

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**

**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**TESIS**

**EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO MEDIANTE EL  
PROCESO DE COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN, DE LAS AGUAS  
RESIDUALES DE LA MINA ARTESANAL LLACUABAMBA,  
DISTRITO DE PARCOY, PROVINCIA DE PATAZ-LA LIBERTAD**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
GARAY CASALLO, Yherson Arudio**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL  
HUANCAYO-PERÚ**

**2018**

## **DEDICATORIA**

A Dios, mi madre Luz y amigos por apoyarme incondicionalmente para poder llegar hasta este punto y lograr mis objetivos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos por haberme apoyado en todo momento. A los docentes de la universidad y facultad de ING. Ambiental. Al Ing. Luis Palomino, A Ing. Osorio, Al Ing. Manuel Muñoz Huaynalaya y al Ing Luis Balbin por la enseñanza y asesoramiento que me brindaron en estos 5 años y en la identificación de del proceso adecuado para el tratamiento,

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	ix
INDICE DE CUADROS .....	ix
ÍNDICE DE GRAFICOS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xv
CAPITULO I.....	17
1. Planteamiento de problema. ....	17
1.1. Caracterización del problema.....	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.2.1 Problema general.....	18
1.2.2 Problemas específicos .....	18
1.3. Objetivos. ....	18
1.3.1 Objetivo general. ....	18
1.3.2 Objetivos específicos. ....	19
1.4. Hipótesis. ....	19
1.4.1 Hipótesis general.....	19
1.4.2 Hipótesis específicas.....	19
1.5. Justificación e Importancia de la investigación.....	20
1.5.1 Justificación.....	20
1.5.2 Importancia. ....	20
1.6. Limitaciones de la Investigación.....	20



2.4.3.8. Medición de parámetros de campo y registro de información	34
2.4.3.9. Toma de muestras de agua, preservación y etiquetado.....	34
2.4.4. Coagulación/floculación .....	35
2.4.5. Coagulación / precipitación .....	35
2.4.5.1. Mecanismo de la Coagulación.....	38
2.4.6. Floculación .....	42
2.4.6.1. Cinética de la Floculación.....	43
2.4.6.2. Factores que influyen en la Floculación.....	43
2.4.6.3. Flokulyanty Praestol (Praestol).....	44
2.4.7. Cloruro férrico .....	46
Capítulo III.....	49
3.Fundamentos metodológicos .....	49
3.1. Metodología. ....	49
3.4.3. Método. ....	49
3.4.4. Tipo de Investigación .....	51
3.4.5. Nivel de Investigación .....	51
3.2. Diseño de la Investigación .....	51
3.3. Hipótesis de la investigación .....	53
3.3.1. Hipótesis general.....	54
3.3.2. Hipótesis específicas.....	54
3.4. Variables. ....	55
3.4.1. Variable Independiente. ....	55
3.4.2. Variable Dependiente.....	55
3.5. Cobertura de estudio.....	55
3.5.1. Universo .....	55

3.5.2. Población .....	56
3.5.3. Muestra .....	56
3.6. Técnicas e Instrumentos .....	57
3.7.3. Técnicas de la Investigación .....	57
3.7.4. Instrumentos .....	58
3.6.2.1. Recajo de muestras:.....	58
3.6.2.2. Análisis de muestra en laboratorio .....	58
3.7. Procesamiento estadístico de la información .....	58
3.7.1. Medidas.....	58
3.7.2. Representaciones .....	58
Capítulo IV .....	59
4. Organización, Presentación y Análisis de resultado .....	59
4.1. Resultado .....	59
4.1.1. Caracterización fisicoquímica del agua residual de mina artesanal LLacuabamba .....	59
4.1.2. Concentración de arsénico del agua residual de mina después del proceso de coagulación y floculación.....	60
4.1.3. Porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico .....	61
4.1.4. Determinación de tiempos de floculación.....	61
4.2. Discusiones de resultados .....	62
4.2.1. Probabilidad de % de eficiencia de remoción.....	62
Cumplen con el modelo .....	62
4.2.2. Intervalos de confianza simultáneos de la diferencia - 95% de Fisher .....	62
4.2.3. Intervalos de confianza para la media de 95% según él % de eficiencia de remoción.....	63

4.2.4. Comparación múltiple de Fisher para la determinación del mejor tratamiento que garantice la mejor eficiencia de remoción de arsénico.....	64
4.2.5. Influencia de la concentración de coagulante .....	66
4.2.6. Influencia del pH.....	67
4.2.7. Influencia del tipo de floculante .....	68
4.3. Contrastación de la Hipótesis.....	68
4.3.1. Contrastación hipótesis general. ....	70
4.3.2. Contrastación hipótesis específicas. ....	71
CONCLUSIONES .....	74
RECOMENDACIONES .....	75
BIBLIOGRAFIA .....	76
ANEXOS .....	77

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

### **PTAR**

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

### **EPA**

Agencia de Protección Ambiental

### **ANA**

Autoridad Nacional del Agua

### **ARD**

Agua Residual Doméstica

### **AR**

Agua Residual

### **OMS**

Organización Mundial de Salud.

### **DQO**

Demanda Química de Oxígeno

### **Floc**

Floculación

### **pH**

Potencial de Hidrógeno

### **NaOH**

Hidróxido de Sodio

### **As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Trióxido de arsénico

### **FeCl<sub>3</sub>**

Cloruro Férrico

### **Fe**

Hierro

### **Na**

Sodio

### **As**

Arsénico

## INDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1	Cuadro de doble entrada para las determinaciones de la eficiencia de remoción de arsénico	52
Cuadro N° 2	Cuadro de doble entrada para las determinaciones de los tiempos de floculación	53
Cuadro N° 3	cuadro de ANOVA	54
Cuadro N° 4	Cronograma de muestreo	57
Cuadro N° 5	Cuadro de parámetros de campo y concentración de arsénico del agua residual de la mina artesanal Llacuabamba	60
Cuadro N° 6	Cuadro de doble entrada para las determinaciones de arsénico después del proceso de coagulación y floculación	60
Cuadro N° 7	Cuadro de doble entrada para las determinaciones del porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico	61
Cuadro N° 8	Cuadro de doble entrada para las determinaciones de los tiempos de floculación	61
Cuadro N° 9	Cuadro de agrupación de la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para la eficiencia de remoción de arsénico	64
Cuadro N° 10	Cuadro de agrupación de la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para el tiempo de sedimentación	65
Cuadro N° 11	Cuadro de Análisis de Varianza para la eficiencia de remoción de arsénico	69
Cuadro N° 12	Cuadro de Análisis de Varianza para el tiempo de sedimentación	69

## ÍNDICE DE GRAFICOS

Grafico N° 1	Probabilidad de% de eficiencia de remoción	62
Grafico N° 2	Diferencias de las medias para % de eficiencia de remoción	62
Grafico N° 3	Intervalos de confianza de 95 % para la media del % de eficiencia de remoción	63
Grafico N° 4	Influencia de la concentración de coagulante en la remoción de arsénico	66
Grafico N° 5	Influencia del pH en la remoción de arsénico	67
Grafico N° 6	Influencia de la concentración de floculante en la remoción de arsénico	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1	Neutralización de cargas iónicas	38
FIGURA N° 2	Fuerzas de Atracción y Repulsión	39
FIGURA N° 3	Re estabilización de Partículas	39
FIGURA N° 4	Atrapamiento de las partículas en un floc	41
FIGURA N° 5	Efecto de Puente de las partículas en suspensión	42

## ANEXOS

ANEXO I	Limites maximos permisibles según el D.S. 010 – 2010 MINAM	77
ANEXO II	Medición de velocidad del agua	77
ANEXO III	Medición de profundidad y ancho por donde pasa el flujo de agua	78

ANEXO IV	Toma de muestra	78
ANEXO V	Toma de repetición de muestra	79
ANEXO VI	Medición de parámetros de campo	79
ANEXO VII	Segunda medición de parámetros de campo	80
ANEXO VIII	Reporte de METALES TOTALES en Monitoreo de Aguas	81

## RESUMEN

El arsénico y sus compuestos son considerados como cancerígenos para los humanos y en ciertas regiones existe evidencia epidemiológica de alteraciones a la salud ante el consumo prolongado de aguas arsenicales, por lo que resulta necesario estudiar mecanismos de remoción. El presente trabajo consiste en la remoción del arsénico que se encuentra en las aguas residuales de la mina de LLACUABAMBA donde se realizó ensayos de laboratorio con base en procesos de coagulación-floculación donde determinó la influencia del pH, concentración del Cloruro férrico y coagulante. En los ensayos realizados se varió la dosis de los coagulantes desde 5 a 15 mg/L, a diferentes niveles de pH de 4 y 7.5 y el tipo de floculante (Praestol 851 y floculante de sábila) al 1 %. Con estas variables se han realizado 16 combinaciones. Se obtuvieron porcentajes de eficiencia de remediación de arsénico que variaron desde 39.5% hasta 87.9 %. Los resultados obtenidos permitieron lograr remociones de 87.9 % al incorporar 15 mg/L de cloruro férrico a un pH de 7.5 y con el floculante Praestol 851 al 1%. Para la dosis de cloruro férrico de 5 mg/L la eficiencia de la remoción disminuyó considerablemente en el caso de dosis de cloruro férrico de 15 mg/L la eficiencia de remoción aumenta. Las mayores remociones se lograron a pH de 7.5. A partir de los resultados obtenidos y su análisis estadísticos realizados, se pudo determinar que los parámetros que controlan la eficiencia de remoción son la dosis de floculante, el pH del agua residual y la dosis de coagulante adicionado. Los resultados obtenidos son relevantes para la remoción de As en plantas de tratamiento de agua residual de mina.

Palabras claves: Remoción, Coagulación/Floculación, Arsénico.

## **ABSTRACT**

Arsenic and its compounds are considered carcinogenic to humans and in certain regions there is epidemiological evidence of alterations to health due to prolonged consumption of arsenical waters, so it is necessary to study mechanisms of removal. The present work consists in the removal of the arsenic found in the wastewater of the LLACUABAMBA mine, where laboratory tests were carried out based on coagulation-flocculation processes where the influence of pH, concentration of ferric chloride and coagulant was determined. In the tests carried out, the dose of the coagulants was varied from 5 to 15 mg / L, at different pH levels of 4 and 7.5 and the type of flocculant (Praestol 851 and aloe flocculant) at 1%. With these variables, 16 combinations have been made. Percentages of arsenic remediation efficiency were obtained that varied from 39.5% to 87.9%. The results obtained allowed achieving removals of 87.9% by incorporating 15 mg / L of ferric chloride at a pH of 7.5 and with the flocculant Praestol 851 at 1%. For the ferric chloride dose of 5 mg / L the efficiency of the removal decreased considerably in the case of ferric chloride dose of 15 mg / L the removal efficiency increases. The largest removals were achieved at a pH of 7.5. From the results obtained and their statistical analysis, it was possible to determine that the parameters that control the removal efficiency are the flocculant dose, the residual water pH and the added coagulant dose. The results obtained are relevant to the recovery of as in mine wastewater treatment plants.

Keywords: Removal, Coagulation / Flocculation, Arsenic.

## INTRODUCCIÓN

Las actividades minero-metalúrgicas y el agua están íntimamente ligadas, y como en toda actividad humana se producen alteraciones permitiéndonos conocer las fuentes potenciales de generación de las aguas residuales en la industria minero-metalúrgica, los estándares de calidad que deben cumplir los efluentes para su vertimiento al ambiente, la terminología usada en su control y las técnicas disponibles para dar solución a los problemas que podrían presentar las aguas residuales de las empresas minero-metalúrgicas.

La preocupación por el contenido de As en las aguas residuales de mina se debe a que este elemento es extremadamente tóxico para el organismo humano. La exposición a concentraciones altas causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, por otro lado, la exposición durante un largo período a bajas concentraciones relativas de As tiene efectos negativos crónicos para la salud.

En el agua de bebida el As se encuentra formando arseniatos y es absorbido con facilidad en el tracto gastrointestinal en proporción de 40 a 100% (National Academy Press, 1999). El As inorgánico ingerido es absorbido por los tejidos y luego se elimina progresivamente por metilación. Los cambios metabólicos del As ocurren esencialmente en el hígado donde los tioles endógenos juegan un papel importante en la reducción del As (V) a As (III) (Rossman P. G, 2003). Los tioles son compuestos que contienen el grupo funcional formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrógeno (-SH), siendo el azufre análogo de un grupo alcohol (-OH). Tradicionalmente los tioles son denominados tratando de relacionar estas problemáticas, se realizó la investigación que tiene como objetivo Determinar la eficiencia de remoción de arsénico del método de coagulación/floculación de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA en el 2018. El trabajo se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se describe la caracterización de la realidad problemática, la formulación del problema y sus objetivos, la justificación e importancia de la presente investigación así como las limitaciones encontradas en todo el desarrollo del trabajo, , el capítulo 2 introduce los fundamentos teóricos, los antecedentes, marco legal, conceptual y teórico, en el capítulo 3 incluyen la

metodología de trabajo donde se detalla las fases metodológicas, el tipo y diseño de la investigación, las variables, cobertura del estudio, las técnicas e instrumentos y el procesamiento estadístico de la información, finalmente resultados, discusión de resultados se presentan en el capítulo 4.

