



**UPAGU**

**VICERRECTORADO DE  
INVESTIGACIÓN**

**I N F O R M E   D E   I N V E S T I G A C I Ó N**

**TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS NATURALES DE LA JASS SANTO  
DOMINGO DEL CASERIO DE YUN YUN DEL CENTRO POBLADO PORCÓN  
BAJO, CON ROCA CALIZA Y FILTRACIÓN POR GRAVEDAD –  
CAJAMARCA 2018**

**D O C E N T E   I N V E S T I G A D O R**

**Mg. Ing. Fernando Camilo Joaquin Rodriguez**

**Cajamarca, 2018**

## **INVESTIGADORES:**

Investigador Principal:

- Fernando Camilo Joaquín Rodríguez – Docente Investigador asignado a la Facultad Ingeniería/Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos – UPAGU.

Coinvestigadores:

- Persi Vera Zelada – Decano la Facultad de Ingeniería – UPAGU.
- Danny Fernando Perez Tucto – Alumno de la Facultad Ingeniería/Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos – UPAGU.
- Yuri Lisbeth Ventura Zuloeta – Alumna de la Facultad Ingeniería/Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos – UPAGU.
- Mariana Marisol Palco Valencia – Alumna de la Facultad Ingeniería/Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos – UPAGU.

## **ÁREA Y LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Medio Ambiente - Calidad y alternativas de tratamiento del agua

## INDICE

INDICE .....	3
INDICE DE TABLAS .....	4
INDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. MARCO TEORICO.....	12
2.1. Formación de los manantiales.....	12
2.2. Incorporación de sustancias disueltas en las aguas de los manantiales .....	14
2.3. Toxicidad de los metales en el agua .....	21
2.4. Tratamiento del agua con roca caliza .....	22
2.5. Filtración del agua con filtros multicapas.....	26
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	29
3.1. Procedimiento de investigación.....	29
3.2. Diseño de investigación.....	31
3.3. Mediciones.....	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Caracterización del Agua de Ingreso .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2. Determinación del tiempo de residencia en el tratamiento con roca caliza. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
4.3. Tratamiento en sistema continuo conformado por un Alcalinizador y el Filtro multicapas.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6. REFERENCIAS .....	44

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitación de distintos hidróxidos metálicos a partir de una solución 0.01 M .....	23
Tabla 2: Frecuencias de medición de parámetros .....	30
Tabla 3: Caracterización del agua de la JASS Santo Domingo .....	35
Tabla 4: Variación del pH del agua en contacto con roca caliza .....	36
Tabla 5: Resultados de Aluminio en el sistema de tratamiento continuo .....	40
Tabla 6:pH, Turbidez y Conductividad del sistema continuo de tratamiento del agua .....	40

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rangos de pH y predominancia de distintas especies de Aluminio en medio acuoso con indicación más probable en el suelo. ....	25
Figura 2: Componentes del filtro de Bioarena (CAWAST,2009).....	32
Figura 3: Esquema de funcionamiento del biofiltro (CAWST, 2009).....	32
Figura 4: Tendencia del pH del agua en contacto con roca caliza .....	37
Figura 5:Determinación del tiempo de residencia para la alcalinización .....	38
Figura 6: Evaluación de amortiguamiento de tendencias de amortiguamiento a pH 8.5 .....	39

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad evaluar la efectividad del tratamiento de aguas ácidas naturales de la JASS Santo domingo del caserío de Yun Yun del centro poblado Porcón Bajo, mediante el uso de roca caliza y filtración por gravedad. La metodología de investigación se realizó en tres procesos: (1) Caracterización del agua, con lo cual se determina los parámetros que no cumplen con la calidad del agua para consumo humano. (2) Determinar el tiempo de residencia de Alcalinización; esto es necesario para aumentar el pH mediante el uso de roca caliza, pero que a la vez no exceda de 8.5. (3) Sistema continuo de Alcalinización y Filtración, en base al tiempo de residencia de alcalinización se diseña y construye un “Alcalinizador” para un caudal específico seguido de un sistema de filtración de multicapas de arena y grava. Los resultados obtenidos según la metodología de investigación basado en los tres procesos son los siguientes: (1) Caracterización del agua, los parámetros evaluados que no cumple con la calidad del agua son el pH cuyo valor fue 4.30 (Límites 6.5 a 8.5) y el Aluminio con valor de 0.681 mg/L (Límite 0.20 mg/L). (2) Tiempo de residencia de Alcalinización; el tiempo óptimo determinado fue de 15 minutos en una relación de 100 mL de piedra por cada 300 mL de agua. (3) Sistema continuo de Alcalinización y Filtración, los resultados finales del agua tratado en base al pH fueron de 7.84 con una concentración de Aluminio Total de 0.117 mg/L. Con estos resultados podemos concluir que el agua del caserío de Yun Yun puede ser tratada mediante piedra caliza y filtración multicapas de arena y grava.

## ABSTRACT

The purpose of the present investigation was to evaluate the effectiveness of the natural acid water treatment of the JASS Santo Domingo of the Yun Yun village in the town of Porcón Bajo, using limestone and filtration by gravity. The research methodology was carried out in three processes: (1) Characterization of water, which determines the parameters that do not comply with the quality of water for human consumption. (2) Determine the residence time of Alkalization; this is necessary to increase the pH by using limestone, but at the same time does not exceed 8.5. (3) Continuous Alkalization and Filtration System, based on alkalization residence time, an "Alkalinizer" is designed and constructed for a specific flow followed by a multilayer filtration system of sand and gravel. The results obtained according to the research methodology based on the three processes are as follows: (1) Water characterization, the evaluated parameters that do not comply with the water quality are the pH whose value was 4.30 (Limits 6.5 to 8.5) and the Aluminum with a value of 0.681 mg / L (Limit 0.20 mg / L). (2) Alkalization residence time; the optimal time determined was 15 minutes in a 100-mL stone ratio for every 300 mL of water. (3) Continuous Alkalization and Filtration System, the final results of the treated water based on pH were 7.84 with a Total Aluminum concentration of 0.117 mg / L. With these results we can conclude that the water of the hamlet of Yun Yun can be treated with limestone and multi-layer filtration of sand and gravel.

# 1. INTRODUCCIÓN

El agua que proviene de las precipitaciones es ligeramente ácida debido a que está en contacto con el dióxido de carbono y al entrar en contacto con los diferentes tipos de suelos, se empiezan a generar diversas reacciones y por consecuencia se introducen diferentes especies químicas al seno del agua. El agua ligeramente ácida disuelve con facilidad algunos minerales mediante las reacciones ácido-base, adicionalmente el contenido de oxígeno dentro del agua hace que se produzcan también reacciones óxido-reducción generando la ionización de algunos metales o metaloides (desde ahora en adelante solamente lo describiremos como metales, tanto a los metales como los metaloides)<sup>1</sup>. Las reacciones se producen en la interacción sólido-líquido en los niveles subterráneos y superficiales del suelo y luego las especies químicas disueltas son transportadas hacia la superficie como manantiales.

Debido a que las aguas de algunos manantiales han disuelto una mayor cantidad de minerales, éstas no son aptas para el consumo humano ni para el ambiente, por lo cual es necesario tratar el agua para que luego pueda ser usada para las diversas actividades o consumos por el hombre. Podemos decir también que el agua mientras más ácida tiene, mayor poder de disolución de metales se va generando.

Para el tratamiento de aguas ácidas que han sido impactadas por actividades mineras han sido ampliamente estudiadas y tienen tecnologías

---

<sup>1</sup> Metaloides: varias referencias relacionadas a calidad del agua no hacen la diferencia entre metales y metaloides, solamente lo clasifican dentro de los metales. Los metaloides (también conocidos como semimetales) son aquellos que tienen propiedades intermedias entre los metales y los no metales, por ejemplo: Boro, Silicio, Arsénico, Antimonio. A veces se incluye al Aluminio y el Carbono.



desarrolladas y aplicadas; sin embargo, esta tecnología no es aplicable en zonas rurales donde no se tiene acceso a energía y otras facilidades para el tratamiento; además por la cantidad relativamente pequeña del agua de manantiales comparada con la cantidad de agua ácidas generada por la industria minera. Debido a este problema se buscó evaluar una alternativa de tratamiento mediante el uso de la roca caliza y los filtros multicapas compuestos por arena y grava de diferentes tamaños.

