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca durante el 2017 y 2018*. Dirección de Evaluación Ambiental. <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/110>
- Ortiz, R. (2015). *Análisis químicos de minerales para la exploración, explotación y proceso de lixiviación de la compañía minera Ares S.A.C.* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de Ingeniería. Disponible en: [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_13834788d7f01f8090b0a0ca9bf9c59d/Details](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_13834788d7f01f8090b0a0ca9bf9c59d/Details).
- Pérez, J. e Higuera, O. (2008). *Comportamiento electroquímico del Cianuro*. [en línea]. Universidad del Norte - Colombia. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n24/n24a06.pdf>
- Resolución Directoral Regional N°209-2018-GR-CAJ-DREM de 2018 [Gobierno Regional de Cajamarca]. *Aprobar el Instrumento de Gestión Ambiental para la Formalización de Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal (IGAFOM) del Proyecto Minero Metálico a desarrollarse en la Concesión Minera Metálica "Acumulación Shahuindo", presentado por la Unidad Minera San Vicente*. 5 de noviembre de 2018.

- Ponce Bravo, D.L. (2018). *Influencia del Complejo Metalúrgico La Oroya en la Calidad del Suelo por Metales Pesados, Cianuro Libre y Cromo Hexavalente en la Zona de Huaynacancha, Distrito de La Oroya, Provincia de Yauli, Departamento de Junín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villareal]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Federico Villareal.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2018). *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala*. Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente [en línea], pp. 20. Disponible en: [https://ige.org/archivos/IGE/mercurio\\_en\\_la\\_Mineria\\_de\\_Au.pdf](https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf)
- Razanamahandry, L.C., Andrianisa, H.A., Karoui, H., Podgorski, J. y Yacouba, H. (2018). *Prediction model for cyanide soil pollution in artisanal gold mining area by using logistic regression*. *Catena* [en línea], vol. 162, no. November 2017, pp. 40-50. ISSN 03418162. DOI 10.1016/j.catena.2017.11.018. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.018>.
- Seoáñez Clavo, M. (1999). *Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- Usda-Aphis-Wildlife Services. (2019). *The Use Of Sodium Cyanide In Wildlife Damage Management*. S.l.:
- Zhang, Y.Y., Wu, W. y Liu, H. (2019). *Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions*. *PLoS ONE*, vol. 14, no. 6, pp. 1-13. ISSN 19326203. DOI 10.1371/journal.pone.0218563.

## **Capítulo VII**

### **Apéndice**

Apéndice A: Informe de ensayo acreditado por INACAL

Apéndice B: Registro fotográfico del trabajo de investigación

## Apéndice A: Informe de ensayo acreditado por INACAL



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



### INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL MA2002591 Rev. 0

**ERICK REYNALDO DÍAZ SILVA**

JR. CORDOVA #314-CELENDIN-CAJAMARCA

ENV / LB-346691-002

PROCEDENCIA : FISCAL

Fecha de Recepción SGS : 31-01-2020  
Fecha de Ejecución : Del 31-01-2020 al 14-02-2020  
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
P-01-E1
P-01-E2
P-02-E1
P-02-E2
P-03-E1
P-03-E2
P-04-E1
P-04-E2
P-05-E1
P-05-E2
P-06-E1
P-06-E2
P-07-E1
P-07-E2
P-08-E1
P-08-E2
P-09-E1
P-09-E2
P-10-E1
P-10-E2

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 14/02/2020

Jade C. Huarcaya Soto  
C.B.P. 8471  
Jefe de Oficina



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-01-E1	P-01-E2	P-02-E1
PROFUNDIDAD (m)					9157417N / 805089E 0.1	9157417N / 805089E 0.2	9157395N / 805101E 0.1
FECHA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
HORA DE MUESTREO					14:20:00	14:10:00	15:10:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cenuro Libre	ES_EPA8013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.27	0.24	0.40
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA8045	pH	--	--	8.23	8.15	8.90
Capacidad de Intercambio catiónico	ES_EPA8081	cmol(+) / kg	0.1	0.3	3.8 *	5.4 *	4.8 *
Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_T OC	%	0.1	0.3	0.1	0.2	0.3
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	20.07 *	18.11 *	18.39 *
Arilla (<0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	1.54 *	1.53 *	3.05 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	24.98 *	24.88 *	33.82 *
Arena Medía (0.50-0.25 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	18.18 *	18.83 *	12.14 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	11.95 *	13.58 *	10.17 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	18.87 *	16.10 *	13.73 *
Clase Textural	ES_NTP339_128	--	--	--	ARENOSO *	ARENOSO *	ARENA FRANCA *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	4.81 *	9.21 *	10.89 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	29.15 *	42.65 *	47.76 *