## **CAPITULO I**

### **1. Planteamiento de problema.**

#### **1.1 Caracterización del problema.**

La presencia del arsénico en el ambiente y en las fuentes de agua para consumo y riego es debido a factores naturales de origen geológico (México, Argentina, Chile, Perú, Nicaragua), actividades antropogénicas que involucran la explotación minera y refinación de metales por fundición (Chile, Bolivia y Perú), procesos electrolíticos. En el agua puede encontrarse en su forma trivalente y pentavalente.

Si es que este metal no es controlado puede generar daños a la salud humana.

En la cuenca alta y media del PARCOY existen yacimientos de oro; sin embargo, conjuntamente con el beneficio del oro, se liberan otros metales pesados y el arsénico presentes en las descargas de las aguas residuales al río PARCOY, afluente de la laguna PIAS, impactándola negativamente a la flora y fauna acuática. Existe pequeña minería informal que utiliza el mercurio para la separación del metal precioso. Encontramos a lo largo del río PARCOY desmonte de las minas y canchas de relave antiguos,

potenciales generadores de aguas ácidas por la presencia de minerales piritosos con contenidos de arsénico. Por último, en toda la cuenca el río PARCOY recibe las descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, así como de residuos sólidos y desmontes.

En el centro poblado LLACUABAMBA existe la minería artesanal. Las aguas residuales generadas por este proceso no cuentan con tratamiento afectando en primera instancia al río LLACUABAMBA.

## **1.2 Formulación del problema.**

### **1.2.1 Problema general.**

- ¿Cuál será la influencia de La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH en la de eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Qué concentración de arsénico tendrán las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA?
- ¿Cuál será la influencia de las distintas concentraciones de cloruro férrico en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA?
- ¿Cuál será la influencia de los distintos niveles de pH en la eficiencia remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA?
- ¿Cuál será La influencia de tipo de floculantes en el tiempo de sedimentación de lodos y eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA?

## **1.3 Objetivos.**

### **1.3.1 Objetivo general.**

- Determinar la influencia de La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH en la de eficiencia en la remoción de

arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Caracterizar las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- Determinar la influencia de la concentración de cloruro férrico en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- Determinar la influencia del pH en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- Determinar La influencia del tipo floculantes en el tiempo de sedimentación de lodos y eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

## **1.4 Hipótesis.**

### **1.4.1 Hipótesis general.**

- La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH influye significativamente en la eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

### **1.4.2 Hipótesis específicas.**

- La concentración de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA sobrepasan los límites máximos permisibles según el D.S N°010-2010-MINAM Anexo 1.
- Las concentraciones de cloruro férrico influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- Los distintos niveles de pH influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

- La utilización de floculantes influye significativamente en el tiempo de sedimentación de lodos y eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

## **1.5 Justificación e Importancia de la investigación**

### **1.5.1 Justificación.**

La contaminación del agua por el arsénico es un tema de preocupación internacional, de la cual la Organización Mundial de la Salud, viene promoviendo investigaciones de sus efectos en la salud pública de la población, dado que se ha identificado los subsecuentes efectos en cáncer a la piel, pulmón, vejiga, riñón, vesícula, y cuello uterino.

Con la investigación pretendemos aplicar un método de tratamiento de aguas residuales para remover el arsénico que se emplea en los procesos mineros.

### **1.5.2 Importancia.**

El tratamiento de aguas residuales es importante para volver a utilizar el agua, evitar su contaminación y la del ambiente (especialmente por sus efectos en la producción agropecuaria) y por salud pública.

Esta investigación es importante porque las mineras reutilizan el recurso en sus procesos y tratan los efluentes generados, debido al potencial de contaminación del agua y su consecuente efecto en la salud humana y el medio ambiente.

Por lo tanto este proyecto es muy importante porque se puede aprovechar al máximo este recurso ya que existe una demanda alta de aguas residuales en esta mina.

## **1.6 Limitaciones de la Investigación.**

No se encuentra información referente al tema de investigación en el lugar de estudio.

## **CAPITULO II**

### **2. Fundamentos Teóricos de la Investigación**

#### **2.1. Marco Referencial.**

##### **2.1.1. Antecedentes de la investigación.**

Francisca y C., (2014), realizaron la investigación: " REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA MEDIANTE PROCESOS DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN " en La Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. EL objetivo de la investigación fue determinar la influencia del estado de oxidación del arsénico, Influencia de la concentración de arsénico inicial, Influencia conjunta de la dosis de coagulante y la concentración de sólidos, en el proceso de coagulación y floculación. Para los ensayos de coagulación-floculación se utilizaron dos floculantes convencionalmente el sulfato de aluminio y el cloruro férrico. En estos experimentos se han variado las dosis de los coagulantes desde 5 a 500 mg/L, la de coloides desde 0 a 6000 mg/L y la concentración inicial de arsénico desde 0 a 5 mg/L. Los sedimentos

ensayados incluyen bentonita, zeolita y dos arcillas diferentes que fueron identificadas como suelos residuales, las cuales se designaron como arcilla roja y arcilla gris. Se observó que en todos los casos, cuando el arsénico se encuentra sin oxidar se tiene como resultado que la concentración final es igual a la inicial por lo que no se ha podido remover el mismo. Estos resultados demuestran que para todos los sedimentos ensayados la coagulación-floculación no es efectiva para el As (III). En el caso oxidado o de As (V) las remociones variaron entre el 30 y el 60 %. Los resultados de remoción mediante coagulación floculación en suspensiones con 0.5 y 2.0 mg/L de As, 50 mg/L de sulfato de aluminio y concentraciones de bentonita desde 0 hasta 4000 mg/L. Además los porcentajes de remoción son mayores a menores concentraciones iniciales de arsénico en la solución. Se lograron remociones del 80 y 95 % con sulfato de aluminio y cloruro férrico para concentraciones iniciales de 0.5 mg/L de As.

Restrepo (2009), Realizó la investigación "Evaluación del proceso de Coagulación – Floculación de una planta de tratamiento de agua potable". Teniendo como objetivo determinar qué tipos de coagulantes son más eficaces para el agua utilizada y establecer criterios adecuados para la aplicación de polímeros ayudantes de floculación. Primero se realizó la selección del coagulante y se estableció la dosis óptima de coagulante a emplear, se consideró una corrección del pH, los tipos de coagulantes que se emplearon durante el ensayo fueron Sulfato de Aluminio Líquido, Ultrión, Polisulfato de Aluminio Líquido, Policloruro de Aluminio líquido y Hidróxicloruro de Aluminio. Para Para el tipo de agua que utilizan para la producción de Malta y Cerveza se obtuvieron altas remociones de turbiedad aplicando Sulfato de Aluminio líquido Tipo B y PASS como coagulante; desde el punto de vista técnico el último presenta mayores ventajas, aunque su costo es mayor. De acuerdo con lo observado en otras plantas de potabilización, el Sulfato de

Aluminio líquido Tipo B es una muy buena opción siempre y cuando el agua tenga una alcalinidad apropiada. Lo que no es necesario con el PASS ya que no se requiere de alto contenido de alcalinidad pues este no afecta la reacción que ocurre. El proceso de Coagulación-Floculación presenta un muy buen desempeño con el coagulante utilizado actualmente, aunque se requiere de una evaluación económica para estudiar el posible cambio a otro tipo de coagulante.

## **2.2. Marco Legal**

### **2.2.1. Ley**

- Constitución Política del Perú de 1993.
- Ley General del Ambiente (Ley N° 28611).
- Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales (Ley N° 26821).
- Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) y su reglamento.

### **2.2.2. Resolución.**

- DS-010-2010-MINAM-LMP para descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero metalúrgicas.
- DS-015-2015-MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.
- D.S.-202 – 2010 – ANA “Clasificación de cuerpos de agua superficial y marino costero” (C, 2014).

### **2.2.3. Protocolos**

- D.S.-010-2016-ANA Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.

## **2.3. Marco Conceptual.**

### **2.3.1. Conceptos clave**

**Gestión de recursos hídricos:** Para la Autoridad Nacional del Agua [ANA], (2010, p.1). En la gestión de los recursos hídricos, la calidad del agua es uno de los aspectos más importantes que se tiene en cuenta para los diferentes usos establecidos en el territorio nacional.

Se busca conservar y proteger la calidad de las aguas continentales y marinas de los efectos de las fuentes contaminantes y del cambio climático, con la finalidad de establecer un equilibrio del ecosistema acuático, considerándose a éste como indicador de la calidad óptima del recurso, beneficiándose al ambiente y a la salud pública.

**Alcantarillado:** Sistema de transporte (tuberías, canales, etc.) utilizado para evacuar las aguas residuales desde su fuente de origen (lluvias, viviendas, industria, etc.) hasta la planta de tratamiento o hasta una corriente receptora. Los alcantarillados se dividen en tres categorías.

**Aguas Residuales:** Aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren un tratamiento previo. (D.S. N° 001-2010-AG).

**Aguas Residuales Industriales:** originadas como consecuencia del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.

**Afluente** Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento.

**Efluente:** Corriente que drena un área dada, por ejemplo, en una ciudad se produce efluentes domésticos, industriales y comerciales.

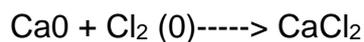
**Vertimiento:** Es la disposición controlada o no de un residuo líquido doméstico, industrial, urbano agropecuario, minero, etc. Los colectores son tubos colocados a lado y lado de las quebradas, evitando que los antiguos botaderos de alcantarillado continúen arrojando los vertimientos a los cauces. A su vez, los interceptores recogen de los colectores al estar ubicados a lado y lado del río. Estos interceptores se encargan del transporte final de los vertimientos a las plantas de tratamientos donde una vez acondicionada el agua residual, se incorpora al río.

**Impacto Ambiental:** Conjunto de posibles efectos sobre el medio ambiente de una modificación del entorno natural, como consecuencia de obras u otras actividades.

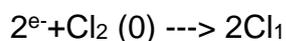
**Soluciones Coloidales:** Las soluciones coloidales se caracterizan por estar constituidas por una dispersión de partículas sólidas o líquidas en agua y que son difíciles de eliminar utilizando procedimientos como pueden ser gravedad, filtración y otros.

**Coloides:** Las especies coloidales halladas en aguas superficiales y residuales incluyen arcillas, sílice, hierro, metales pesados, color o sólidos orgánicos como por ejemplo residuos de animales muertos.

**Oxidantes:** Es la especie química que un proceso redox acepta electrones y, por tanto, se reduce en dicho proceso. Por ejemplo, cuando se hacen reaccionar cloro elemental con calcio:



El cloro es el agente oxidante puesto que, gana electrones y su carga o número de oxidación pasa de 0 a 1. Esto se puede escribir como:



**Absorbentes:** Un agente absorbente es una sustancia que tiene la capacidad de adsorber toxinas u otras sustancias; el agente retiene átomos, iones o moléculas en la superficie de un material. Esto se contrapone a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

Desestabilización: Perturbación, ruptura del equilibrio o estabilidad.

**Capacidad de Disociación** :es un proceso general en el cual complejos, moléculas y/o sales se separan en moléculas más pequeñas, iones o radicales, usualmente de manera reversible. Disociación es lo opuesto de la asociación, síntesis química o a la recombinación.

**Arseniato:** Un arseniato (compuesto) es cualquier compuesto que contiene el ion arseniato. También es cualquiera de las sales del ácido arsénico.

Los arseniatos son muy similares en su comportamiento químico a los fosfatos. En el agua se disuelven solamente los arseniatos de los metales alcalinos y del amonio; son sustancias cristalinas incoloras.

## **2.4. Marco Teórico**

### **2.4.1. El arsénico**

Es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre. El arsénico ha sido clasificado químicamente como un metaloide, con propiedades tanto de metal como de elemento no metálico; sin embargo, se le refiere frecuentemente como un metal. El arsénico elemental (llamado también arsénico metálico) es un material sólido de color gris acero. Sin embargo, en el ambiente el arsénico generalmente se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo oxígeno, cloro y azufre. El arsénico combinado con estos elementos se conoce como arsénico inorgánico. El arsénico combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico orgánico. Que no se evaporan. No tienen olor y la mayoría no tiene ningún sabor especial. Por esta razón, generalmente no se puede saber si están presentes en los alimentos, el agua o el aire (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017).

#### **2.4.1.1. Arsénico en el medio ambiente**

El arsénico ocurre naturalmente en el suelo y en minerales y por lo tanto puede entrar al aire, al agua y al suelo en polvo que levanta el viento. También puede entrar al agua en agua de escorrentía o en agua que se filtra a través del suelo. Las erupciones volcánicas constituyen otra fuente de arsénico (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). El arsénico está asociado con minerales que se minan para extraer metales, como por ejemplo cobre y plomo, y puede entrar al ambiente cuando se extraen o funden estos minerales (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). También se pueden liberar a

la atmósfera cantidades pequeñas de arsénico desde plantas de carbón y desde incineradores porque a menudo el carbón y los productos de desecho contienen arsénico (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017).