El problema relacionado con aguas ácidas de manantiales es el agua de la JASS Santo domingo del caserío Yun Yun del centro poblado Porcón Bajo que pertenece al departamento de Cajamarca, entonces al inicio del proyecto se planteó el siguiente problema ¿Es factible el tratamiento de aguas ácidas de manantiales mediante la roca caliza y el uso de filtros de multicapas por gravedad?

Para dar solución a este problema se planteó como hipótesis de investigación lo siguiente “si el agua ácida natural entra en contacto con roca caliza y luego es filtrada en un filtro multicapas por gravedad, entonces el agua obtenida disminuye la concentración de metales en comparación con la que ingresa, por lo tanto, cumple los parámetros de calidad de agua para consumo respecto a los metales”.

Para contrastar dicha hipótesis se planteó como objetivo general “evaluar la efectividad del tratamiento de aguas ácida natural de la JASS<sup>2</sup> Santo Domingo

---

<sup>2</sup> JASS (Junta Administradora de Servicios de Saneamiento): Organización comunal elegidas voluntariamente por la comunidad, constituidas con el propósito de administrar, operar y mantener los servicios de saneamiento en uno o más centros poblados del ámbito rural. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2005)

del caserío de Yun Yun del centro poblado Porcón Bajo, con roca caliza y filtración por gravedad”.

El objetivo general conllevó a plantearse como objetivos específicos los siguiente:

- Determinar la cantidad de roca caliza para acondicionar el pH y precipitar los metales.
- Diseñar un Sistema conformado por un Alcalinizador con roca caliza y un filtro multicapas conformado por arena de diferentes tamaños y grava para el tratamiento de agua en sistema continuo.
- Evaluar la remoción de metales al pasar el Sistema conformado por un Alcalinizador con roca caliza y un filtro multicapas.
- Comparar los parámetros de calidad de agua de pH, Conductividad Eléctrica, Turbidez y los metales asignados para consumo humano descritos en el decreto supremo D.S. N° 031-2010-SA ( **Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud , 2011**) así como los metales indicados en los “Estándar de Calidad Ambiental” (ECA) para agua (**MINAM, 2017**) destinada a consumo humano clasificado según la siguiente categorización:

Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable. Entiéndase como aquellas aguas que, previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano y en A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección. Entiéndase como aquellas aguas que, por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser

destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente. **(MINAM, 2017)**

Esta investigación estuvo con un diseño de investigación de tipo experimental, debido que se tuvo como primera variable independiente a manipular la cantidad de roca caliza para aumentar el pH y precipitar los metales presentes en el agua; luego se diseña un filtro multicapas compuesto por arena de grava para retener los metales suspendidos en el agua (metales en forma de precipitados en el agua). El diseño y uso de los filtros multicapas están determinados en diferentes referencias los cuales tienen como principal factor de entrada de diseño el caudal y carga de área superficial. La medición de la efectividad de la roca caliza se realizará mediante el aumento del pH y la disminución de los metales disueltos, y la efectividad de todo el tratamiento es disminuir los metales descritos en el D.S. N° 031-2010-SA ( Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud , 2011)

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Formación de los manantiales

Las aguas que la atmósfera derrama en la superficie de la tierra se divide en dos porciones: una corre, siguiendo las pendientes hasta la mar si la evaporación no lo restituye a la atmósfera; la otra penetra en el suelo. Si este es coherente, el agua se interna poco en él; pero si el suelo esta conformado por capas arenosas o paco coherentes, se infiltra sin dificultad y puede circular libremente en los intersticios y fisuras; y no solo el agua de las lluvias se interna así las capas permeables, sino muchos arroyuelos y ríos [...], y otros quizá pierden de esta manera durante su curso una porción considerable de sus aguas. He aquí el alimento de los manantiales y pozos naturales o artificiales. Si recordamos las leyes del equilibrio de los líquidos concebiremos fácilmente el curso de estas aguas perdidas en las capas permeables. Desde luego es indudable que bajaran verticalmente hasta que algún obstáculo las detenga, y este no puede ser otro que algunas capas de terreno impermeables. Detenida así en su descenso, el agua correrá por la superficie de estas capas según su inclinación. Si la capa permeable tiene hendiduras por ella correrá el agua que seguirá su curso natural por todos estos conductos. Si la capa permeable está contenida en una hoya, cuyos bordes estén levantados por todos los lados, el agua se acumulará en ella, y a veces surgirá por la parte baja de su superficie, formando un lago, un estanque o una laguna, depósitos cuyo nivel acrecerán las lluvias y disminuirá la sequedad. (Paramelle, 1683)

Si la capa queda enteramente contenida en las capas impermeables, formando un pozo y abriendo un hoyo mas o menos profundo en las capas permeables, hasta hallar el depósito. Si la capa permeable en vez de ser

superficial en toda su extensión lo fuese solo por los prodes<sup>3</sup> y que estuviese cubierta por otra impermeable, el agua tendería a acumularse en hoyas naturales, corriendo siempre de las partes mas elevadas a las más bajas; pero se vería retenida a lo menos en parte por la capa impermeable supuesta ejerciendo sobre ella una presión de abajo hacia arriba, en tanto mayor a cuanto bajase la capa impermeable. Un orificio vertical que se abriese en la capa permeable superior formará un pozo, en el cual el agua se elevaría hasta el nivel superior de la capa permeable porque había penetrado; y si la superficie de la capa impermeable estuviese más baja que este nivel, el pozo presentaría un surtidor; y he aquí su mayor sencillez del fenómeno de estos surtidores naturales y de los pozos artesianos. (De Alvarado, 1829, p. 192)

El agua de las lluvias penetra la tierra y discurre entre las arenas y cascajos de las montañas donde encuentran unas grietas o cavidades subterráneas que luego se depositan naturalmente en unas rocas impenetrables al agua, o cubiertas de una capa de arcilla o greda, que la retiene. Esta agua se recoge en estas cavidades y forman debajo de la tierra unos receptáculos o aljibes considerables; luego que se halla alguna salida o paraje que el agua pueda penetrar, rompe por allí arrastrando lo que está a su paso y en algunos casos hace aberturas para salir como manantial o fuente. (De Alvarado, 1829, p. 197)

---

<sup>3</sup> Prodes: Capa porosa estática con facilidad de poder filtrar el agua.

## **2.2. Incorporación de sustancias disueltas en las aguas de los manantiales**

Según Rodríguez García, Martínez Muñoz, Hernandez Vizcaino, de Lucas Veguillas, y Acevedo de Pedro, (2003) describen que “los manantiales son aguas subterráneas que debido a la orografía emergen a la superficie, generalmente en laderas o llanuras, al encontrar las corrientes capas impermeables en los suelos por los que discurren. El agua que se encuentra en la naturaleza no es pura, a través de su paso por el suelo se carga de minerales que le darán sus características peculiares [...]” (Rodríguez García, Martínez Muñoz, Hernandez Vizcaino, de Lucas Veguillas, & Acevedo de Pedro, 2003, p. 424)

En la calidad de las aguas o en su contaminación contribuyen especialmente factores que intervienen en diversas fases del abastecimiento y que en el caso de las fuentes se refieren a la captación y conducción. Estos factores de riesgo contaminante, sin ser directamente responsables de la contaminación, contribuyen con su presencia al aumento de la probabilidad que aparezca dicha contaminación, pudiendo afectar tanto a parámetros fisicoquímicos como microbiológicos, modificándolos y dando lugar a la falta de potabilidad del agua. (Rodríguez García, Martínez Muñoz, Hernandez Vizcaino, de Lucas Veguillas, & Acevedo de Pedro, 2003, p. 424).