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-02-E2	P-03-E1	P-03-E2
PROFUNDIDAD (m)					9157395N / 805101E 0.2	9157374N / 805111E 0.1	9157374N / 805111E 0.2
FECHA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
HORA DE MUESTREO					14:49:00	15:30:00	15:15:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cenuro Libre	ES_EPA8013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.37	0.28	0.21
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA8045	pH	--	--	8.82	8.18	5.89
Capacidad de Intercambio catiónico	ES_EPA8081	cmol(+) / kg	0.1	0.3	5.8 *	8.7 *	11.4 *
Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_T OC	%	0.1	0.3	0.4	0.3	0.7
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	17.58 *	17.52 *	21.50 *
Arilla (<0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	3.07 *	3.08 *	0.00 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	26.40 *	25.27 *	20.82 *
Arena Medía (0.50-0.25 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	13.84 *	13.91 *	15.16 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP339_128	%	--	--	12.97 *	13.42 *	13.01 *



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-02-E2	P-03-E1	P-03-E2
PROFUNDIDAD (m)					0.2	0.1	0.2
FECHA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
HORA DE MUESTREO					14:40:00	15:30:00	15:15:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	15.41 *	14.56 *	22.03 *
Clase Textural	ES_NTP330_128	--	--	--	ARENA FRANCA *	ARENA FRANCA *	ARENOSO *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	10.73 *	12.24 *	7.88 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	41.74 *	47.43 *	59.21 *

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-04-E1	P-04-E2	P-05-E1
PROFUNDIDAD (m)					0.1	0.2	0.1
FECHA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
HORA DE MUESTREO					16:40:00	16:35:00	17:10:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cianuro Libre	ES_EPA6013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.48	0.38	0.48
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA8045	pH	--	--	9.22	8.77	9.18
Capacidad de Intercambio catiónico	ES_EPA8081	cmol(+)/kg	0.1	0.3	5.1 *	5.6 *	4.7 *
Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_T OC	%	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	19.37 *	20.96 *	20.97 *
Arcilla (<0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	3.06 *	4.60 *	3.07 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	24.31 *	28.27 *	25.55 *
Arena Medía (0.50-0.25 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	14.45 *	16.83 *	12.32 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	13.82 *	9.02 *	9.83 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	15.99 *	14.17 *	23.86 *
Clase Textural	ES_NTP330_128	--	--	--	ARENOSO *	ARENOSO *	ARENOSO *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	9.19 *	8.13 *	4.81 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP330_128	%	--	--	33.61 *	37.29 *	45.21 *



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-05-E2	P-05-E1	P-05-E2
PROFUNDIDAD (m)					0157385N / 805081E	0157384N / 805001E	0157384N / 805001E
FECHA DE MUESTREO					0.2	0.1	0.2
HORA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
MATERIAZ					17:00:00	15:50:00	15:40:00
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cenuro Libre	ES_EPA6013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.45	0.25	0.19
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA0045	pH	-	-	9.09	8.19	5.75
Capacidad de intercambio catiónico	ES_EPA0061	cmol(+)/kg	0.1	0.3	5.3 *	7.8 *	11.2 *
Materia orgánica	ES_NOM21_A507_MO_1 OC	%	0.1	0.3	0.2	0.3	1.0
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	23.40 *	20.20 *	19.87 *
Arilla (<0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	1.54 *	1.53 *	0.00 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	24.85 *	23.76 *	24.07 *
Arena Media (0.50-0.25 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	14.37 *	19.34 *	21.25 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	8.90 *	14.11 *	11.71 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	20.82 *	13.39 *	15.18 *
Clase Textural	ES_NTP330_128	-	-	-	ARENOSO *	ARENOSO *	ARENOSO *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	6.14 *	7.67 *	7.91 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	43.57 *	29.24 *	36.32 *

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-07-E1	P-07-E2	P-08-E1
PROFUNDIDAD (m)					0157400N / 805044E	0157400N / 805044E	0157378N / 805056E
FECHA DE MUESTREO					0.1	0.2	0.1
HORA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
MATERIAZ					16:50:00	16:40:00	16:30:00
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cenuro Libre	ES_EPA6013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.23	0.18	0.18
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA0045	pH	-	-	6.11	5.62	5.68
Capacidad de intercambio catiónico	ES_EPA0061	cmol(+)/kg	0.1	0.3	21.2 *	22.8 *	12.8 *
Materia orgánica	ES_NOM21_A507_MO_1 OC	%	0.1	0.3	4.1	4.3	1.4
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	16.96 *	16.21 *	22.05 *
Arilla (<0.002 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	0.00 *	1.53 *	6.13 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP330_128	%	-	-	28.08 *	25.88 *	15.07 *