El arsénico puede cambiar de forma al reaccionar con oxígeno o con otras moléculas presentes en el aire, el agua o el suelo, o por la acción de bacterias que viven en el suelo o el sedimento (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). El arsénico que liberan plantas de energía y otros procesos de combustión generalmente está adherido a partículas muy pequeñas. El arsénico contenido en polvo que levanta el viento se encuentra generalmente en partículas más grandes (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). Estas partículas se depositan en el suelo o son removidas del aire por la lluvia. El arsénico que está adherido a partículas muy pequeñas puede permanecer en el aire varios días y puede moverse largas distancias (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). Muchos compuestos comunes de arsénico pueden disolverse en agua. Por lo tanto, el arsénico puede pasar a lagos, ríos o al agua subterránea disolviéndose en el agua de lluvia o la nieve o en desagües industriales (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). Cierta cantidad de arsénico se adherirá a partículas en el agua o a sedimento del fondo de lagos o ríos, mientras que otra porción será arrastrada por el agua (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017). Al final, la mayor parte del arsénico termina en el suelo o en el sedimento. Aunque algunos peces y mariscos incorporan arsénico que puede acumularse en los tejidos, la mayor parte de este arsénico se encuentra en una forma orgánica llamada arsenobetaina (llamada comúnmente arsénico de pez) que es mucho menos peligrosa (Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2017).

#### 2.4.1.2. Estados del arsénico en el agua

El arsénico puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica, siendo esta última la forma en que se haya en las aguas naturales.

A su vez presenta cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo los más comunes sus estados trivalentes As (III) (arsenitos) y pentavalente As (V) (arsenatos) (Bournod, 2010).

En aguas superficiales, con condiciones aeróbicas, es más frecuente encontrar el arsénico en estado pentavalente As (V), mientras que en aguas profundas o de pozo, en condición de anaerobiosis es más común encontrarlo en estado trivalente As (III) (Bournod, 2010).

En pH de 4 a 10 el As (V) se encuentra cargado negativamente, lo que explica su mayor eficiencia en los sistemas de remoción, comparándolo con el As (III) que, a esos valores de pH, no posee carga (Bournod, 2010).

Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambian el equilibrio al estado trivalente (Bournod, 2010).

La ionización de arsénico está expresada por la constante de disociación, pKa, cuyos valores para el arsenato y arsenito son:

Arsenato:  $\text{H}_3\text{AsO}_4$      $\text{pK}_1 = 2.2$      $\text{pK}_2 = 6.94$      $\text{pK}_3 = 11.5$

Arsenito:  $\text{H}_3\text{AsO}_3$      $\text{pK}_1 = 9.2$      $\text{pK}_2 = 14.22^*$      $\text{pK}_3 = 19.22$

La capacidad de disociación del arsenato es más alta que la del arsenito, ya que sus constantes de disociación son menores. Esto hace que el arsenato se combine más fácilmente con otros compuestos y su remoción sea más eficiente, si se lo compara con el arsenito. Esto justifica la oxidación, en caso de tener el arsénico en su estado trivalente, previo al tratamiento del agua. En el gráfico 1 se observan los cambios de estado de ionización de As (V) y As (III) frente a diferentes pH (Bournod, 2010).

### **2.4.1.3. Fuentes de exposición**

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico (Organización Mundial de la Salud, 2016).

La exposición a altos niveles de arsénico inorgánico puede deberse a diversas causas, como el consumo de agua contaminada o su uso para la preparación de comidas, para el riego de cultivos alimentarios y para procesos industriales, así como al consumo de tabaco y de alimentos contaminados (Organización Mundial de la Salud, 2016).

La exposición prolongada al arsénico inorgánico, principalmente a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con esta y cultivos alimentarios regados con agua rica en arsénico puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel (Organización Mundial de la Salud, 2016).

### **2.4.1.4. Efectos en la salud**

El arsénico existe tanto en forma orgánica como inorgánica. Los compuestos de arsénico inorgánico (como los que se encuentran en el agua) son extremadamente tóxicos, en tanto que los compuestos de arsénico orgánico (como los que se encuentran en pescados y mariscos) son menos perjudiciales para la salud (Organización Mundial de la Salud, 2016).

#### **➤ Efectos agudos**

Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte (Organización Mundial de la Salud, 2016).

#### **➤ Efectos a largo plazo**

Los primeros síntomas de la exposición prolongada a altos niveles de arsénico inorgánico (por ejemplo, a través del consumo de

agua y alimentos contaminados) se observan generalmente en la piel e incluyen cambios de pigmentación, lesiones cutáneas y durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies (hiperqueratosis). Estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Además de cáncer de piel, la exposición prolongada al arsénico también puede causar cáncer de vejiga y de pulmón. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado el arsénico y los compuestos de arsénico como cancerígenos para los seres humanos; el arsénico presente en el agua de bebida también ha sido incluido en esa categoría por el CIIC (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Entre los demás efectos perjudiciales para la salud que se pueden asociar a la ingesta prolongada de arsénico destacan los que siguen: problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades pulmonares y cardiovasculares. En particular, los infartos de miocardio inducidos por el arsénico pueden suponer una importante causa de aumento de la mortalidad. En China (Provincia de Taiwán), la exposición al arsénico se ha vinculado a la «enfermedad del pie negro», una afección grave de los vasos sanguíneos que causa gangrena. Sin embargo, esta enfermedad no se ha observado en otras partes del mundo; es posible que la malnutrición contribuya a su desarrollo (Organización Mundial de la Salud, 2016).

El arsénico también se asocia a desenlaces adversos del embarazo y mortalidad infantil, repercute en la salud de los niños<sup>1</sup>, y hay algunas pruebas de que puede tener una influencia negativa en el desarrollo cognitivo (Organización Mundial de la Salud, 2016).

#### **2.4.2. Actividad minera en el distrito de Parcoy**

El arsénico presentes en las descargas de las aguas residuales al río Parcoy, afluente de la laguna Pias, impactándola negativamente a la flora y fauna acuática. Existe pequeña minería informal que utiliza el mercurio para la separación del metal precioso. Encontramos a lo largo del río Parcoy desmonte de las minas y canchas de relave antiguos, potenciales generadores de aguas ácidas por la presencia de minerales piritosos con contenidos de arsénico. Por último, en toda la cuenca el río Parcoy recibe las descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, así como de residuos sólidos y desmontes (MINISTERIO DE SALUD , 2007).

#### **2.4.3. Toma de muestras de agua residual**

La ubicación de los puntos de monitoreo será determinada por el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento de aguas residuales tratadas, considerando los siguientes criterios:

- Ubicar puntos de monitoreo: aguas arriba y aguas abajo (tomar de referencia la descarga del efluente líquido tratado). (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- Los puntos de monitoreo en aguas marinas se determinaran al norte y al sur del punto de vertimiento, considerar el método de evaluación para efluentes marinos (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- La capacidad de dilución del cuerpo de agua (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- Cálculo de dilución que cada actividad debe desarrollar. (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- Considerar lo establecido en Vigilancia de la calidad del agua (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

##### **2.4.3.1. Fiscalización de la calidad del agua**

La autorización de vertimiento de agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, se otorga previa opinión técnica favorable de las autoridades en materia ambiental y en

materia de salud sobre el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental de agua (ECA-agua) y límites máximo permisibles (LMP) de los sectores (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.2. Frecuencia del monitoreo**

Se establece para medir los cambios que ocurren en determinados periodos de tiempo, para hacer el seguimiento periódico a las variaciones de los parámetros fisicoquímicos, orgánicos, microbiológicos ligados a la variación del caudal del cuerpo de agua (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.3. Medición de caudal y condiciones hidrodinámicas en aguas**

Es importante determinar el caudal y condiciones hidrodinámicas de los cuerpos de agua, porque permite contar con información que ayude a determinar la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua y los cambios que se presentan en las características de la calidad del agua (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.4. Medición de caudal en aguas continentales**

Método del Correntómetro. La velocidad del agua se mide con un instrumento llamado correntómetro que mide la velocidad en un punto dado de la masa de agua. Existen varios tipos de correntómetros, siendo los más empleados los de hélice.  $Q = V \times A$  (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.5. Muestreo**

Se debe recoger una muestra representativa de agua, con un volumen apropiado, para analizar los parámetros establecidos en el monitoreo (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

El muestreo se realizará de manera directa en muestras puntuales, que represente la composición del cuerpo de agua original en un lugar, tiempo y circunstancia en la que fue recolectada la muestra (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.6. Precauciones durante el monitoreo**

Consideraciones para prevenir daños personales y de materiales durante el monitoreo de agua (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

- Si el acceso al cuerpo de agua es muy profundo o torrencioso, evitar el ingreso. Recoger las muestras con ayuda de un brazo telescópico o con un recipiente sujetado con soguilla, guardando las medidas de seguridad (uso de arnés, chalecos flotadores, etc.). (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- Usar guantes, lentes y ropa de trabajo para realizar la preservación de las muestras debido a que los preservantes son soluciones peligrosas (ácidos y álcalis), es recomendable usar goteros para evitar derrames y salpicaduras (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- Tener cuidado con el uso de equipos de campo (multiparámetro), en cuerpos de agua caudalosos y geográficamente inseguros, se recomienda hacer la medición de la muestra de agua en un recipiente limpio (Autoridad Nacional del Agua, 2011).
- En caso de presentarse lluvias permanentes se recomienda paralizar el monitoreo por seguridad del personal y protección de los equipos (Autoridad Nacional del Agua, 2011).

#### **2.4.3.7. Acondicionamiento**

- Preparar los frascos de muestreo, según la lista de parámetros a evaluar.
- Colectar las muestras de agua y preservarlas de acuerdo al tipo de parámetro, siguiendo las instrucciones generales de preservación, etiquetado, embalaje y transporte de muestras.
- Rotular los frascos, usando plumón de tinta indeleble y cubrir la etiqueta con cinta adhesiva transparente.
- Colocar las muestras de agua preservadas y rotuladas, en un cooler con refrigerante (ice pack), para asegurar su llegada al laboratorio en condiciones de conservación.

- En el caso de frascos de vidrio, utilizar bolsas de poliburbujas, para evitar roturas en el transporte

#### **2.4.3.8. Medición de parámetros de campo y registro de información**

Para obtener confiabilidad de los resultados, se requiere:

- Equipos calibrados (multiparámetro, GPS, etc.), que deben verificarse antes de iniciar el trabajo de campo.
- Antes de realizar la medición, enjuagar los electrodos con la muestra de agua, estando el equipo apagado, agitar ligeramente el sensor antes de medir, registrar la lectura cuando se estabilice la lectura.
- Terminada la medición, lavar los electrodos con agua destilada, secar y guardar adecuadamente. El electrodo de pH conservarlo en solución salina.
- Las mediciones se realizarán directamente en el cuerpo de agua siempre y cuando las condiciones lo permitan, de lo contrario tomar una muestra en un recipiente apropiado (balde transparente limpio), priorizar la medición de O.D.
- Realizar la medición de caudal.

#### **2.4.3.9. Toma de muestras de agua, preservación y etiquetado**

- Se recomienda que los frascos de muestreo no contengan preservantes químicos.
- En cada punto, colocarse los guantes descartables, antes de iniciar la toma de muestras de agua.
- Tener cuidado al manipular los reactivos químicos ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $NaOH$ , Acetato de cinc, lugol ácido, etc), por ser nocivos a la salud.
- Dejar un espacio de aprox. 1% de la capacidad del envase, para permitir la expansión, adición del preservante y homogenización de la muestra.
- En el caso de muestras para análisis de  $DBO_5$ , llenar el frasco totalmente evitando burbujas de aire.

- Evitar coger la muestra de agua, cogiendo el frasco por la boca.
- En ríos y quebradas, evitar áreas de turbulencia excesiva, considerando las profundidades y el acceso con pendiente pronunciada.
- Realizar la toma de muestras, en dirección opuesta al flujo del río o quebrada.

#### **2.4.4. Coagulación/floculación**

La coagulación consiste en el agregado de productos químicos al agua para desestabilizar los coloides en suspensión, reduciendo las fuerzas que tienden a mantener separadas las partículas en suspensión (Ramírez, 2012).

Energía de interacción total = Energía de Atracción (-) + Energía de Repulsión (+).

Esta ruptura de cargas se hace mediante una agitación violenta, con altas velocidades de mezclado y los coagulantes más utilizados son:

- Sulfato de aluminio:  $Al_2(SO_4)_3$
- El cloruro férrico:  $FeCl_3$
- Cloruro de polialuminio (PAC):  $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}.H_2O$ ; donde  $0 < m < 3n$ .

#### **2.4.5. Coagulación / precipitación**

Es el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales que pueden formar los "flocs" capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento (Ramírez, 2012) .

Cuando los iones que se encuentran en solución pasan a la forma insoluble por medio de una reacción química se produce una precipitación química. La co-precipitación ocurre cuando un contaminante inorgánico forma un complejo insoluble con el coagulante. Es fundamental en este tipo de reacción el pH y la valencia de los elementos presentes ya que influyen en la eficiencia de remoción del sistema (Ramírez, 2012).

Los mecanismos involucrados son: formación de compuestos insolubles, incorporación de especies solubles en el floc metálico y enlace electrostático del arsénico soluble en la superficie externa de los hidróxidos metálicos insolubles (Ramírez, 2012).