La capacidad del suelo para generar ácidos deriva fundamentalmente de la reacción entre el agua y el CO<sub>2</sub> producido en la oxidación de la materia orgánica. respiración vegetal y microbiana, reacciones anaerobias de reducción de sulfatos o nitratos, etc. La reacción del CO<sub>2</sub> con el agua produce ácido carbónico

( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que es consumido en reacciones de ataque a diversos minerales: calcita, albita. etc., mientras haya aporte continuo de  $\text{CO}_2$ . (Babich & Stotzky, 1983, p. 316).

La composición de la roca, aunque muy importante en este sentido, no es determinante en la mineralización del agua subterránea. Pureza, textura, porosidad, grado de fisuración, estructura regional, así como presión, temperatura, tiempo de permanencia y de contacto agua-roca, secuencia en que el agua atraviesa determinados minerales, fenómenos modificadores. etc. pueden tener una influencia decisiva en la adquisición y evolución del quimismo. (Babich & Stotzky, 1983, p. 316).

El tipo de flujo tiene una notable transcendencia en la mineralización del agua subterránea. Aguas con largos recorridos suelen presentar, en igualdad de otras circunstancias, una mayor mineralización que aguas de corta circulación. Aguas recogidas en la zona de recarga de un acuífero suelen tener menos sólidos disueltos que un agua de circulación profunda y menos, también, que el agua de descarga del mismo acuífero. (Babich & Stotzky, 1983, p. 317)

La incorporación de solutos al agua está ligada estrechamente a la meteorización de los materiales de la corteza terrestre. Esta incorporación puede realizarse de forma inmediata por disolución de sales directamente solubles, o tras una serie de transformaciones químico-biológicas previas a la solubilización. (Babich & Stotzky, 1983, p. 317)

Cuando un electrolito se disuelve en agua las moléculas de ésta chocan con las del compuesto, arrancando iones de la red cristalina que, a causa de su carga, se unen a las moléculas polarizadas del agua. Si no existe intercambio de reactantes o productos de reacción con el exterior, se produce una incorporación de iones desde el sólido a la fase líquida y un retorno desde la disolución a la superficie del sólido hasta que las velocidades en los dos sentidos se igualan. Cuando se alcanza esta igualdad el sistema llega a la condición de equilibrio; a partir de ese momento el sistema no estaría sometido de modo natural a cambios de composición química. (Babich & Stotzky, 1983, p. 317)

En contraposición con las sustancias directamente solubles, otras muchas lo son en muy pequeño grado y han de ser transformadas química o biológicamente antes de ser solubilizadas. Entre los procesos de transformación (alteración o meteorización química) los más significativos son:

- Hidratación o incorporación del agua a la red cristalina de los minerales para formar hidratos. El ejemplo típico es la transformación de la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), compacta y relativamente poco soluble en yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), más soluble. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

- Hidrolisis o descomposición de minerales bajo la acción de  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  procedentes de la descomposición del agua. Un ejemplo característico es la ionización de silicatos, relativamente insolubles, que conduce a la solubilización de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  etc, así como a la formación de minerales de la arcilla. El proceso depende



de la disponibilidad de  $H^+$ , tipo de catión existente en la red, área expuesta al ataque, etc. y es más rápido e intenso a bajo pH y elevada temperatura. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

- Oxidación-reducción. Numerosos elementos poseen diversos estados de oxidación a los que van ligadas propiedades características de cambios de solubilidad en el momento de formar compuestos. Reacciones en que se producen cambios en el estado de oxidación pueden facilitar la solubilización de diferentes elementos. Reacciones de este tipo son las de oxidación de sulfuros, reducción de sulfatos, oxidación-reducción de hierro y manganeso, procesos de nitrificación, etc. Aunque los conocimientos sobre el particular son escasos, parece fuera de duda que las bacterias son los agentes catalizadores de gran número de reacciones redox. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

- Variación del pH. Estas variaciones desempeñan un papel importante en procesos de solubilización de diversas sustancias a través de su influencia sobre las condiciones de hidrólisis, procesos redox, fenómenos de adsorción, etc. La disolución de carbonatos y la hidrólisis de silicatos, así como la formación de iones complejos que puede traducirse en marcadas variaciones de solubilidad, están controladas por el rango de pH en que estos procesos se desarrollan. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

- Acciones biológicas. Su interés en el proceso de alteración previo a la puesta en solución de algunos elementos procede de su

capacidad de provocar algunas reacciones a través de cambios de pH, de intervenir como catalizadores disminuyendo la energía de activación de reacciones redox, etc. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

Tanto estos mecanismos como los procesos de modificación del quimismo que se describen a continuación pueden tener lugar en diferentes zonas del acuífero, dependiendo su efectividad de las condiciones locales específicas. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

Una vez incorporados los constituyentes al agua subterránea ésta adquiere una configuración composicional determinada que, sin embargo, no se mantiene invariable durante el recorrido del agua. El grado de modificación de la composición depende del tipo e intensidad de los procesos a que el agua esté sometida de la posible simultaneidad de estos y, más frecuentemente, del orden de actuación de aquéllos en el espacio y en el tiempo. (Babich & Stotzky, 1983, p. 318).

Los fenómenos modificadores más frecuentes se describen brevemente a continuación:

- Intercambio iónico o proceso por el que algunas sustancias cambian iones por los existentes en el agua. Está íntimamente relacionado con procesos de adsorción en arcillas, ciertos óxidos, sustancias orgánicas, etc. En general, los cationes divalentes son más fuertemente adsorbidos que los monovalentes. (Babich & Stotzky, 1983, p. 319).

- Concentración. El aumento de concentración puede producirse tanto por disolución como por hidrólisis, hasta que se alcance el producto de solubilidad de la sal correspondiente. Puede producirse también por evapotranspiración o enfriamiento y por ósmosis. El efecto de la evaporación puede ser muy complejo y conducir a quimismos muy diferentes en función de la composición inicial y de las concentraciones relativas de los elementos disueltos. Los efectos de evaporación y enfriamiento sólo son significativos en acuíferos someros y especialmente en las zonas de recarga o descarga de acuíferos en áreas de clima relativamente árido. (Babich & Stotzky, 1983, p. 319).

- Reducción. En el apartado anterior ya se hizo referencia a los procesos redox. Uno de los más típicos es la reducción de sulfatos a  $S^{2-}$ ,  $S$  ó  $S_2O_3$ , en ambiente reductor bajo acción de bacterias con consumo de  $O_2$ , y producción de  $CO_2$ . En aguas que han sufrido reducción de sulfatos se produce una acusada disminución del contenido en ión  $SO_4^{2-}$ . Otro ejemplo típico es la reducción de nitratos a  $N_2$  ó  $NH_4^+$ . (Babich & Stotzky, 1983, p. 319).

- Temperatura. La temperatura es un parámetro que afecta notablemente a la solubilidad de diferentes sales en el sentido de aumento de solubilidad con el aumento de temperatura. La calcita y la dolomita, en cambio, presentan mayor solubilidad a menor temperatura, lo que puede tener repercusiones en el quimismo del agua subterránea por la influencia del gradiente geotérmico en

acuíferos en que se producen flujos de largo recorrido a profundidades grandes. (Babich & Stotzky, 1983, p. 319).

- Mezclas. Una situación frecuente en la dinámica de las aguas subterráneas es la de mezcla de aguas con diferente contenido iónico. El efecto de ion común puede conducir entonces a la precipitación de ciertas sales como el  $\text{CaCO}_3$ , si se mezcla un agua con concentración en  $\text{CO}_3^{2-}$ ; y  $\text{Ca}^{2+}$  a saturación con otra que haya disuelto yeso ( $\text{SO}_4^{2-}$ ; y  $\text{Ca}^{2+}$ ). Mezclas de aguas en equilibrio con la calcita, pero con diferente presión parcial de  $\text{CO}_2$  pueden producir efectos similares. (Babich & Stotzky, 1983, p. 319).

De lo expuesto con anterioridad se deduce claramente que la composición de las aguas subterráneas naturales representa una situación dinámica cambiante en el espacio y en el tiempo cuya interpretación ha de realizarse teniendo en cuenta la posible interacción de los procesos y fenómenos citados anteriormente sobre una base geológica e hidrogeológica, lo más completa posible.