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-07-E1	P-07-E2	P-08-E1
PROFUNDIDAD (m)					9157400N / 805044E	9157400N / 805044E	9157378N / 805056E
FECHA DE MUESTREO					0.1	0.2	0.1
HORA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
MATRIZ					18:50:00	18:40:00	18:30:00
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Medía (0.50-0.25 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	36.59 *	35.00 *	10.44 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	9.51 *	9.89 *	9.48 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	4.26 *	3.81 *	23.04 *
Clase Textural	ES_NTP339_128	---	-	-	ARENOSO *	ARENOSO *	ARENA FRANCA *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	4.80 *	7.87 *	13.79 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	9.61 *	14.44 *	41.51 *

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-08-E2	P-09-E1	P-09-E2
PROFUNDIDAD (m)					9157378N / 805056E	9157355N / 805067E	9157355N / 805067E
FECHA DE MUESTREO					0.2	0.1	0.2
HORA DE MUESTREO					30/01/2020	30/01/2020	30/01/2020
MATRIZ					18:20:00	18:10:00	18:00:00
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>							
Cenizas Libres	ES_EPA8013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.12	0.14	0.11
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA8045	pH	-	-	5.52	5.65	5.58
Capacidad de Intercambio catiónico	ES_EPA8081	cmol(+) / kg	0.1	0.3	13.4 *	16.9 *	18.1 *
Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_1 OC	%	0.1	0.3	1.8	1.7	1.9
<b>Granulometría y Textura</b>							
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	20.99 *	15.30 *	19.34 *
Arcilla (<0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	6.14 *	10.76 *	6.13 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	15.85 *	15.53 *	17.25 *
Arena Medía (0.50-0.25 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	10.89 *	10.49 *	12.00 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	9.43 *	14.31 *	11.70 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	21.55 *	12.10 *	18.24 *
Clase Textural	ES_NTP339_128	---	-	-	ARENA FRANCA *	FRANCO ARENOSO *	ARENA FRANCA *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	15.35 *	21.52 *	15.34 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP339_128	%	-	-	30.23 *	8.10 *	12.75 *



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P-10-E1	P-10-E2
PROFUNDIDAD (m)					0156050N / 805963E 0.1	0156160N / 805963E 0.20
FECHA DE MUESTREO					31/01/2020	31/01/2020
HORA DE MUESTREO					09:20:00	09:10:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado
<b>Análisis Generales</b>						
Cenizas Libres	ES_EPA8013_APHACNF	mg/kg	0.2	0.5	0.09	0.11
Potencial de Hidrógeno	ES_EPA8045	pH	—	—	5.88	6.02
Capacidad de Intercambio catiónico	ES_EPA8081	cmol(+)/kg	0.1	0.3	22.0 *	28.3 *
Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_1 OC	%	0.1	0.3	2.4	2.7
<b>Granulometría y Textura</b>						
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	17.14 *	18.29 *
Arcilla (<0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	9.21 *	10.78 *
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	13.78 *	11.02 *
Arena Media (0.50-0.25 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	9.54 *	9.15 *
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	6.17 *	6.34 *
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	15.00 *	14.17 *
Clase Textural	ES_NTP339_128	—	—	—	FRANCO ARENOSO *	FRANCO ARENOSO *
Limo (0.05-0.002 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	29.18 *	32.27 *
Materia (<2.00 mm)	ES_NTP339_128	%	—	—	20.04 *	19.69 *

**Notas:**

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

(\*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL - DA, para la matriz en mención.

Para el análisis de Granulometría, los resultados corresponden a los retenidos en cada malla para las arenas. Los resultados de limo y arcilla corresponden a las partículas menores a 0.05mm. El porcentaje de material 2mm. Se realiza en muestra independiente. No está incluido este porcentaje en la sumatoria del resto de mallas.

Los resultados de las muestras expresados en mg/Kg se calculan sobre base seca.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0**

**CONTROL DE CALIDAD**

LC: Límite de cuantificación  
MB: Blanco del proceso.  
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.  
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.  
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.  
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Capacidad de intercambio catiónico	cmol(+)/kg	0.3		3 - 6%			
Arena Gruesa (1.00-0.50 mm)	%	--		0%			
Ardilla (<0.002 mm)	%	--		0%			
Arena Fina (0.25-0.10 mm)	%	--		0%			
Arena Media (0.50-0.25 mm)	%	--		0%			
Arena muy Fina (0.10-0.05 mm)	%	--		0%			
Arena muy Gruesa (2.00-1.00 mm)	%	--		0%			
Limo (0.05-0.002 mm)	%	--		0%			
Materia (<2.00 mm)	%	--		0%			
Potencial de Hidrógeno	pH	--		0%	100 - 101%		
Materia orgánica	%	0.3	<0.3	1%	98%		
Cenizas Libres	mg/kg	0.5	<0.5		110%	92 - 118%	0%