La coagulación convierte el arsénico soluble en un producto insoluble permitiendo su separación por sedimentación y/o filtración. Esta ha sido la tecnología más utilizada históricamente en el mundo. Los coagulantes más comunes son las sales metálicas. (Ramírez, 2012). Entre ellas podemos mencionar:

- Sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio. Por ejemplo el sulfato de aluminio muestra en general mayor eficiencia para remover arsénico que el sulfato férrico (Ramírez, 2012).
- Sales de hierro, cloruro férrico, sulfato férrico, hidróxido férrico (Ramírez, 2012).
- Cal o cal hidratada. Opera en un rango de pH mayor a 10.5 y en algunos casos requiere un tratamiento secundario para lograr una mejor calidad de agua. Este proceso se conoce como ablandamiento con cal y depende fuertemente del valor de pH (Ramírez, 2012).

Los factores que afectan la eficiencia del proceso son:

- Tipo y dosis de coagulante
- Tiempo de mezcla
- pH (se reduce la eficiencia a valores muy bajos o muy altos)
- Estado de oxidación y concentración del arsénico y relación de concentración entre  $As_{3+}$  y  $As_{5+}$  (Ramírez, 2012).
- Temperatura
- Presencia de otros solutos inorgánicos (tales como sulfatos, fosfatos, carbonatos y calcio) (Ramírez, 2012).

En general se conoce como sedimentación o coagulación "mejorada" cuando se realiza control de pH y/o dosis de coagulante.

Esta tecnología requiere un operador calificado para el control de las variables que afectan el proceso. En algunos casos la coexistencia de hierro y arsénico en aguas de pozo mejora la eficiencia del tratamiento (Ramírez, 2012).

La sedimentación es la separación gravimétrica de los sólidos que se van depositando dentro del líquido y es complementaria del proceso de coagulación/precipitación (Ramírez, 2012).

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (SEDAPAL, 2000).

En la siguiente figura 3 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (SEDAPAL, 2000).

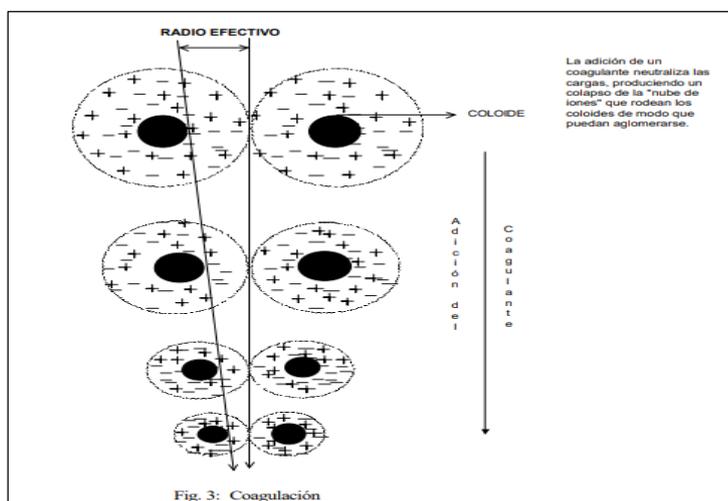
La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos (SEDAPAL, 2000).

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada (SEDAPAL, 2000).

En esta figura se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las

partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (SEDAPAL, 2000).

### FIGURA N° 1: Neutralización de cargas iónicas



Fuente: Tratamiento de agua SEDAPAL

#### 2.4.5.1. Mecanismo de la Coagulación

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

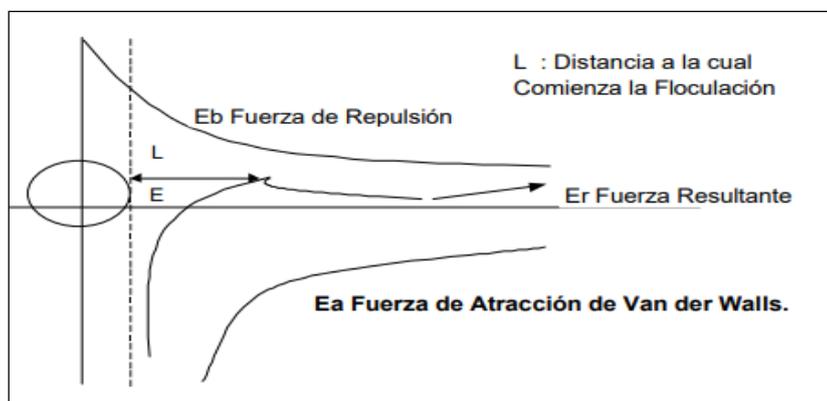
- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente

##### 2.4.5.1.1. Compresión de la Doble Capa

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. (Ver Fig. 2).

Existe por otro lado un potencial de atracción o fuerzas de atracción entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos.

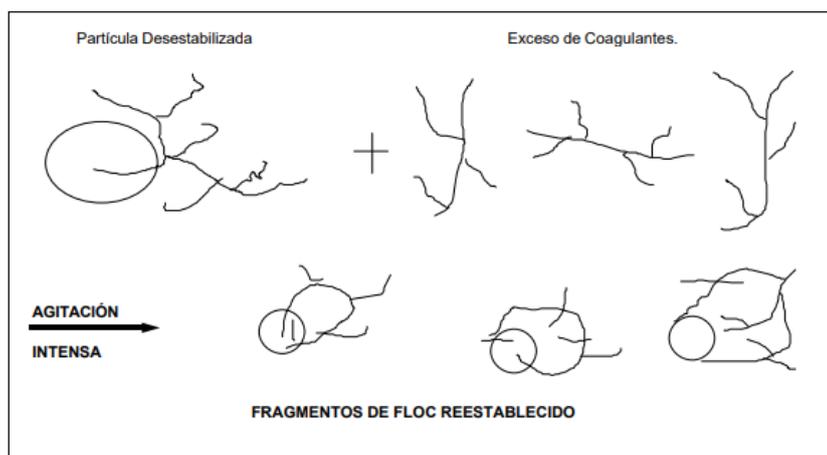
**FIGURA N° 2: Fuerzas de Atracción y Repulsión**



Fuente: Tratamiento de agua SEDAPAL

Si la distancia que separa a las partículas es superior a “L”, entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados. (SEDAPAL, 2000)

**FIGURA N° 3: Re estabilización de Partículas**



Fuente: Tratamiento de agua SEDAPAL

Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución. Ver fig. 2.

#### **2.4.5.1.2. Absorción y Neutralización de Cargas**

Las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electro cinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua (SEDAPAL, 2000).

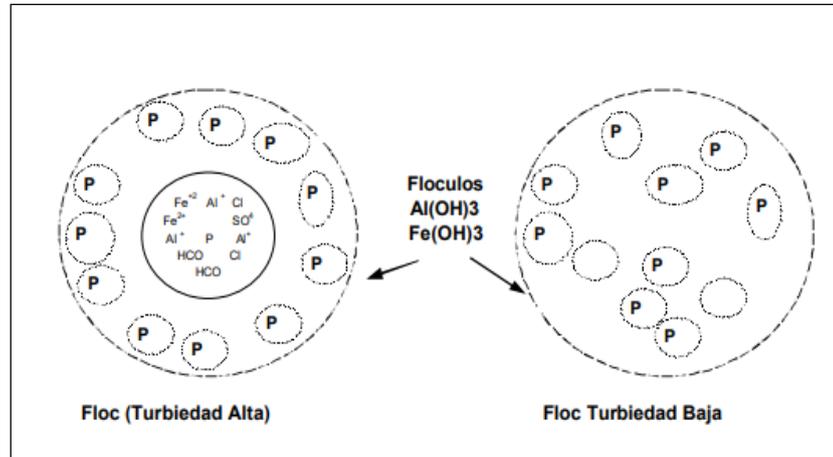
Después de la teoría de la doble capa la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica (SEDAPAL, 2000).

Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce a la re estabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante son absorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original. (Ver Fig. 4.) (SEDAPAL, 2000).

#### **2.4.5.1.3. Atrapamiento de Partículas dentro de un Precipitado**

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , o Cloruro Férrico  $FeCl_3$ , el floc está formado de moléculas de  $Al(OH)_3$  o de  $Fe(OH)_3$ . La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante (SEDAPAL, 2000).

**FIGURA N° 4: Atrapamiento de las partículas en un floc.**

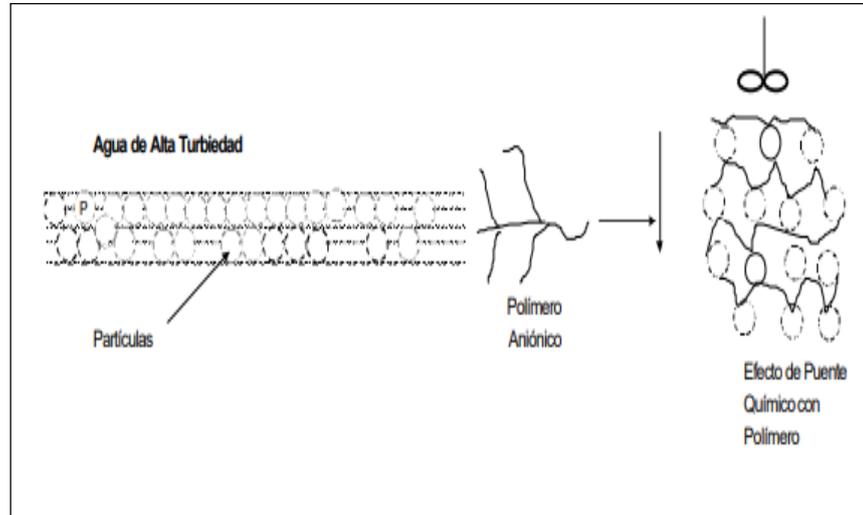


Fuente: Tratamiento de agua SEDAPAL

#### **2.4.5.1.4. Adsorción y Puente**

En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente”. Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas. Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una restabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros (SEDAPAL, 2000).

**FIGURA N° 5: Efecto de Puente de las partículas en suspensión**



Fuente: Tratamiento de agua SEDAPAL

#### **2.4.6. Floculación**

La floculación es la aglomeración de las partículas por efecto del movimiento lento del agua, formando compuestos de mayor tamaño (flocs) que puedan sedimentar por gravedad con mayor velocidad. En este caso debe haber una agitación lenta con baja velocidad de mezclado y se llevará a cabo en el floculador luego de un óptimo mezclado (Bournod, 2010).

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico (Osorno, 2009).

Los objetivos básicos de la floculación son reunir micro flóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración (Osorno, 2009).

#### 2.4.6.1. Cinética de la Floculación

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo (Osorno, 2009).

La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia (Osorno, 2009).

Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

- **Floculación Pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Sólo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 s y es independiente del tamaño de la partícula. (Osorno, 2009).
- **Floculación Ortocinética:** Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 min. (Osorno, 2009).

#### 2.4.6.2. Factores que influyen en la Floculación

- **Concentración y naturaleza de las partículas:** La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas (Osorno, 2009).
- **Tiempo de detención:** La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación

en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades (Osorno, 2009).

- **Gradiente de velocidad:** Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados (Osorno, 2009).

#### **2.4.6.3. Flokulyanty Praestol (Praestol)**

Son destinados a la intensificación de los procesos de la purificación de agua, la condensación y la deshidratación de los depósitos. La intensificación de la sedimentación de las partículas firmes es condicionada por la influencia compleja flokulyantov: - como los electrólitos reducen el potencial eléctrico a las superficies de la partícula, y la partícula adquiere la inclinación por la asociación con semejante; - como el polímero flokulyant une estas partículas en las grandes formaciones - flokuly, que velocidad de la sedimentación en las decenas y los centenares veces más, que cerca de las partículas iniciales. Flokulyanty Praestol se aplican en la hacienda comunal y las ramas distintas de la industria (minero, de celulosa y papel, petroquímico etc.) Para la limpieza de las aguas residuales, la deshidratación de los barros, la preparación del agua bebible y técnica. Algunas marcas de Praestola se aplican en otros procesos tecnológicos: - la recepción del papel en calidad del medio que retiene la fibra menuda; - el sondeo de los agujeros en la industria de petróleo y de gas en la cualidad zaguschayuschego el componente de las soluciones perforadoras; - el aumento de la devolución petrolera y la reparación de los agujeros a expensas de

la aplicación especial geleobrazuyuschih de las composiciones en la base poliakrilamida (PeakTNB Cha 6, s.f.).

El polímero macromolecular soluble de agua - flokulyant Praestol (Praestol) - la producción de la producción alemana (MSP). Flokulyanty Praestol han aparecido en el mercado internacional en 1998r, y en este tiempo han conseguido conquistar la popularidad en muchas esferas de la industria. (PeakTNB Cha 6, s.f.)

Flokulyant Praestol (Praestol) se usa activamente para la aceleración de los procesos depuradores de agua, la condensación de los depósitos y su deshidratación ulterior. Los reagentes químicos, usados en calidad de los electrólitos, bajan el potencial eléctrico de las moléculas del agua, a consecuencia de que las partículas comienzan a unirse uno con otro. Más flokulyant Praestol hace el papel ya del polímero, que une las partículas en los copos - "flokuly". Gracias a la acción de Praestola, mikrohlopya se unen en makrohlopya, que velocidad de la sedimentación en algunos centenares de vez es más alta de las partículas regulares. Así, la influencia compleja flokulyanta Praestol contribuye a la intensificación de la sedimentación de las partículas firmes (PeakTNB Cha 6, s.f.).