“El contenido de elementos metálicos de un suelo libre de interferencias humanas, depende en primer grado de la composición de la roca madre originaria y de los procesos erosivos sufridos por los materiales que conforman el mismo.” (Adriano, 1986, p. 533).

### 2.3. Comportamiento de los metales en el ambiente

Una de las principales características es comportarse como especies aceptadoras de electrones gracias a que poseen orbitales atómicos  $d$  donde poder acomodarlos. Ello da lugar a la formación de complejos de coordinación con especies presentes en el medio.

La clasificación de los metales es de tipo A (presenta una configuración electrónica de gas inerte ( $d^0$ )) pertenecen a este grupo los cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos), tipo B (presentan configuraciones  $nd^{10}$  y  $nd^{10}(n+1)s^2$ , y se localizan al lado derecho de la tabla periódica) y metales de transición (tienen configuración electrónica  $nd^x$  ( $0 < x < 10$ )), estos cationes presentan propiedades intermedias con los cationes de tipo A y B).

Dependiendo del tipo de metal que se considere, la solubilidad del elemento en el medio acuoso, que es lo que determina su movilidad en el sistema ambiental, suele ser mínima a un pH intermedio alrededor de la neutralidad. Así el aluminio presenta un mínimo en su actividad a un pH de 7, mientras que esa mínima actividad para el hierro, ocurre a un pH de 8, para el plomo de 10, níquel de 10.5 y cadmio entre 11 y 12.

Un factor importante en cuanto al impacto ambiental de los metales pesados se relaciona con su movilidad. (Doménech, 2014, págs. 19-20)

## **2.4. Toxicidad de los metales en el agua**

Según Rosas (2001) describe que “existen evidencias experimentales que han llegado a demostrar que el grado de importancia biológica de los iones metálicos, de los que algunos son oligoelementos, sigue el mismo patrón que tiene su disponibilidad en la naturaleza (p. 11). Además, existe una aparente correlación entre la abundancia de los metales en la corteza terrestre y las necesidades alimentarias de las células microbianas respecto a los seres vivos. (Wood, 1989, p. 1-12).

## **2.5. Tratamiento del agua con roca caliza**

Cuando los elementos o compuestos químicos que pueden contaminar las aguas se encuentran disueltos, la forma de poder separarlos o removerlos del agua, es mediante la precipitación química, que convierte a los elementos o compuestos solubles, en compuestos insolubles, quedando como sólidos suspendidos. Después de la precipitación los sólidos suspendidos pueden ser removidos directamente por sedimentación o por coagulación -floculación y posterior sedimentación, o por el uso de clarificadores/espesadores, para la separación de los lodos. (Puga, 2012, p. 2)

En el caso de los elementos metálicos, los compuestos que se trata de formar son hidróxidos o sulfuros de estos elementos metálicos, por ser estos hidróxidos y sulfuros, compuestos que presentan bajas solubilidades. (Puga, 2012, p. 2).

Precipitación como hidróxidos: El método más común, usado para remover los iones metálicos solubles en el agua, es precipitar el ión metálico como hidróxido metálico, ya que la mayoría de los iones de metales pesados solubles precipitan fácilmente al elevar el nivel de pH de la solución, formando el compuesto respectivo de hidróxido de metal, con lo cual los compuestos metálicos en solución se convierten en compuestos insolubles y son precipitados en la solución. (Puga, 2012, p. 2).

Para conseguir la formación de hidróxidos de los metales disueltos se necesita un agente alcalino que pueda alcanzar un pH alto, como el caso del hidróxido de calcio (lechada de cal), hidróxido de sodio (soda cáustica), hidróxido de potasio y los demás hidróxidos de metales alcalinos o alcalinotérreos. (Puga, 2012, p. 2).

La cal se usa en forma de lechada para permitir un buen control del pH final deseado, consiguiéndose niveles de pH mayores a 10, pH en el cual precipitan todos los metales pesados. (Puga, 2012, p. 2)

*Tabla 1: Precipitación de distintos hidróxidos metálicos a partir de una solución 0.01 M*

<b>Elemento metálico</b>	<b>Hidróxido trivalente</b>	<b>Hidróxido bivalente</b>
Hierro	2.3	5.5
Cobalto	2.5	6.8
Manganeso	2.5	8.4
Aluminio	4.1	-----
Cobre	---	5.6
Zinc	---	6.5
Níquel	---	6.8
Cadmio	---	10.6

El pH de precipitación teórico es diferente para cada metal, necesiándose en la práctica pHs entre 9.0 y 10.5 para asegurar la precipitación de todos los metales pesados, consiguiéndose concentraciones de dichos metales, por debajo de los LMP. (Puga, 2012, p. 2).

Para los casos del hierro ferroso y el cromo hexavalente, muchas veces es necesario previamente convertirlos a hierro férrico y cromo trivalente, antes de precipitarlos, ya que en estos últimos estados son mucho menos solubles. Para el primer caso se puede usar cloro, aireación o permanganato de potasio, y en el segundo caso se puede usar anhídrido sulfuroso o bisulfito de sodio. (Puga, 2012, p. 2).

Una de las desventajas del uso de la cal en la precipitación química, es el alto volumen de lodos formados y la baja densidad de estos, siendo su mayor ventaja su menor costo. (Puga, 2012, p. 2).

En el caso de los hidróxidos de sodio o amonio se tiene la ventaja de la formación de pocos sólidos, siendo su desventaja su costo. La elección del agente alcalino a usar estará en función del costo de operación y de las facilidades de adquisición y uso de cada uno. (Puga, 2012, p. 3).

En el caso del aluminio uno de los procesos relevantes que ocurren en el suelo cuando se produce acidificación, es la liberación del aluminio presentes en



la fracción mineral del suelo. Estos minerales, especialmente los silicatos minerales, interaccionan con los iones de  $H^+$ , de tal manera que estos iones penetran hasta las capas octaédricas, donde están situados los átomos de Aluminio. Los iones de Aluminio liberado son absorbidos por el silicato en sitios de intercambio, formando el complejo de silicato-Al. De esta manera los iones de aluminio están accesibles a la disolución del suelo, donde pueden movilizarse e hidrolizarse.

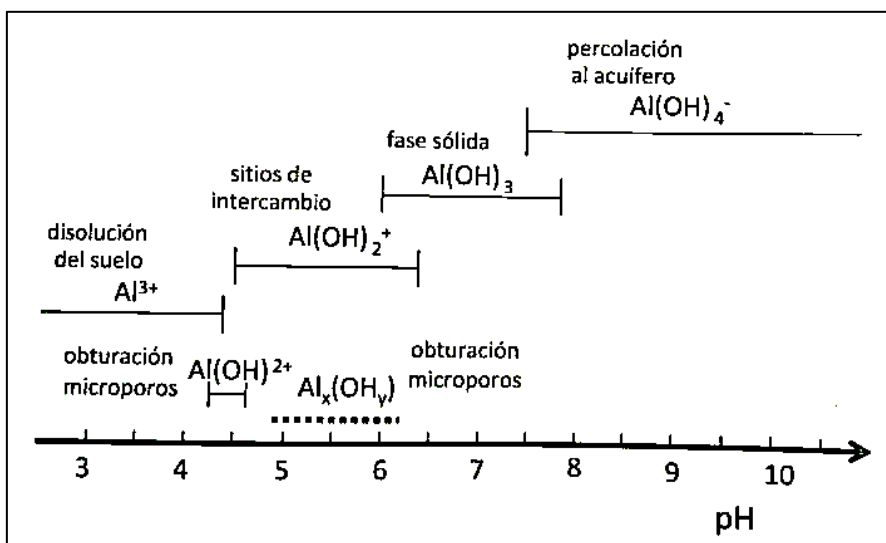


Figura 1. Rangos de pH y predominancia de distintas especies de Aluminio en medio acuoso con indicación más probable en el suelo.  
Fuente: (Doménech, Fundamentos de química ambiental, 2014, pág. 289)}

Como resultado de estos procesos de hidrólisis se generan distintas especies de Al (III), cada una de ellas con un comportamiento ambiental distinto. Así, el ión  $Al(OH)^{2+}$  se adsorbe en los silicatos laminares, y dado su tamaño relativamente bajo y su elevada densidad de carga, penetra en el interior de los microporos, bloqueando los sitios de intercambio. Solamente el catión  $Al(OH)_2^+$  puede ser desplazado de la interlámina al aumentar el pH.