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA2002591 Rev. 0**

**REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO**

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
ES_EPAS013_APHACNF	Callao	Cianuro Libre	EPA Method 9013A Rev.02, 2014, Cyanide extraction procedure for solids and oils //SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-CN <sup>-</sup> F, 23rd Ed, 2017 Cyanide. Cyanide-Selective Electrode Method. Validado 2017.
ES_EPAS045	Callao	Potencial de Hidrógeno	EPA 9045D; Rev 4; 2004. Soil and waste PH.
ES_EPAS081	Callao	Capacidad de Intercambio catiónico	EPA 9081; Rev 0.; 1986. Cation-Exchange Capacity of Solids (Sodium Acetate).
ES_NOM21_A807_MO_TO C	Callao	Materia orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000; Item 7.1.7 A8-07. Determinación de Materia Orgánica (A8-07 Walkley y Black). (Validado) 2017
ES_NTP339_128	Callao	Granulometría y Textura	NTP 339.128, 1ra Ed: 1999, SUELOS. Metodo de Ensayo para el Analisis Granulometrico (Validado)

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.com.pe/es/terminos-y-condiciones.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

## Apéndice B: Registro fotográfico del trabajo de investigación

**Figura 22.**

*Unidad minera San Vicente*



**Figura 23.**

*Medición de las Rejillas Regulares*



**Figura 24.**

*Ubicación y codificación de puntos de muestreo*



**Figura 25.**

*Hoyos para muestreo (40 cm x 40 cm x 40 cm)*



**Figura 26.**

*Limpieza y lavado de instrumentos previo a realizar la colecta de muestras*



**Figura 27.**

*Recolección de 1 kg de muestra a los 10 cm y 20 cm de profundidad*



**Figura 28.**

*Llenado de frascos de muestreo para la identificación de cianuro libre*



**Figura 29.**

*Rotulado de muestras*



**Figura 30.**

*Muestras rotuladas, para determinación de cianuro libre y de parámetros fisicoquímicos*

**Figura 31.**

*Área de muestreo de los niveles de fondo*



**Figura 32.**

*Hoyos de muestreo de los niveles de fondo*



**Figura 33.**

*Extracción de muestras de los 10 y 20 cm de profundidad*



**Figura 34.**

*Pesado de 1 kg de muestras de suelos a 10 y 20 cm de profundidad, para ser llevado al cuarteo*



**Figura 35.**

*Combinación de muestras para elaborar la muestra compuesta*



**Figura 36.**

*Mezclado de muestra compuesta*



**Figura 37.**

*Cuarqueo para selección de 1 kg de muestra compuesta*



**Figura 38.**

*Llenado adecuado de las Cadenas de custodia*

**CADENA DE CUSTODIA DE SUELOS, SEDIMENTOS Y LODO** Nº 022865

**DATOS DEL CLIENTE**  
 Cliente: ERCA RESERVA D'AGUA SUIVA  
 Dirección: ERCA RESERVA D'AGUA SUIVA  
 Teléfono: 01832283  
 Proyecto: OBRAS DE MEJORA DEL SERVICIO DE AGUA  
 Lugar: ERCA RESERVA D'AGUA SUIVA  
 Correo: ERCA.RESERVA@peru.sgs.com

**FACTURAS AL:**  
 Cliente: ERCA RESERVA D'AGUA SUIVA  
 Dirección: 7º LINDERO DE LA CERRAJERA  
 Teléfono: ERCA RESERVA D'AGUA SUIVA  
 Correo: ERCA.RESERVA@peru.sgs.com

Nº	Examen de Laboratorio	Descripción de la Muestra	Fecha	Hora	Ubicación	Estado	Recepción	Transporte	Almacenamiento	Análisis	Reporte
13	P-07-E2	0-1	01/07/14	12:55	X	10/07/14	12:55pm	3	X	X	X
14	P-07-E2	0-2	01/07/14	13:55	X	10/07/14	13:55pm	3	X	X	X
15	P-08-E1	0-1	01/07/14	13:41	X	10/07/14	13:41pm	3	X	X	X
16	P-08-E2	0-2	01/07/14	13:41	X	10/07/14	13:41pm	3	X	X	X
17	P-09-E1	0-1	01/07/14	13:53	X	10/07/14	13:53pm	2	X	X	X
18	P-09-E2	0-2	01/07/14	13:53	X	10/07/14	13:53pm	3	X	X	X
19	P-10-E1	0-1	01/07/14	13:42	X	10/07/14	13:42pm	3	X	X	X
20	P-10-E2	0-20	01/07/14	13:42	X	10/07/14	13:42pm	3	X	X	X

**Figura 39.**

*Preservación y traslado de muestras a laboratorio SGS del Perú S.A.C*