Flokulyant Praestol (Praestol) se aplica ampliamente en la hacienda comunal para la limpieza y la desinfección del agua potable. Además, flokulyant Praestol encuentra la aplicación en la industria química petroquímica y la producción de celulosa y papel. El reagente dado químico se usa activamente en todos los procesos depuradores de agua. Las marcas separadas de Praestola se aplican para la deshidratación de los barros petroleros, en la producción del papel (en calidad del medio, que retiene las fibras), en los procesos del aumento de la devolución petrolera y la reparación de los agujeros (geleobrazuyuschie las composiciones poliakrilamida), durante el sondeo de los agujeros en de gas y la

industria petrolera (en la cualidad zagustitelya de las soluciones perforadoras) etc. (PeakTNB Cha 6, s.f.).

Flokulyant Praestol (Praestol) es certificado en el territorio de la Federación Rusa y tiene todos los certificados necesarios higiénicos y los certificados de la conformidad De Gossanepidnadzora de Rusia que confirma no sólo la cualidad del producto dado químico, sino también su seguridad absoluta para la salud de la persona. Además, flokulyanty Praestol son recomendados a la Federación Rusa Gossanepidnadzorom para la aplicación en el abastecimiento de agua bebible. Las materias primas usadas durante la producción flokulyantov por Praestol, representan la solución concentrada de agua akrilamida, que resulta las elaboraciones únicas en el campo de la biotecnología, que eran honrados los premios del Gobierno de la Federación Rusa en el campo de la ciencia y la técnica (PeakTNB Cha 6, s.f.).

#### **2.4.7. Cloruro férrico**

El **cloruro férrico**, es un compuesto químico conocido también bajo nombres como tricloruro de hierro o cloruro de hierro III. Este compuesto forma parte de los compuestos conocidos como haluros de metales, y su formulación química es  $\text{FeCl}_3$ , donde el hierro utiliza su mayor valencia. Los cristales que forma este compuesto cambian de coloración dependiendo del ángulo en el que se observen, pues depende de la luz reflejada en ellos, pudiendo pasar de una coloración verdosa oscura a un púrpura. Por otro lado tenemos el compuesto hexahidratado, el cual presenta una coloración amarillo-naranja (Mendez, 2014).

El compuesto de cloruro férrico, en su forma anhidra, se dice que es higroscópico, por lo que forma una niebla de cloruro de hidrógeno cuando se encuentra en presencia de aire con humedad. En raras ocasiones podremos observar este compuesto en su forma natural, es decir, como mineral molisita (Mendez, 2014).

El cloruro de hierro III, se encuentra en estado de agregación sólida, pero es considerablemente volátil debido a que su enlace es covalente. Conforman cristales de tipo molecular laminar, por lo que se presenta en forma de escamas con brillo y coloración verdosa o púrpura según el ángulo desde el cual se mire. Posee una gran presión de vapor, por lo que los puntos de ebullición y fusión, así como el de sublimación, puede decirse que son bajos. Esto es debido a que tan sólo hace falta superar fuerzas de Van der Waals, para cambiar de estado. A pesar de esto, debemos controlar la temperatura a la cual tratamos este compuesto, pues puede llegar a descomponerse pasando a formar dicloruro de hierro (Mendez, 2014).

Su catión posee un poder de polarización considerable por lo que el porcentaje de enlace es principalmente covalente. Debido a este carácter covalente que presenta, el cloruro férrico es un compuesto soluble en presencia de disolventes de tipo orgánico. Cuando éste se encuentra en disolución de tipo alcohólica, recibe el nombre de tintura de hierro (Mendez, 2014).

Cuando procedemos a disolverlo en agua, este compuesto es hidrolizado, por lo que realiza una liberación de calor al producirse una reacción de tipo exotérmica. Esto da lugar a una solución de carácter corrosivo y ácido, de una tonalidad marrón que suele venir usada como coagulante cuando se tratan aguas de tipo residual con fines de potabilización. Cuando se disuelve en agua, no tiene el comportamiento esperado, pues debería pasar a precipitarse formando un  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que sería insoluble, pero sin embargo, su comportamiento es bien distinto, pues conforma una disolución coloidal del compuesto en cuestión, la cual tiene ese típico color marrón pardo que poseen todas las sales en disolución de hierro III. El cloruro férrico de tipo anhidro es considerado como un ácido fuerte de Lewis, y viene utilizado como catalizador en diferentes

procedimientos de síntesis en el campo de la química orgánica (Mendez, 2014).

Existen diferentes modos de obtener el cloruro férrico pero el más habitual en los laboratorios químicos es el que lo obtiene a través del paso de cloro en estado gaseoso por hierro caliente (Mendez, 2014).

El cloruro férrico puede reaccionar con otros tipos de cloruros. También en medio básico, este compuesto consigue reaccionar con distintos alcoholes dando dímeros de alcóxidos bastante complejos. Los oxalatos también pueden reaccionar con el compuesto que nos ocupa. El cloruro férrico además, es un oxidante de tipo suave, el cual consigue oxidar a otros cloruros, como puede ser el caso del cloruro de cobre (Mendez, 2014).

Como ya se había comentado, el cloruro férrico se usa como coagulante en procedimiento de tratamiento y potabilización de aguas. Además también participa en diferentes reacciones a modo de catalizador. Pero quizás es en el campo de la electrónica, donde este compuesto posee una aplicación más relevante (Mendez, 2014).

## **CAPÍTULO III**

### **3. Fundamentos metodológicos**

#### **3.1. Metodología.**

##### **3.4.3. Método.**

###### **En campo**

Se midió parámetros de campo y caudal del canal de agua residual proveniente de la bocamina de LLACUABAMBA, posteriormente se tomó la muestra (18 frascos de 1 L cada muestra). Se preservó y conservó en un cooler.

###### **En el laboratorio**

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de la Universidad Alas Peruanas, donde se trabajaron con agitadores magnéticos con vasos de precipitación de un volumen de 1 L y a 400 rpm donde se aseguró que la muestra tenga una mezcla completa de los compuestos. Se utilizó 8 vasos en donde se realizó las combinaciones e interactuaron las variables del estudio.

Se combinó dos niveles de pH con un valor de 4 y 7.5, una concentración de cloruro férrico de 5 mg/L y 15 mg/L Y un floculante natural de sábila vs el floculante praestol 851.

### Esquema experimental

	1° FASE	2° FASE		3° FASE		4° FASE
	T.M	POTENCIAL DE HIDROGENO pH	CONCENTRACIÓN DE CLORURO FERRICO [ ]	CONCENTRACIÓN DE FLOCULANTE [ ]	ICP MASA	
M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> R <sub>1</sub> M <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	pH <sub>1</sub> pH <sub>1</sub>	[ ] <sub>1</sub> [ ] <sub>1</sub>	[ ] <sub>A</sub> [ ] <sub>B</sub>	K <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	
M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> R <sub>1</sub> M <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	pH <sub>2</sub> pH <sub>2</sub>	[ ] <sub>1</sub> [ ] <sub>1</sub>	[ ] <sub>A</sub> [ ] <sub>B</sub>	K <sub>3</sub> K <sub>4</sub>	
M <sub>3</sub>	M <sub>3</sub> R <sub>1</sub> M <sub>3</sub> R <sub>2</sub>	pH <sub>1</sub> pH <sub>1</sub>	[ ] <sub>2</sub> [ ] <sub>2</sub>	[ ] <sub>A</sub> [ ] <sub>B</sub>	K <sub>5</sub> K <sub>6</sub>	
M <sub>4</sub>	M <sub>4</sub> R <sub>1</sub> M <sub>4</sub> R <sub>2</sub>	pH <sub>2</sub> pH <sub>2</sub>	[ ] <sub>2</sub> [ ] <sub>2</sub>	[ ] <sub>A</sub> [ ] <sub>B</sub>	K <sub>7</sub> K <sub>8</sub>	
	Toma de parámetros de campo: pH, Temperatura, Conductividad, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos	pH <sub>1</sub> =4 pH <sub>2</sub> =7.5	[ ] <sub>1</sub> =5 [ ] <sub>2</sub> =15	[ ] <sub>A</sub> =1% De la solución [ ] <sub>B</sub> =1% De la solución	K <sub>1</sub> = [ ] <sub>1</sub> , [ ] <sub>A</sub> y pH <sub>1</sub> K <sub>5</sub> = [ ] <sub>2</sub> , [ ] <sub>A</sub> y pH <sub>1</sub> K <sub>2</sub> = [ ] <sub>1</sub> , [ ] <sub>B</sub> y pH <sub>1</sub> K <sub>6</sub> = [ ] <sub>2</sub> , [ ] <sub>B</sub> y pH <sub>1</sub> K <sub>3</sub> = [ ] <sub>1</sub> , [ ] <sub>A</sub> y pH <sub>2</sub> K <sub>7</sub> = [ ] <sub>2</sub> , [ ] <sub>A</sub> y pH <sub>2</sub> K <sub>4</sub> = [ ] <sub>1</sub> , [ ] <sub>B</sub> y pH <sub>2</sub> K <sub>8</sub> = [ ] <sub>2</sub> , [ ] <sub>B</sub> y pH <sub>2</sub>	

Referencia: elaboración propia

#### **3.4.4. Tipo de Investigación**

El tipo de investigación es experimental, en este caso se controlara la variable independiente y la conformación de los grupos que necesita el estudio. Este tipo de investigación permite determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente.

#### **3.4.5. Nivel de Investigación**

El nivel de la investigación es descriptiva e inferencial, tiene como finalidad describir frecuencias y/o promedios; y se estiman parámetros con intervalos de confianza. También sacar conclusiones de toda la población a partir de la muestra y el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos (Alvarez, 2014).

### **3.2. Diseño de la Investigación**

El diseño es de tipo experimental ya que fue sometido al objeto de estudio (en este caso las aguas residuales de la mina artesanal Llacuabamba.) a determinar condiciones o estímulos (variable dependiente). para observar los efectos que se producen (variable dependiente).

El diseño de la investigación a realizar corresponde al diseño factorial. Éste describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen  $k$  factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian).

En dónde. El cuadro N<sup>º</sup>1 muestra los tres factores escogidos. Como los factores son continuos, su dominio experimental se expresa con los valores máximo y mínimo que pueden tomar. En la investigación se consideró dos

niveles de pH (4; 7.5); dos concentraciones de coagulante (5 mg/L y 15mg/L) y dos tipos de coagulante (Praestol 851 y Coagulante de sábila).

**Modelo aditivo lineal:**

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijk}$$

**Cuadro N<sup>o</sup> 1: Cuadro de doble entrada para las determinaciones de la eficiencia de remoción de arsénico**

		Concentración de cloruro férrico (mg/L) ( $\tau_i$ )			
		5 mg/L		15 mg/L	
		Tipo de floculante (1 %) ( $\gamma_k$ )			
		Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)	Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)
pH ( $\beta_j$ )	4	$X_{1111}$ $X_{2111}$	$X_{1112}$ $X_{2112}$	$X_{1211}$ $X_{2211}$	$X_{1212}$ $X_{2212}$
	7.5	$X_{1121}$ $X_{2121}$	$X_{1122}$ $X_{2122}$	$X_{1221}$ $X_{2221}$	$X_{1222}$ $X_{2222}$

Referencia: elaboración propia

**DONDE:**

$X_{rijk}$ : eficiencia de remoción de arsénico después de los tratamientos

$\tau_i$ : concentración de cloruro férrico

$B_j$ : potencial de hidrogeno

$\gamma_k$ : coagulante

$X_i$ : combinación de los tres factores

$\tau_i$ ,  $\beta_j$  y  $\gamma_k$ : Son los efectos producidos por el nivel i-ésimo del factor A, ( $\tau_i = 0$ ), por el nivel j-ésimo del factor B, ( $\beta_j = 0$ ) y por el nivel k-ésimo del factor C, ( $\gamma_k = 0$ ), respectivamente.

$(\tau\beta)_{ij}$ ,  $(\tau\gamma)_{ik}$ ,  $(\beta\gamma)_{jk}$  y  $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ : Son los efectos producidos por las interacciones entre A x B, A x C, B x C y A x B x C, respectivamente.

**Cuadro N<sup>o</sup> 2: Cuadro de doble entrada para las determinaciones de los tiempos de floculación**

		Concentración de cloruro férrico (mg/L) ( $\tau_i$ )			
		5 mg/L		15 mg/L	
		Tipo de floculante (1 %) ( $\gamma_k$ )			
		Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)	Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)
pH ( $\beta_j$ )	4	t <sub>1111</sub> t <sub>2111</sub>	t <sub>1112</sub> t <sub>2112</sub>	t <sub>1211</sub> t <sub>2211</sub>	t <sub>1212</sub> t <sub>2212</sub>
	7.5	t <sub>1121</sub> t <sub>2121</sub>	t <sub>1122</sub> t <sub>2122</sub>	t <sub>1221</sub> t <sub>2221</sub>	t <sub>1222</sub> t <sub>2222</sub>

Referencia: elaboración propia

**DONDE:**

t<sub>ijkl</sub>: tiempo de floculación de los lodos

**3.3. Hipótesis de la investigación**

Se analizó los datos en función de la recolección de información mediante los resultados de las pruebas experimentales

Se realizó el análisis de los resultados mediante una estadística descriptiva con medidas de tendencia central y medidas de dispersión, también se usó estadística inferencial para la comprobación de hipótesis planteadas, en las hipótesis se utilizó un ANOVA con la prueba de FISHER y se determinó las diferencias de varianza, también se utilizó la prueba de ‘t’ de Student y se determinó las diferencias significativas entre las medias de los grupos con los resultados.