Puede indicarse que el ion  $Al^{3+}$  es preponderante en disolución a un pH inferior aproximado de 5. La especie  $Al(OH)_2^+$  es preponderante en el rango

aproximado de pH comprendido entre 5 y 6; el hidróxido Al (OH)<sub>3</sub> predomina en el rango de pH entre 6 y 7.5, mientras que la especie amoniaca Al (OH)<sub>4</sub>, ocurre en su mayoría a un pH superior a 7.5. (Doménech, 2014, págs. 288-290)

## **2.6. Filtración del agua con filtros multicapas**

La filtración es un proceso físico fundamentado en el paso de una mezcla sólido - fluido (líquido o gas) a través de un medio más o menos poroso, el cual retiene los sólidos permitiendo, por el contrario, el paso del fluido. Las aplicaciones de los procesos de filtración son muy extensas, encontrándose en muchos ámbitos de la actividad humana, tanto en la vida doméstica como de la industria general.

### **La filtración de arena - Un método natural de filtración**

La filtración media consiste en una capa múltiple de la arena con una variedad en tamaño y gravedad específica. La filtración de la arena se utiliza con frecuencia y método muy robusto para separar los sólidos suspendidos del agua.

Los filtros de arena se pueden proveer en diversos tamaños y ambos pueden ser manejados manualmente o de forma totalmente automática.

Aplicaciones para la filtración de arena:

- Preparación en tratamiento de aguas residuales
- Producción de agua potable

- Filtración en piscinas
- Pre-Filtración para sistemas de membrana
- Filtración de agua gris o de superficie

Una aplicación especial del filtro de arena es la separación del hierro en la superficie en el suelo o con el agua limpia. La instalación de la separación del hierro consiste en la aireación, oxidación y precipitación del hierro y el manganeso seguido por una separación de las partículas precipitadas con el filtro de arena. Cuando los filtros se cargan con las partículas, la dirección del flujo es invertida y el volumen del flujo se aumenta para limpiar el filtro de nuevo. El tiempo para la limpieza es determinado por los siguientes criterios: Volumen, Presión de la gota sobre el filtro y Tiempo.

Estos filtros multicapas funcionan como biofiltros debido a que eliminan patógenos presentes en el agua, tal como lo describe CAWST, es una adaptación del filtro de arena lento tradicional que se ha utilizado para el tratamiento de agua para las comunidades por casi 20,000 años. El filtro de bioarena es más pequeño y está adaptado para darle un uso continuo, lo cual lo hace muy apropiado para tenerlo en las casas. El contenedor del filtro puede estar hecho de concreto o plástico, el cual se llena con capas de arena y grava especialmente seleccionada y preparada para este fin. Donde el los noventa, el Dr. David Manz construyó el filtro de bioarena para hogares en la Universidad de Calgary, en Canadá. Desde entonces, se ha dado entrenamiento y capacitación a muchas organizaciones respecto a cómo diseñar, construir, instalar, operar y mantener el filtro de bioarena. El Dr. Manz también es co-fundador de CAWST

y desde el año 2001 ha venido ofreciendo servicios profesionales para la distribución humanitaria del filtro en países en vías de desarrollo. Al mes de junio de 2009, CAWST estima haber implementado más de 200,000 filtros de bioarena en más de 70 países alrededor del mundo. (CAWST, 2009, pág. 2)

### **3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Procedimiento de investigación**

La metodología de investigación se realizó en tres procesos: (1) Caracterización del agua, con lo cual se determina que parámetros cumple con la calidad del agua para consumo humano. (2) Determinar el tiempo de residencia de Alcalinización; esto es necesario para aumentar el pH mediante el uso de piedra caliza, pero que a la vez no exceda de 8.5. (3) Diseño y funcionamiento del Sistema continuo de Alcalinización y Filtración, en base al proceso dos se diseña y construye un Alcalinizador para un caudal específico con un sistema de filtración de multicapas de arena y grava.

##### **3.1.1. Caracterización del agua antes del tratamiento**

La caracterización del agua a tratar se define mediante la determinación de los siguientes parámetros:

- pH
- Conductividad Eléctrica.
- Turbidez.
- Metales Totales.
- Metales Disueltos.

### 3.1.2. Determinación del tiempo de residencia del Alcalinizador

El tiempo de residencia de un Alcalinizador con roca caliza se determinando haciendo uso de un reactor tipo batch, con tres cantidades diferentes de roca caliza y con la misma cantidad de agua, luego se mide el aumento del pH con el tiempo para determinar el mejor tiempo de residencia necesario de tal manera que el pH esté entre 6.5 y 8.5. Considerando como valor de pH “objetivo” a 7.5.

### 3.1.3. Diseño y funcionamiento del Sistema continuo de alcalinización y filtración

En base al pH objetivo y el mejor tiempo de residencia determinado se determina el tamaño del Reactor Alcalinizador para un sistema continuo con su respectivo filtro multicapas, para evaluar si el sistema de tratamiento completo (Alcalinizador y Filtro) es efectivo en la remoción de metales y a la vez se acondiciona el pH.

Una vez que se diseñó el sistema de tratamiento continuo se puso en funcionamiento con un caudal controlado de 500 mL/min, midiendo lo parámetro y frecuencias según la siguiente tabla:

Tabla 2: Frecuencias de medición de parámetros

<b>Parámetro</b>	<b>Entra al Alcalinizador</b>	<b>Salida del Alcalinizador (entrada al filtro)</b>	<b>Salida del filtro</b>
<b>pH</b>	Cada 7 días	Cada 7 días	Cada 7 días
<b>Conductividad Eléctrica</b>	Cada 7 días	Cada 7 días	Cada 7 días
<b>Turbidez</b>	Cada 7 días	Cada 7 días	Cada 7 días
<b>Metales Totales</b>	Cada 14 días	Cada 14 días	Cada 14 días
<b>Metales Disueltos</b>	Cada 14 días	Cada 14 días	Cada 14 días

---

Nota: La evaluación se realizó durante 45 días de funcionamiento, al inicio solamente se midieron los parámetros de pH, conductividad y turbidez hasta que se estabilice el sistema de tratamiento.

---

Al inicio de las pruebas solamente se medía pH, conductividad eléctrica y Turbidez hasta que se estos parámetros no tuvieron una diferencia significativa, es decir se logra la estabilidad del sistema.

### **3.2. Instalación del filtro**

#### **Componentes del filtro de bioarena**



Figura 2: Componentes del filtro de Bioarena (CAWST,2009)

## Funcionamiento del filtro de bioarena

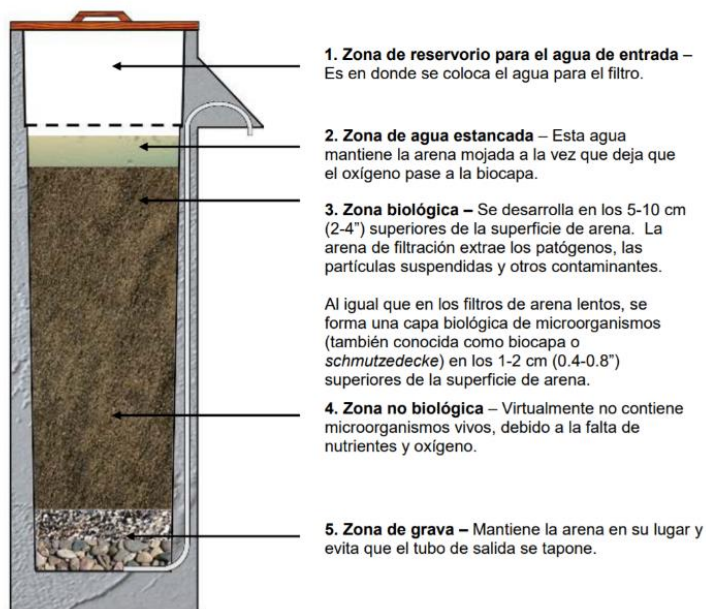


Figura 3: Esquema de funcionamiento del biofiltro (CAWST, 2009)

Los patógenos y los sólidos suspendidos se extraen a través de la combinación de procesos biológicos y químicos que se dan lugar en la



biocapa y dentro de la capa de arena. Estos procesos incluyen: entrapamiento mecánico, depredación, adsorción y muerte natural. (CAWST, 2009, págs. 2-3)

### 3.3. Diseño de investigación

Para la presente investigación se aplicó un diseño experimental, basándonos en lo descrito por Bunge (2004, pág. 678) “el *experimento* es aquella clase de experiencia científica en la cual se *provoca deliberadamente algún cambio* y se observa e interpreta su resultado con alguna *finalidad cognoscitiva*”, para este caso estamos provocando el cambio planificado a la calidad del agua mediante la incorporación de un medio artificial que es el sistema “alcalinización y filtración”. Debido a que la investigación se ha realizado en varios procesos, podemos considerar que para determinar el diseño del “Alcalinizador” correspondería a un diseño experimental a lo definido por (Kerlinger & Lee, 2001, pág. 420) “Un experimento es una investigación científica donde un investigador manipula una o más variables independientes y observa la(s) variable(s) dependiente(s) para determinar si hay variación concomitante a la manipulación de las variables independientes”, por lo tanto al manipular la cantidad de roca caliza y esperando el cambio de pH en función al tiempo determinamos que es de tipo experimental.

Para el proceso en el cual se usa un solo sistema conformado por un “alcalinizador y filtro multicapas” y con un solo tipo de agua (considerando un solo tipo, debido al cambio no significativo en sus características fisicoquímicas respecto al pH, Conductividad Eléctrica y la concentración de metales), como en este caso falta uno o más de los prerrequisitos establecidos para que sea un

experimento puro, el cual requiere la manipulación de por lo menos una variable independiente, entonces estamos en un diseño comprometido, conocido popularmente como cuasi-experimental (Bunge, 2004).

### **3.4. Mediciones**

En la investigación se contó con los equipos calibrados y verificados para las mediciones de pH, Conductividad Eléctrica y Turbidez. Para el caso de la determinación de Metales Totales y Metales Disueltos se envió las muestras al Laboratorio SGS del Perú, el cual está acreditado ante INACAL del Perú en dichos parámetros. Por lo tanto, las mediciones para esta investigación tienen un alto grado de confiabilidad.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización del Agua de Ingreso

Antes realizar el tratamiento del agua se realizó un análisis de la calidad del agua de la JASS Santo Domingo, la cual tuvo los resultados mostrados en la tabla 3:

Tabla 3: Caracterización del agua de la JASS Santo Domingo

Parámetro	Unidades	Reservorio 07/06/2018 14:34	D.S. N°031- 2010-SA	ECA Categoría 1 Subcategoría A1	
Conductividad	µS/cm	38	1500	1500	
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	8.00	≥6	≥6	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unid. de pH	4.30	6.5-8.5	6.5-8.5	
Temperatura	°C	11.1	Δ3	Δ3	
Turbiedad	UNT	0.88	5	5	
Metales		Metales totales	Metales Disueltos		
Aluminio	mg/L	0.681	0.566	0.2	0.9
Antimonio	mg/L	<0.00013	<0.00013	0.02	0.02
Arsénico	mg/L	<0.00010	<0.00010	0.01	0.01
Bario	mg/L	0.0126	0.0117	0.7	0.7
Boro	mg/L	<0.006	<0.006	1.5	2.4
Cadmio	mg/L	<0.00003	<0.00003	0.003	0.003
Cobre	mg/L	0.00133	<0.00009	2	2
Cromo total	mg/L	<0.0003	<0.0003	0.05	0.05
Hierro	mg/L	0.0219	0.0050	0.3	0.3
Manganeso	mg/L	0.00824	0.00821	0.4	0.4
Mercurio	mg/L	<0.00009	<0.00009	0.001	0.001
Molibdeno	mg/L	<0.00006	<0.00006	0.07	0.07
Níquel	mg/L	0.0008	<0.0006	0.02	0.07
Plomo	mg/L	0.0006	0.0006	0.01	0.01
Selenio	mg/L	<0.0013	<0.0013	0.01	0.04
Sodio	mg/L	0.383	0.378	200	
Uranio	mg/L	<0.000010	<0.000010	0.015	0.02
Zinc	mg/L	0.0167	0.0100	3	3

En la tabla 3, podemos observar que los parámetros que no cumplen con la calidad del agua para consumo es el pH que incumple tanto lo indicado en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano - DS N° 031-2010-SA. ( Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud , 2011) y los valores del ECA para agua del DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM (MINAM, 2017); el otro parámetro que incumple es el caso del Aluminio, para lo cual se requiere un tratamiento de remoción de éste elemento. El Aluminio no cumple tanto en el total como en el disuelto, es decir se requiere transformar el Aluminio Disuelto en Aluminio Suspendido (en forma de precipitado) y luego filtrar, con la finalidad de disminuir el Aluminio Total en el Agua.

#### **4.2. Determinación del tiempo de residencia en el tratamiento con roca caliza.**

Para aumentar el pH se colocó el agua en tres vasos de precipitación de 600 mL que contienen 150 g (100 mL volumen aparente), 310 g (200 mL volumen aparente) y 500 g (300 mL de volumen aparente), el agua usada que se adicionó a cada vaso fue de 300 mL. Los resultados se muestran en la tabla 4.

*Tabla 4: Variación del pH del agua en contacto con roca caliza*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>100 mL roca caliza &amp; 300 mL de H<sub>2</sub>O</b>	<b>200 mL roca caliza &amp; 300 mL de H<sub>2</sub>O</b>	<b>300 mL roca caliza &amp; 300 mL de H<sub>2</sub>O</b>
0	4.33	4.35	4.31
5	5.04	5.31	5.56
10	6.11	6.42	6.76
15	6.94	7.31	7.62
20	7.29	7.68	7.92
25	7.48	7.86	8.07
30	7.55	7.93	8.07
35	7.67	8.06	8.09
40	7.71	8.12	8.19

45	7.78	8.18	8.42
50	7.93	8.33	8.56
55	8.04	8.38	8.61
60	8.12	8.42	8.54
120	8.18	8.43	8.63
240	8.23	8.39	8.58
360	8.26	8.36	8.55
480	8.29	8.37	8.69
720	8.32	8.41	8.61
1440	8.34	8.46	8.65