**Cuadro N<sup>o</sup> 3: cuadro de ANOVA**

ANOVA					
FV	GL	SC	CM	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
( $\tau_i$ )	1	O	O/1	(O/1)/(S/5)	GL( $\tau_i$ )/ $\varepsilon$
( $\beta_j$ )	1	P	P/1	(P/1)/(S/5)	GL( $\beta_j$ )/ $\varepsilon$
( $\gamma_k$ )	1	Q	Q/1	(Q/1)/(S/5)	GL( $\gamma_k$ )/ $\varepsilon$
( $\tau_i \beta_j \gamma_k$ )	7	R	R/8	(R/8)/(S/5)	GL( $\tau_i \beta_j$ )/ $\varepsilon$
$\varepsilon$	5	S	S/5		
<b>TOTAL</b>	15	T	T/16		

Referencia: elaboración propia

**Donde:**

<b>GL</b>	Grado de libertad
<b>SC</b>	suma de cuadrados
<b>CM</b>	Cuadrado medio
( $\tau_i$ )	concentración de arsénico
( $\gamma_k$ )	tipo de floculante
( $\beta_j$ )	potencial de hidrogeno

Referencia: elaboración propia

### 3.3.1. Hipótesis general.

La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH influye significativamente en la de eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

### 3.3.2. Hipótesis específicas.

- La concentración de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA sobrepasan los límites máximos permisibles según el D.S N°010-2010-MINAM Anexo 1.

- Las concentraciones de cloruro férrico influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- Los distintos niveles de pH influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
- La utilización de floculantes influye significativamente en el tiempo de sedimentación de lodos y eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

### **3.4. Variables.**

#### **3.4.1. Variable Independiente.**

- **Coagulación**  
Indicadores
  - Concentración de cloruro férrico (mg/L)
- **Floculación**  
Indicadores
  - Concentración de floculante (mg/L)
- **pH**  
Indicadores
  - pH

#### **3.4.2. Variable Dependiente.**

- **Remoción de arsénico**  
Indicadores
  - Concentración de arsénico (mg/L)

### **3.5. Cobertura de estudio**

#### **3.5.1. Universo**

- Las aguas residuales de las mineras del Perú.

### 3.5.2. Población

- La población está compuesta por las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

### 3.5.3. Muestra

- La muestra es de 27 L de agua residual. Se tomó del canal de agua residual de mina proveniente de la bocamina artesanal de LLACUABAMBA con un caudal de 30 L/s.
- Para hallar el número de muestras significativas que asegurara que mis resultados sean confiables se utilizó el cálculo de muestra probabilística.

Formula:

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times q}{e^2(N - 1) + (Z^2 \times p \times q)}$$

**Donde:**

N: Tamaño de la población o universo.

e: limite aceptable de error muestral. Suele usarse un valor que varía entre el 1% y en 9%.

p: Es la variación positiva o la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio, toma un valor entre 0 y 1.cuando no se conoce generalmente se le da el valor de 0,5.

q: Variación negativa o proporción de individuos que no poseen esa características, es decir q= 1 – p.

Z: Constante que depende del nivel de confianza que asignemos o que corresponde a una distribución normal o de Gauss.

Z <sub>(k)</sub>	1.28	1.65	1.96	2.17	2.24	2.33	2.58
Nivel de confianza	80%	90%	95%	97%	97.5%	98%	99%

Los datos de campo con respecto a nuestra muestra son:

N: 30 l/s

e: limite aceptable de error muestral para la investigación será de 5%.

p: Es la variación positiva o la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio, es de 0.5

q: Variación negativa o proporción de individuos que no poseen esa características, es decir  $q= 1 - p$ ; esto es igual a 0.5

Z: Constante que depende del nivel de confianza que asignemos a nuestra investigación es de 95% es decir Z tendrá el valor de 1.96

$$n = \frac{30 \times 1.96^2 \times 0.5 \times 0.5}{0.05^2(30 - 1) + (1.96^2 \times 0.5 \times 0.5)}$$
$$n = 27$$

**Cuadro N<sup>a</sup> 4: cronograma de muestreo**

Fecha de muestreo	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
21/02/2018	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
21/02/2018	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>

Referencia: elaboración propia

### 3.6. Técnicas e Instrumentos

#### 3.7.3. Técnicas de la Investigación

- Estadística descriptiva (medias, varianza, desviaciones estándar y coeficiente de varianza).
- Revisión de bibliotecas virtuales.
- Base de datos.
- Protocolos de toma de muestra y monitoreo, mediciones de parámetro de campo.
- Revistas científicas de método de jarras.

#### **3.7.4. Instrumentos**

##### **3.6.2.1. Recojo de muestras:**

- 18 frascos de 1 L de plástico.
- 1 cooler.
- Una jarra de plástico de 1 L
- Ácido nítrico.
- Multiparametro.
- Papel indicador.

##### **3.6.2.2. Análisis de muestra en laboratorio**

- 6 vasos de precipitación de 1 L.
- 1 probeta de 1 L.
- 1 equipo mezclador.
- Coagulante (cloruro férrico).

#### **3.7. Procesamiento estadístico de la información**

##### **3.7.1. Medidas**

Se utilizara un procesador sistemático computarizado software.

- Exel.
- Minitab.

##### **3.7.2. Representaciones**

Mediante modelos matemáticos ya existentes e investigaciones que se realizaron en diferentes lugares del mundo.

- Las variables a utilizar son la dosis de cloruro férrico, el pH y el tipo de floculante.
- Grafica de eficiencia de tratamiento por coagulación y floculación.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. Organización, Presentación y Análisis de resultado**

#### **4.1. Resultado**

##### **4.1.1. Caracterización fisicoquímica del agua residual de mina artesanal LLACUABAMBA**

El valor del pH determinado (7.26 y 7.5) en el ingreso de los procesos es ligeramente básico, la conductividad eléctrica tiene un valor 605 us/cm y 557 us/cm lo cual indica una alta carga iónica del agua y en este caso se puede inferir que hay presencia de algún metal.

Las aguas residuales de la mina tienen una concentración promedio de 0.281 mg/L lo cual sobrepasa el valor máximo permisible de 0.1 mg/L según la normativa D.S. 010 – 2010 MINAN.

**Cuadro N<sup>o</sup> 5: cuadro de parámetros de campo y concentración de arsénico del agua residual de la mina artesanal LLACUABAMBA**

Código de ensayo	pH - entrada planta	Turbidez - entrada planta (NTU)	ORP- entrada planta (mv)	Conductividad- entrada planta (us/cm)	As - entrada planta (mg/L)
MI <sub>1</sub>	7.26	31.4	27.7	605	0.297
MI <sub>2</sub>	7.5	32.4	36.2	557	0.264

Referencia: elaboración propia

**4.1.2. Concentración de arsénico del agua residual de mina después del proceso de coagulación y floculación**

**Cuadro N<sup>o</sup> 6: Cuadro de doble entrada para las determinaciones de arsénico después del proceso de coagulación y floculación**

		Concentración de cloruro férrico (mg/L) ( $\tau_i$ )			
		5 mg/L		15 mg/L	
		Tipo de floculante (1 %) ( $\gamma_k$ )			
		Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)	Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)
pH ( $\beta_j$ )	4	0.11	0.15	0.085	0.094
		0.12	0.17	0.089	0.089
	7.5	0.07	0.087	0.034	0.066
		0.072	0.085	0.033	0.067

Referencia: elaboración propia

#### 4.1.3. Porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico

**Cuadro N<sup>o</sup> 7: Cuadro de doble entrada para las determinaciones del porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico**

		Concentración de cloruro férrico (mg/L) ( $\tau_i$ )			
		5 mg/L		15 mg/L	
		Tipo de floculante (1 %) ( $\gamma_k$ )			
		Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)	Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)
pH ( $\beta_j$ )	4	60.854	46.619	69.751	66.548
		57.295	39.502	68.327	68.327
	7.5	75.089	69.039	87.9	76.512
		74.377	69.751	88.256	76.157

Referencia: elaboración propia

#### 4.1.4. Determinación de tiempos de floculación

**Cuadro N<sup>o</sup> 8: Cuadro de doble entrada para las determinaciones de los tiempos de floculación**

		Concentración de cloruro férrico (mg/L) ( $\tau_i$ )			
		5 mg/L		15 mg/L	
		Tipo de floculante (1 %) ( $\gamma_k$ )			
		Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)	Praestol 851(A) (1 %)	Floculante de sábila (B) (1 %)
pH ( $\beta_j$ )	4	2.03	2.09	1.38	1.51
		2.08	2.12	1.48	1.58
	7.5	1.39	1.47	1.08	1.18
		1.35	1.53	1.10	1.21

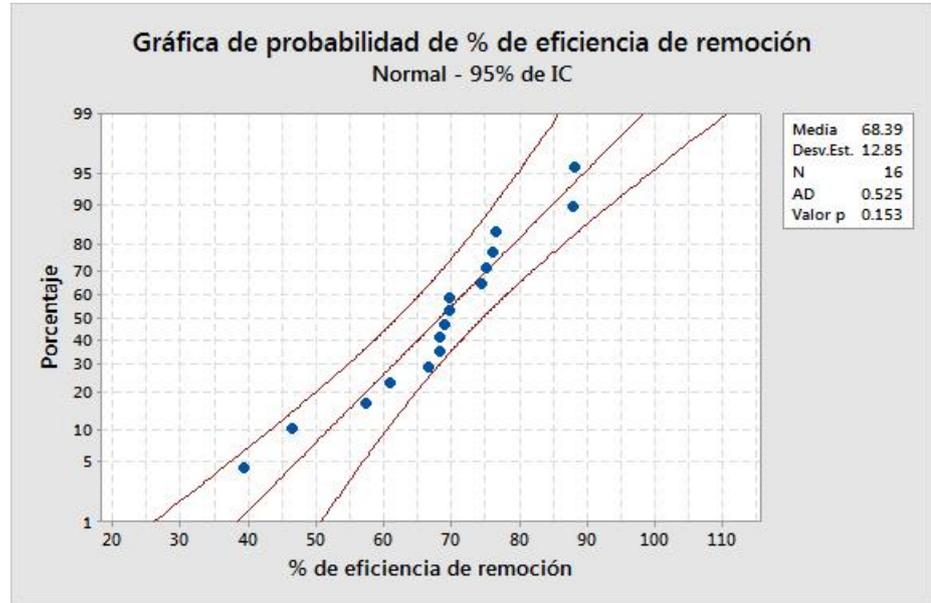
Referencia: elaboración propia

## 4.2. Discusiones de resultados

### 4.2.1. Probabilidad de % de eficiencia de remoción

Cumplen con el modelo

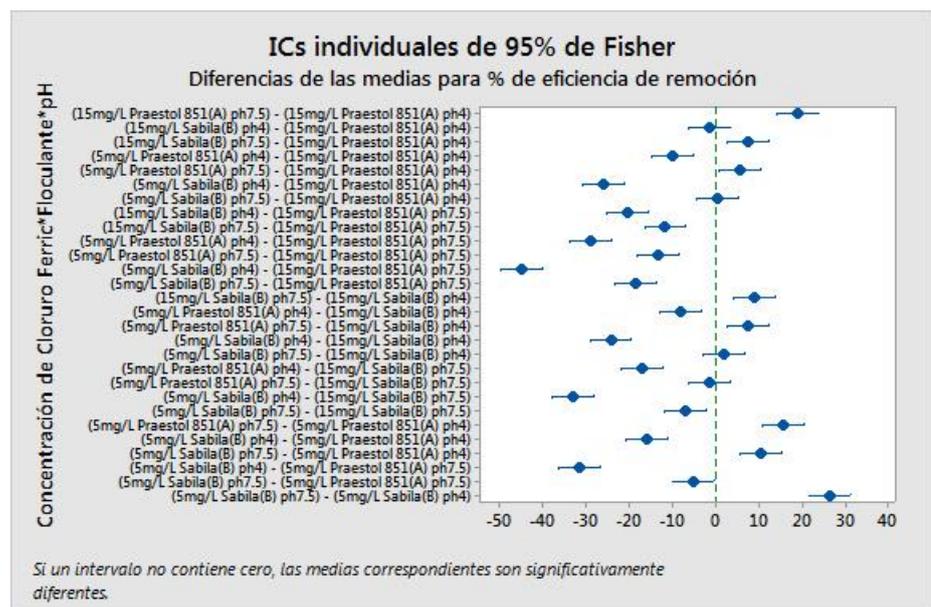
Grafico N<sup>o</sup> 1: Probabilidad de % de eficiencia de remoción



Referencia: elaboración propia

### 4.2.2. Intervalos de confianza simultáneos de la diferencia - 95% de Fisher

Grafico N<sup>o</sup> 2: Diferencias de las medias para % de eficiencia de remoción