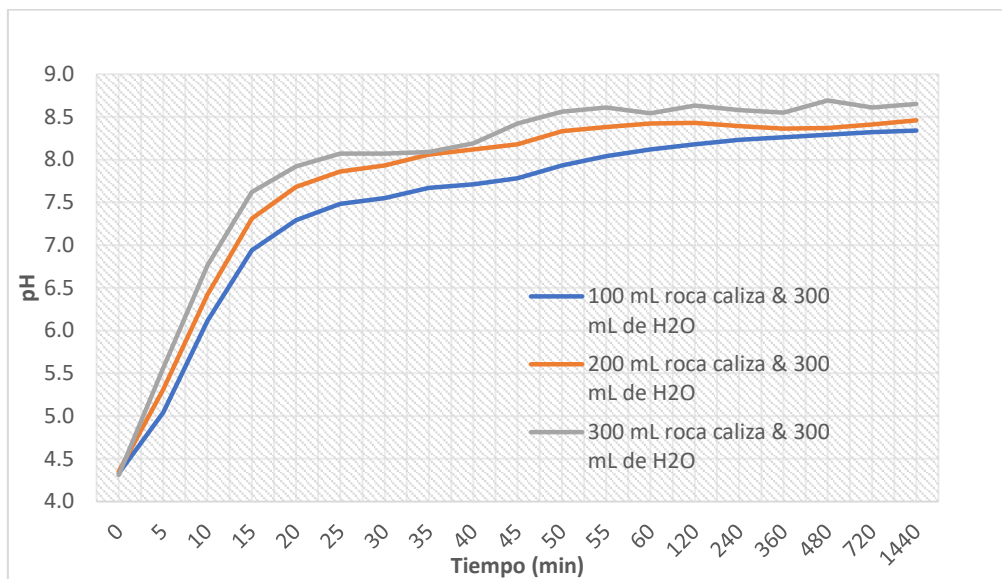


Figura 4: Tendencia del pH del agua en contacto con roca caliza

De acuerdo con la tabla 4 y las figura 4 podemos decir que se logra aumentar el pH con roca caliza, y el tiempo determinado para las relaciones de piedra caliza y agua, tenemos como tiempo mínimo 15 minutos para un pH de 7 para la relación mínimo de 100 mL roca con 300 mL agua y 13 minutos para una relación de 200 mL roca con 300 mL agua y 11 minutos para. En la figura 4 se observa que desde los 20 minutos en adelante, en las tres pruebas, empieza a amortiguar el pH acentuándose entre 8 y 9; lo importante de esta tendencia es que no sobrepasa el valor de 9, y específicamente no sobrepasa de 8.5 para las

relaciones de volúmenes de roca: agua de 100:300 y 200:300 a partir de las cuales determinaremos el tiempo de residencia, según la figura 5.

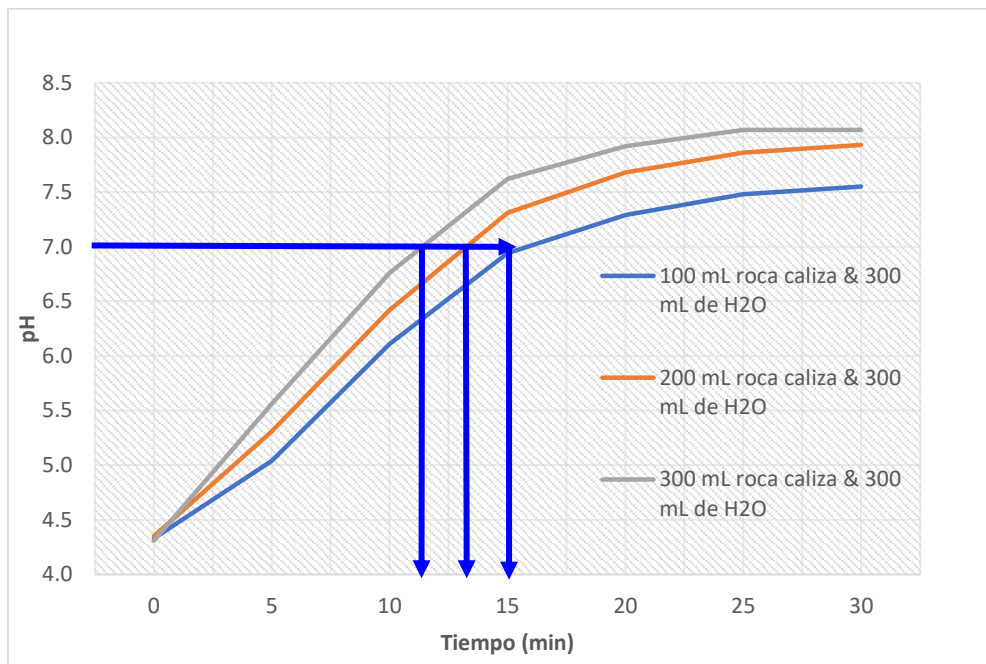


Figura 5: Determinación del tiempo de residencia para la alcalinización

Según la figura 5, podemos decir que se logra aumentar el pH con roca caliza, y el tiempo determinado para las relaciones de piedra caliza y agua, tenemos como tiempo mínimo 15 minutos para un pH de 7 para la relación mínima de 100 mL roca con 300 mL agua y 13 minutos para una relación de 200 mL roca con 300 mL agua y 11 minutos para. El tiempo recomendado sería de 15 minutos el de relación volumétrica entre roca y agua de 100:300, debido a que se usaría menor y a la vez tiene un amortiguamiento sin pasar de pH 8.5, tal como se muestra en la figura 6.

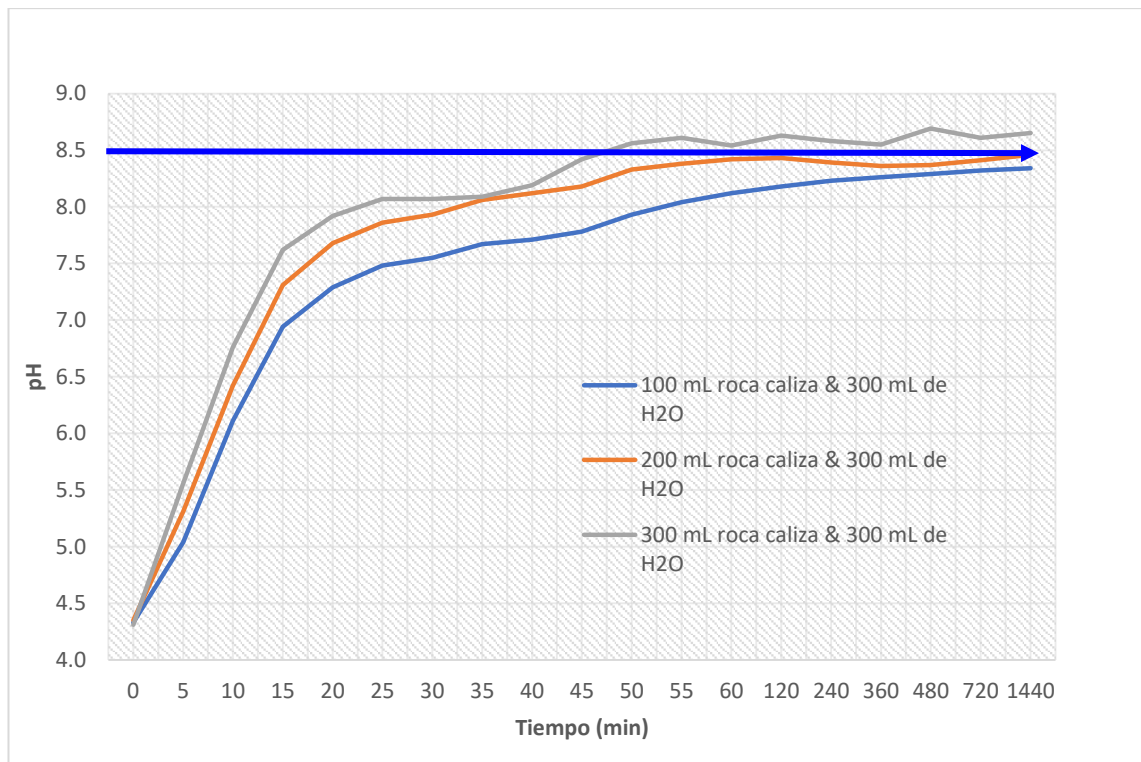


Figura 6: Evaluación de amortiguamiento de tendencias de amortiguamiento a pH 8.5

De todo este análisis podemos decir que el tiempo de residencia determinado es de 15 minutos para una relación volumétrica de 100:300, la densidad aparente de la roca caliza es de 1.5 kg/L, lo cual podemos decir que la relación entre el peso de la roca con volumen de agua es de 1.5 kg por 3 Litros de agua a tratar.

#### 4.3. Tratamiento en sistema continuo conformado por un Alcalinizador y el Filtro multicapas.

Debido a que el elemento que incumple los parámetros de calidad es el cual se evalúa su remoción respectiva. Los resultados se obtenidos se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados de Aluminio en el sistema de tratamiento continuo

Total		Día 14	Día 28	Día 42	Promedio	Desvest.
Aluminio Ingreso	mg/L	0.665	0.706	0.659	0.677	0.026
Aluminio Intermedio	mg/L	0.914	0.888	0.978	0.927	0.046
Aluminio Salida	mg/L	0.119	0.123	0.109	0.117	0.007
Disuelto		Día 14	Día 28	Día 42	Promedio	Desvest.
Aluminio Ingreso	mg/L	0.565	0.563	0.616	0.581	0.030
Aluminio Intermedio	mg/L	0.089	0.082	0.076	0.082	0.007
Aluminio Salida	mg/L	0.084	0.067	0.065	0.072	0.010

De acuerdo con estos resultados podemos ver que el Aluminio ha disminuido y a la vez cumple con los estándares de calidad de agua para consumo de humano. Si bien luego del contacto con piedra caliza aumenta el Aluminio Total, pero el disuelto disminuye en los tres días de monitoreo, el Aluminio Suspendido (diferencia entre total y disuelto) queda en el filtro multicapas, lo cual indica que el sistema continuo es efectivo para el tratamiento de agua del manantial de la JASS Santo Domingo.

Durante el desarrollo de las pruebas se midieron otros parámetros como son el pH, la turbidez y la conductividad, dichos resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: pH, Turbidez y Conductividad del sistema continuo de tratamiento del agua

Potencial de Hidrógeno		Día 1	Día 14	Día 28	Día 42	Promedio	Desvest
pH Ingreso	mg/L	4.30	4.35	4.56	4.36	4.393	0.115
pH Intermedio	mg/L	7.19	7.22	7.26	7.13	7.200	0.055
pH Salida	mg/L	7.16	7.26	7.14	7.08	7.160	0.075
Turbidez (NTU)		Día 1	Día 14	Día 28	Día 42	Promedio	Desvest
Turbidez Ingreso	mg/L	0.88	0.73	0.79	0.84	0.810	0.065
Turbidez Intermedio	mg/L	5.34	5.31	5.23	5.48	5.340	0.104
Turbidez Salida	mg/L	1.4	0.81	0.75	0.78	0.935	0.311
Turbidez Salida*	mg/L		0.81	0.75	0.78	0.780	0.030
Conductividad (uS/cm)		Día 1	Día 14	Día 28	Día 42	Promedio	Desvest
Conductividad Ingreso	mg/L	38	42	45	41	41.500	2.887



Conductividad Intermedio	mg/L	36	47	45	41	42.250	4.856
Conductividad Salida	mg/L	51	56	49	44	50.000	4.967

\* No se considera el valor del primer día debido a que el sistema no ha llegado a su condición estable.

Según la tabla 6, podemos ver que el pH de operación en el ingreso es de 4.39 en promedio con una desviación estándar de 0.115 lo cual se puede considerar con baja variabilidad; luego de que el agua pasa por el alcalinizadro alcanza un pH de 7.20 con una desviación estándar de 0.055 y posterior a la filtración el pH es de 7.16 con una desviación estándar de 0.075. Se puede decir que el pH antes y después de la filtración no varía y está dentro de los valores esperados.

La turbidez aumenta al entrar en contacto con la piedra caliza, de 0.81 NTU a 5.34 NTU lo cual nos indica la necesidad de realizar la filtración, luego del filtrado obtenemos una turbidez de 0.78 NTU, lo cual indica que hay una efectiva separación de sólidos suspendidos, cumpliendo la calidad del agua en función a la turbidez esperada. Para la evaluación de la Turbidez no se considera el valor del día 1, debido a que el sistema no alcanzaba la estabilidad de operación.

Respecto a la conductividad podemos ver que existe un pequeño incremento en relación la inicial pero que no es de consideración significativa, el cambio es de 41.5 a 50.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión general podemos decir que el agua si es efectivo el tratamiento del agua ácida natural de la JASS Santo domingo del caserío de Yun Yun del centro poblado Porcón Bajo, con roca caliza y filtración por gravedad, debido a que se acondiciona el pH a valores entre 6.5 y 8.5, y el Aluminio disminuye de 0.677 a 0.117 mg/L.

El tiempo de residencia para el tratamiento con roca caliza es de 15 minutos, con una relación de 100 mL de roca caliza (volumen aparente) para un volumen de 300 mL de agua.

Al diseñar un sistema continuo se demostró que es efectivo para el tratamiento de agua de la JASS Santo domingo del caserío de Yun Yun del centro poblado Porcón Bajo, cumpliendo en los estándares de calidad tanto los descritos por DIGESA como los ECA para agua. En el sistema continuo se demostró que el agua al entrar en contacto con la roca caliza aumenta la turbidez de 0.81 a 5.34 NTU, por lo cual es necesario la filtración con lo cual nos dio una turbidez final de 0.78. La conductividad ha aumentado de 41 uS/cm a 50.0 uS/cm que se puede considerar como un aumento insignificante.

Por lo tanto, podemos decir que el agua ácida natural al entrar en contacto con roca caliza y luego ser filtrada en un filtro multicapas por gravedad, disminuye la concentración de metales en comparación con la que ingresa y a la vez se acondiciona el pH a los valores entre 6.5 y 8.5.

Las recomendaciones para futuras investigaciones es evaluar la remoción del aire en los filtros, debido a que se obstruyen, pero no por los sólidos sino por el aire que se inserta dentro del filtro.

Así mismo al momento de iniciar el acondicionamiento del filtro, este debe hacer una investigación relacionado a los materiales del sistema de filtración, en la presente investigación no se ha modificado los parámetros recomendados en las referencias respectivas.

## 6. REFERENCIAS

- Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud . (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano - DS N° 031-2010-SA*. (Primera ed.). Lima: Biblioteca Central del Ministerio de Salud. Obtenido de <http://www.minsa.gob.pe/webftp.asp?ruta=normaslegales/2010/DS031-2010-SA.pdf>
- Adriano, D. (1986). *Trace elements in the terrestrel environmental*. New York: Springer Verlag.
- Babich, H., & Stotzky, G. (1983). *Physicochemical factors of natural reservoirs affect the transformation and exchange of heavy metals toxic to microbes*. New York: Environ Biogeochem.
- Bunge, M. (2004). *La investigación científica - Su estrategia y filosofía* (Tercera ed.). México D.F., México: Siglo XXI Editores.
- CAWST. (2009). Manual para el filtro de bioarena . CAWST, 2-62.
- De Alvarado, D. (1829). *Principios de Física y Astronomía*. Madrid: Impresor de Camara S.M.
- Doménech , X. (2014). *Fundamentos de química ambiental* (Vol. I). Madrid: SINTESIS S.A.
- Doménech, X. (2014). *Fundamentos de química ambiental* (Vol. II). Madrid: SÍNTESIS S.A.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta ed.). México: Mc Graw Hill.
- Kerlinger, F., & Lee, H. (2001). *Investigación del Comportamiento* (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- MINAM. (2017). *DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM "Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias"*. Lima: El Peruano.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (1 de Diciembre de 2005). TEXTO ÚNICO ORDENADO DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO, LEY N° 26338. DECRETO SUPREMO N° 023-2005-VIVIENDA. *El Peruano*, pág. 305323. Obtenido de [https://www.sunass.gob.pe/normas/ds023\\_2005vi.pdf](https://www.sunass.gob.pe/normas/ds023_2005vi.pdf)
- Paramelle, E. (1683). *Arte de descubrir los manantiales*. (D. Soldevila y Calvo, Trad.) Madrid: T. Fortanet. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=wutCnujLCcMC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Popper, K. (2001). *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Editorial Tecnos.
- Puga Bullón, J. (2012). *Tratamiento de aguas en la industria minero metalurgicas*. Lima.
- Rodríguez Garcia, R., Martínez Muñoz, C., Hernandez Vizcaino, D., de Lucas Veguillas, J., & Acevedo de Pedro, L. (2003). Calidad del Agua de Fuentes de Manantial en la Zona Básica de Salud Sigüenza. *Esp Salud Pública*, 77(3°), 424.

Rosas Rodríguez, H. (2001). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat*. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

Wood, J. (1989). *Transport, bioaccumulation and toxicity of elements in microorganisms under environmental stress*. In *Proc Int Conf Heavy Metals in the Environment*, Geneva. P. Vernet (ed) CEP Consultants Ltd, Edinburgh, UK.