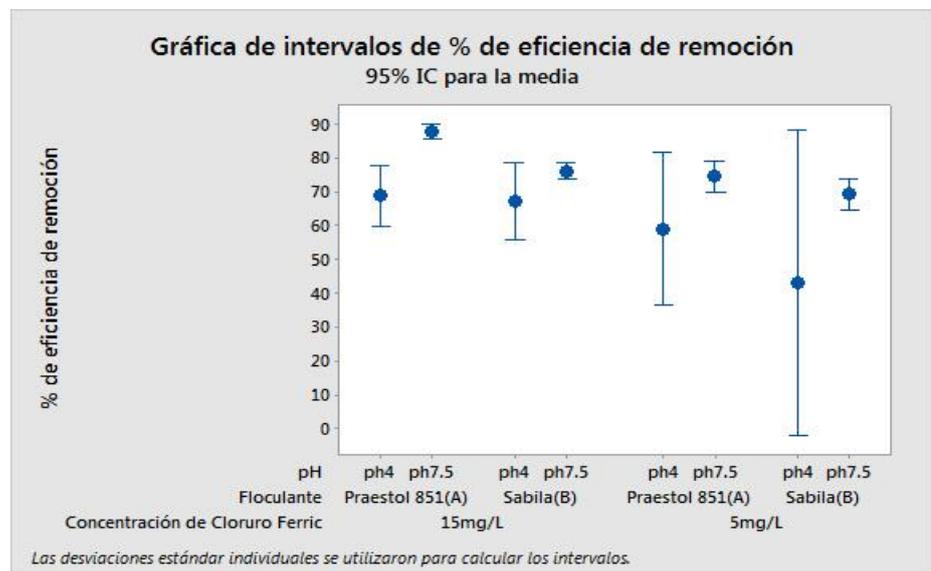


Referencia: elaboración propia

Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondiente son significativamente diferente, pero en este caso se observa que la combinación (de 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante de sábila(B) y un pH 4 tienen resultados que no son significativamente diferentes de la combinación 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante Praestol(A) 851 y un pH 4) con 68.327 %de eficiencia de remoción de arsénico y lo mismo se puede decir para las combinaciones de ( 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante de sábila(B) y un pH 7.5 - 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante Praestol(A) 851 y un pH 4), ( 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante de sábila(B) y un pH 7.5 - 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante sábila (B) y un pH 4), ( 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante de Praestol(A) y un pH 7.5 - 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante sábila (B) y un pH 7.5) y ( 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante de sábila(B) y un pH 7.5 - 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante Praestol(A) y un pH 7.5) y el resto de combinaciones son significativamente diferentes.

**4.2.3. Intervalos de confianza para la media de 95% según el % de eficiencia de remoción**

**Grafico N° 3: Intervalos de confianza de 95 % para la media del % de eficiencia de remoción**



Referencia: elaboración propia

Según el gráfico de IC para la media se puede decir que utilizando una dosis de 15 mg/L de cloruro férrico, Floculante Praestol 851(A) a un pH 7.5 se obtiene mayor porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico y los resultados son menos variables.

La combinación que muestra más variabilidad en sus resultados es el de 5 mg/L de cloruro férrico, Floculante de sábila y un pH 4.

#### 4.2.4. Comparación múltiple de Fisher para la determinación del mejor tratamiento que garantice la mejor eficiencia de remoción de arsénico

**Cuadro N° 9: Cuadro de agrupación de la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para la eficiencia de remoción de arsénico**

Concentración de cloruro férrico Mg/L	Tipo de floculante (A), (B)	Ph	N	Media (%)	Agrupación					
15	Praestol 851(A)	7.5	2	88.078	A					
15	Sábila (B)	7.5	2	76.335		B				
5	Praestol 851(A)	7.5	2	74.733		B				
5	Sábila (B)	7.5	2	69.395			C			
15	Praestol 851(A)	4	2	69.039			C			
15	Sábila (B)	4	2	67.438			C			
5	Praestol 851(A)	4	2	59.075				D		
5	Sábila (B)	4	2	43.061					E	

Referencia: elaboración propia

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferente.

En este caso la combinación que logro mayor remoción de arsénico con una eficiencia de 88.078 % fueron las muestras en donde se utilizó 15% mg/L de cloruro férrico, floculante Praestol 851 (A) y un pH de 7.5. Este resultado es favorable ya que con esta eficiencia de remoción se logra disminuir el arsénico de 0.281 mg/L hasta 0.0335

mg/L, estando por debajo del límite máximo permisible de 0.1 mg/L de arsénico residual de un efluente minero (D.S. 010 – 2010 MINAN.) exigidos por la norma peruana.

Los segundo mejores fueron las combinaciones de (15mg/ de cloruro férrico, floculante sábila (B) y pH 7.5) y (5mg/ de cloruro férrico, Praestol 851 (A) y pH 7.5) con una eficiencia de remoción de arsénico 76.335% y 74.733 % respectivamente. Las concentraciones promedio de arsénico de estas dos combinaciones después del tratamiento fueron 0.067 mg/L y 0.71 mg/L respectivamente, el cual también están por debajo del límite máximo permisible que es de 0.1 mg/L.

El que logro menor remoción de arsénico con una eficiencia de 43.061 % fue la combinación de (5 mg/L de cloruro férrico, floculante de Sábila (B) y pH 4). La concentración promedio de arsénico que se obtuvo después del tratamiento fue de 0.16 mg/L el cual sobrepasa el límite máximo permisible de 0.1 mg/L de la normativa peruana.

**Cuadro N<sup>o</sup> 10: Cuadro de agrupación de la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para el tiempo de sedimentación**

Concentración de cloruro férrico Mg/L	Tipo de floculante (A), (B)	pH	N	Tiempo (h)	Agrupación							
5	Sábila (B)	4	2	2.105	<b>A</b>							
5	Praestol 851(A)	4	2	1.990		<b>B</b>						
15	Sábila (B)	4	2	1.545			<b>C</b>					
5	Sábila (B)	7.5	2	1.500			<b>C</b>	<b>D</b>				
15	Praestol 851(A)	4	2	1.430				<b>D</b>	<b>E</b>			
5	Praestol 851(A)	7.5	2	1.370					<b>E</b>			
15	Sábila (B)	7.5	2	1.195						<b>F</b>		
15	Praestol 851(A)	7.5	2	1.090							<b>G</b>	

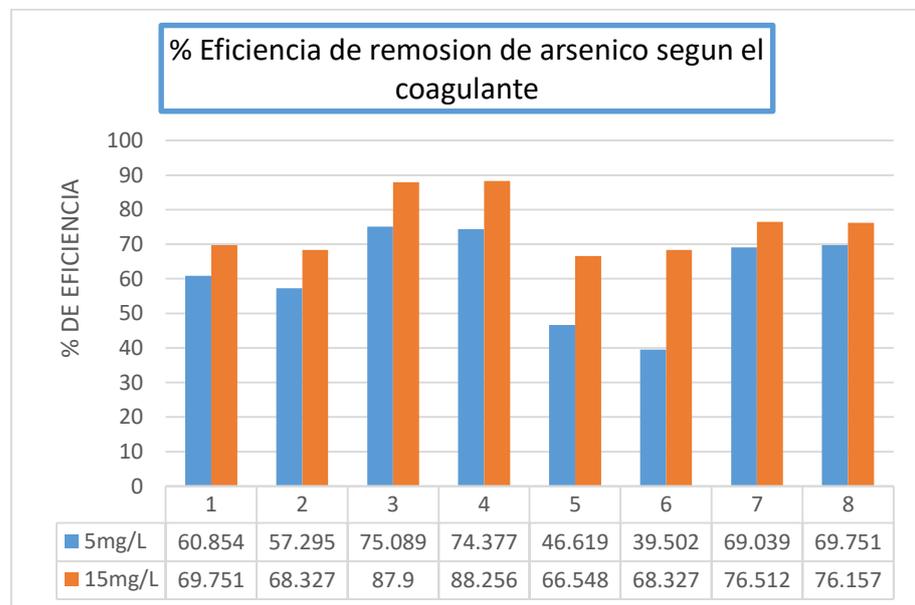
Referencia: elaboración propia

Entre todas las combinaciones el menor tiempo de sedimentación es de 1.09, este resultado se logra cuando se utiliza 15 mg/L de cloruro férrico, coagulante Praestol 851 (A) y pH 7.5 y también es la misma combinación que logra una mayor eficiencia de remoción.

#### 4.2.5. Influencia de la concentración de coagulante

Se realizaron ensayos para dos dosis diferentes de coagulantes, El grafico 4 muestra mayor eficiencia de remoción de arsénico en los ensayos con dosis de 15 mg/L de cloruro férrico comparados con los ensayos con dosis de 5mg/L de cloruro férrico. Los resultados obtenidos muestran que mientras mayor es la concentración de coagulante más eficiencia de remoción se obtiene. En el cuadro N° 11 se observa que al realizarse un ANOVA al 95% de confianza estadística, demuestra que la influencia de la concentración de coagulante en el tratamiento es significativa.

**Grafico N° 4: Influencia de la concentración de coagulante en la remoción de arsénico**

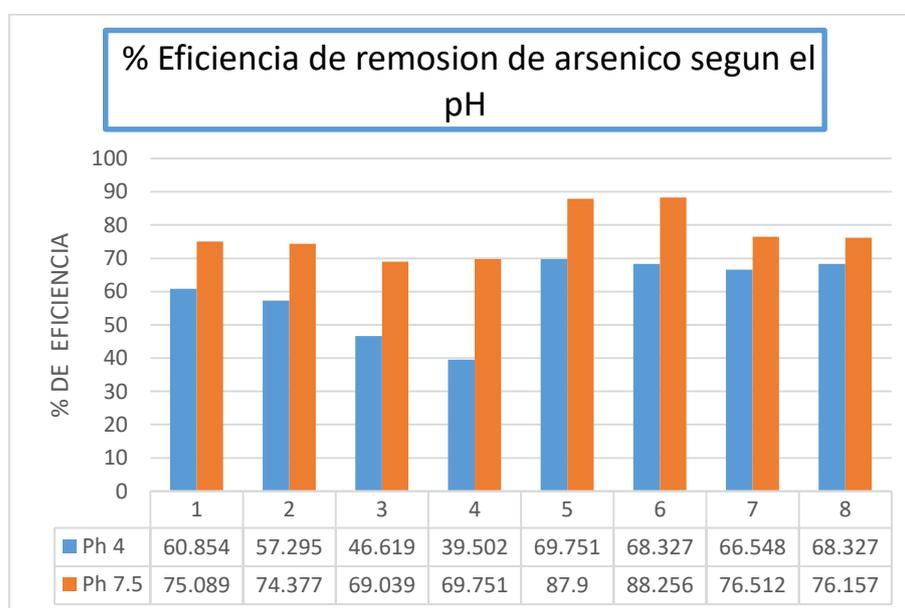


Referencia: elaboración propia

#### 4.2.6. Influencia del pH

El gráfico N° 5 muestra que se obtiene mayor eficiencia de remoción de arsénico en un pH 7.5. En el cuadro N° 11 se observa que al realizarse un ANOVA al 95% de confianza estadística, demuestra que la influencia del Ph en el tratamiento es significativa.. Según **Francisca y C., (2014)**, El pH en la solución es un factor determinante en el proceso de interacción fluido partícula. La química de la coagulación-floculación está basada en las cargas eléctricas de las partículas, es por ello que el pH y la dosis del coagulante influirán en este proceso. En los resultados donde se obtuvieron mayor eficiencia de remoción fueron las soluciones de pH 2 a 4 pero esto se debe a que también utilizaron bentonita que tiene un pH de 9 a 10. A medida que la relación entre concentración de bentonita y la dosis de cloruro férrico aumenta, crece el pH de la solución.

**Gráfico N° 5: Influencia del pH en la remoción de arsénico**

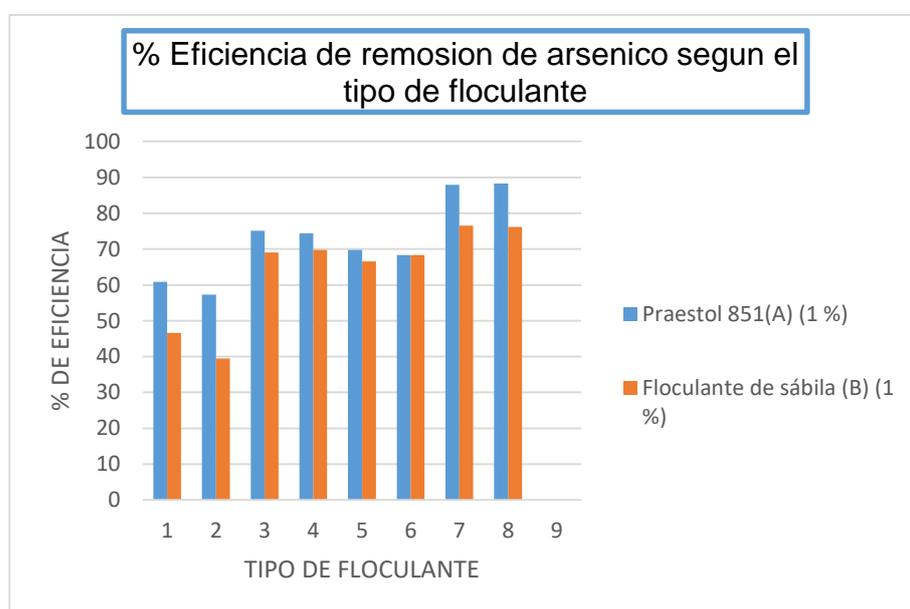


Referencia: elaboración propia

#### 4.2.7. Influencia del tipo de floculante

El grafico N° 6 muestra que la mayor eficiencia de remoción se consigue utilizando el floculante Praestol 851. En el cuadro N° 11 se observa que al realizarse un ANOVA al 95% de confianza estadística, demuestra que la influencia del tipo de floculante en el tratamiento es significativa.

**Grafico N° 6: Influencia de la concentración de floculante en la remoción de arsénico**



Referencia: elaboración propia

#### 4.3. Contrastación de la Hipótesis

Después de haber obtenido la evidencia empírica; en la presente investigación, mediante pruebas estadísticas como la realización de un ANOVA se procede a comprobar si las hipótesis planteadas inicialmente son compatibles con la evidencia.

- **Hipótesis nula (H0):** indica que el factor no tiene ningún efecto sobre las variables dependientes.
- **Hipótesis alternativa (H1):** indica que el factor tuvo efecto sobre las variables dependientes.

**Cuadro N<sup>o</sup> 11: Cuadro de Análisis de Varianza para la eficiencia de remoción de arsénico**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
Concentración de FeCl <sub>3</sub>	1	746.00	746.00	171.06	0.000
Tipo de floculante	1	300.97	300.97	69.01	0.000
Ph	1	1222.52	1222.52	280.32	0.000
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Floculante	1	16.03	16.03	3.68	0.092
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Ph	1	49.40	49.40	11.33	0.010
Floculante / Ph	1	0.07	0.07	0.02	0.901
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Floculante / Ph	1	108.35	108.35	24.84	0.001
Error	8	34.89	4.36		
Total	15	2478.22			

Referencia: elaboración propia

**Cuadro N<sup>o</sup> 12: Cuadro de Análisis de Varianza para el tiempo de sedimentación**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
Concentración de FeCl <sub>3</sub>	1	0.72676	0.726756	405.16	0.000
Tipo de floculante	1	0.05406	0.054056	30.14	0.001
Ph	1	0.91681	0.916806	511.11	0.000
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Floculante	1	0.00016	0.000156	0.09	0.775
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Ph	1	0.07156	0.071556	39.89	0.000
Floculante / Ph	1	0.00001	0.000006	0.00	0.954
Concentración de FeCl <sub>3</sub> / Floculante / pH	1	0.00016	0.000156	0.09	0.775
Error	8	0.01435	0.001794		
Total	15	1.78384			

Referencia: elaboración propia

#### 4.3.1. Contrastación hipótesis general.

La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH influye significativamente en la de eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA, y esto se da a una concentración de 15 mg/L de cloruro férrico, Praestol 851 (A) y un pH 4 generando un 95 % de eficiencia.

##### ➤ Contrastación hipótesis

- **H0:** La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH influye significativamente en la de eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA, y esto se da a una concentración de 15 mg/L de cloruro férrico, Praestol 851 (A) y un pH 4 generando un 95 % de eficiencia.
- **H1:** La interacción de concentración de coagulante, floculante y pH no influye significativamente en la de eficiencia en la remoción de arsénico en las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA, y esto no se da a una concentración de 15 mg/L de cloruro férrico, Praestol 851 (A) y un pH 4 generando un 95 % de eficiencia.

Para la contratación de hipótesis se realizó un ANOVA al 95% de confianza estadística, que demuestra que la interacción de concentración de coagulante, Floculante y pH influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico.

El cuadro N° 9 presenta la mejor combinación para obtener mayor eficiencia de remoción, esto se da a una concentración de 15 mg/L de cloruro férrico, Praestol 851 (A) y un pH 7.5.generando un 88.078 % de eficiencia. Por lo que se Acepta la hipótesis nula y se rechaza la alterna.

#### 4.3.2. Contrastación hipótesis específicas.

- La concentración de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA sobrepasan los límites máximos permisibles según el D.S N°010-2010-MINAM Anexo 1.
  - **H<sub>0</sub>**: La concentración de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA sobrepasan los límites máximos permisibles según el D.S N°010-2010-MINAM Anexo 1.
  - **H<sub>1</sub>**: La concentración de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA no sobrepasan los límites máximos permisibles según el D.S N°010-2010-MINAM Anexo 1.
- Las concentraciones de cloruro férrico influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>0</sub>**: Las concentraciones de cloruro férrico influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>1</sub>**: Las concentraciones de cloruro férrico no influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

Para la contratación de hipótesis se realizó un ANOVA al 95% de confianza estadística, que demuestra que la concentración de cloruro férrico influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico.

El cuadro N° 9 presenta el mejor porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico, esto se da a una concentración de 15 mg/L de cloruro férrico. El mismo cuadro presenta también que la eficiencia de remoción menos efectiva fue obtenida utilizando menor concentración de cloruro férrico en este caso de 5 mg/L. Por lo que se Acepta la hipótesis nula y se rechaza la alterna.

- Los distintos niveles de pH influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>0</sub>**: Los distintos niveles de pH influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>1</sub>**: Los distintos niveles de pH no influye significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

Para la contratación de hipótesis se realizó un ANOVA al 95% de confianza estadística, que demuestra que los distintos niveles de pH influyen significativamente en la eficiencia de remoción de arsénico.

Al agrupar la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para la eficiencia de remoción de arsénico se pudo identificar que los mejores resultados de eficiencia de remoción mostrados en el cuadro N° 9 se da a un nivel de pH 7.5 y menor eficiencia de remoción fueron a un nivel de pH 4. Por lo que se Acepta la hipótesis nula y se rechaza la alterna.

- La utilización de floculantes influye significativamente en la sedimentación de lodos en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>0</sub>**: La utilización de floculantes influye significativamente en la sedimentación de lodos en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.
  - **H<sub>1</sub>**: La utilización de floculantes no influye significativamente en la sedimentación de lodos en la eficiencia de remoción de arsénico de las aguas residuales de la mina artesanal LLACUABAMBA.

Para la contratación de esta hipótesis se realizó dos ANOVA al 95% de confianza estadística para la eficiencia de remoción de arsénico y el tiempo de sedimentación, que demuestra que el tipo de floculante influyen significativamente en el tiempo de sedimentación y la eficiencia de remoción de arsénico.

Al agrupar la información utilizando el método LSD Fisher y una confianza del 95 % para la eficiencia de remoción de arsénico y tiempo se pudo identificar que los mejores resultados de eficiencia de remoción mostrados en el cuadro N° 9 se da utilizando el floculante Praestol 851 (A) con 88.078 % de eficiencia y los resultados del mejor tiempo de sedimentación mostrados en el cuadro N° 10 se da utilizando el floculante Praestol 851 (A) con 1.090 h de sedimentación. Por lo que se Acepta la hipótesis nula y se rechaza la alterna.

## CONCLUSIONES

Luego de haber analizado el método de coagulación/floculación podemos concluir que el mismo brinda resultados satisfactorios para la eficiencia de remoción de Arsénico en el agua residual de la mina artesanal LLACUABAMBA.

La mayor eficiencia de remoción de arsénico en agua residual de mina se logra con la interacción del coagulante, floculante y pH con los siguientes valores: 15 mg/L de cloruro férrico, floculante Praestol 851 y pH 7.5.

La mejor eficiencia de remoción de arsénico en agua residual de mina se logra utilizando mayor concentración de coagulante en este caso con 15 mg/L de cloruro férrico.

Se logra mayor eficiencia de remoción de arsénico de agua residual de mina a un pH de 7.5 y menor remoción a un pH de 4.

Se logra mejor eficiencia de remoción de arsénico y mejor tiempo de sedimentación utilizando el floculante Praestol 851.

## RECOMENDACIONES

Realizar pruebas con concentraciones mayores a 15 mg/L de cloruro férrico y a pH mayores a 7.5. Ya que en base a los resultados de la investigación se logró mayor eficiencia de remoción de arsénico con mayor cantidad de coagulante a pH básico

Realizar pruebas con mayor concentración de floculante para poder disminuir el tiempo de sedimentación y mayor formación de flocs ya que la eficiencia de remoción de arsénico también dependía de la floculación en el proceso.

Considerar el límite máximo permisible a la descarga para elegir un porcentaje de eficiencia de remoción de arsénico que cumpla con la normativa y tener un balance entre la concentración del cloruro férrico y el pH del agua residual. Si la concentración de cloruro férrico es mayor a 15 entonces variar el pH del agua residual de mina para así poder cumplir con el LMP que está en un rango de 6 hasta 9 de potencial de hidrogeno según el D.S. 010 – 2010 MINAM.

## BIBLIOGRAFIA

1. Agencias para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2017). Resumen de Salud Pública. EE. UU.: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU.
2. Alvarez, F. (8 de septiembre de 2014). *PREZY*. Obtenido de INVESTIGACION INFERENCIAL: <https://prezi.com/rhsfr-lnajhp/investigacion-inferencial/?webgl=0>
3. Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua*. Arequipa.
4. Bournod, L. C. (2010). *Remoción del Arsénico mediante Coagulación, Filtración y Sedimentación Comparación con tecnologías disponibles y análisis de una planta tipo*. Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
5. C, F. y. (2014). *REMOCION DE ARSÉNICO EN AGUA MEDIANTE PROCESOS DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN*. Córdoba: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas.
6. Mendez, A. (27 de Enero de 2014). *LA GUIA*. Obtenido de LA GUIA: <https://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/cloruro-ferrico>
7. MINISTERIO DE SALUD . (2007). *RÍOS PARCOY Y MARAÑÓN Y LAGUNA PIAS . PARCOY: PROGRAMA NACIONAL DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS*.
8. Organización Mundial de la Salud. (2016). *el arsenico*. Bangladesh: Centro de prensa.
9. Osorno, H. A. (2009). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN DE UNA*. Medellín: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
10. Ramírez, J. L. (2012). *Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción*. México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
11. SEDAPAL. (2000). *TRATAMIENTO DE AGUA*. Lima: Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

## ANEXOS

### ANEXO I Límites máximos permisibles según el D.S. N° 010 – 2010 MINAM

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

### ANEXO II Medición de velocidad del agua



Fotografía 1  
Medición de caudal

**ANEXO III Medición de profundidad y ancho por donde pasa el flujo de agua**



Fotografía 2  
Medición de altura del agua

**ANEXO IV Toma de muestra**



Fotografía 3  
toma de muestra

## ANEXO V Toma de repetición de muestra



Fotografía 4  
toma de muestra

## ANEXO VI Medición de parámetros de campo



Fotografía 5  
Medición de parámetros de campo

## ANEXO VII Segunda medición de parámetros de campo



Fotografía 6  
Medición de parámetros de campo

## ANEXO VIII Reporte de METALES TOTALES en Monitoreo de Aguas

MINERA AURIFERA RETAMAS S.A BUREAU VERITAS  
Sistema de Laboratorio

Página : 1 de 1  
Fecha : 21/02/2018  
Hora : 18:51:54

### Rporte de METALES TOTALES en Monitoreo de Aguas

Ciliente : P.C.S.M.A. Cantidad Mestras 16  
Descripción : RED MONITOREO Fecha Recepción: 21/02/2018  
N° Lote : LQ - 1803108 Fecha Aprobación: 22/02/2018

MUESTRA	DESCRIPCIÓN	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
MI <sub>1</sub>	Bocamina Far West	0.297	<0,003	0.002	1.7280	0.1680	0.0135	0.0556
MI <sub>2</sub>	Bocamina Far West	0.264	<0,003	0.003	2.2180	0.1720	0.0183	0.0683
K1	Bocamina Far West	0.110	<0,003	<0.001	0.6490	0.0164	0.0049	0.0076
K1 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.120	<0,003	0.001	0.6530	0.0167	0.0053	0.0081
K2	Bocamina Far West	0.150	<0,003	0.001	0.6690	0.0142	0.0054	0.0079
K2 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.170	<0,003	0.001	0.6710	0.0143	0.0054	0.0083
K3	Bocamina Far West	0.070	<0,003	0.001	0.5110	0.0129	0.0021	0.0051
K3 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.072	<0,003	0.001	0.5150	0.0133	0.0026	0.0048
K4	Bocamina Far West	0.087	<0,003	<0,010	0.5220	0.0118	0.0028	0.0045
K4 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.085	<0,003	<0,010	0.5170	0.0121	0.0029	0.0043
K5	Bocamina Far West	0.085	<0,003	0.001	0.6390	0.0166	0.0054	0.0029
K5 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.089	<0,003	0.001	0.6230	0.0163	0.0054	0.0031
K6	Bocamina Far West	0.094	<0,003	0.001	0.6310	0.0161	0.0054	0.0025
K6 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.089	<0,003	0.001	0.6361	0.0165	0.0540	0.0210
K7	Bocamina Far West	0.034	<0,003	<0,001	0.4910	0.1270	0.0210	0.0140
K7 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.033	<0,003	0.001	0.4760	0.1260	0.0260	<0.010
K8	Bocamina Far West	0.066	<0,003	<0,001	0.4770	0.1170	0.0280	0.0170
K8 <sub>R</sub>	Bocamina Far West	0.067	<0,003	<0,001	0.4780	0.1200	0.0290	0.0150
Valor Limite D.S. N° 010 - 2010 MINAM		0.1	0.05	0.5	-----	-----	0.2	1.5



BUREAU VERITAS

Jefe de Laboratorio

*Alex Espirito Rafael*  
ALEX ESPIRITO RAFAEL  
SUPERVISOR DE LABORATORIO  
DIVISION METALES Y MINERALES