

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS

**“TRATAMIENTO DE LA DUREZA DE LAS AGUAS UTILIZANDO UN FILTRO
CON ESPESOR VARIABLE DE ZEOLITA-2019”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
HIDRÁULICO**

PRESENTADO POR:

Bach. JOSÉ CRISTIAN ADOLFO CHÁVEZ MARRUFO

ASESOR:

Dr. Ing. GASPAR V. MENDEZ CRUZ

Cajamarca - Perú

-2021-

DEDICATORIA

A mi madre, Graciela del Pilar Marrufo Altamirano.

A mi padre, José Chávez Olivares.

A mis hermanos Junior, Arturo y Joselvis.

A mi hija, Alessia María Graciela.

A mi esposa, Marilú Gutiérrez Bautista.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	3
2.2. BASES TEÓRICAS	3
A. El agua.....	3
B. Tratamiento de aguas para el consumo humano	4
C. Filtración.....	5
D. Dureza de aguas	7
E. Intercambio iónico	8
F. Zeolita.....	16
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	22
a. Ablandamiento de agua	22
b. Agua cruda	22
c. Agua dura	22
d. Agua potable.....	23
e. Eficiencia.....	23
f. Medio de filtro	23
g. Zonas rurales.....	23
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1. Equipos y materiales.....	24
2.2. Procedimiento.....	24
a. Construcción de estructura metálica	25
b. Filtro en vidrio.....	26
c. Análisis granulométrico de zeolita	26
d. Colocación de zeolita en el filtro	28
e. Activación de zeolita	30
f. Regulación de caudales.....	31
g. Muestreo	32
h. Análisis de laboratorio.....	33
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1. Resultados y discusión	35
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45

4.1. Conclusiones	45
4.2. Recomendaciones	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS.....	49
ANEXO 1. CALCULO DE LA CANTIDAD DE CLORURO DE SODIO PARA LA ACTIVACIÓN DE LA ZEOLITA DE ACUERDO A LOS ESPESORES DE CADA FILTRO.....	49
ANEXO 2. PANEL FOTOGRÁFICO	52
ANEXO 3. RESULTADOS DE LABORATORIO.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Granulometría de la capa soporte	7
Tabla 2: Orden de selectividad decreciente de los iones en resinas de intercambio iónico, a igual concentración de la especie en solución.	10
Tabla 3: Clasificación del grado de dureza en el agua	12
Tabla 4: Clasificación del grado de dureza en el agua, según OMS	13
Tabla 5: Análisis granulométrico.....	27
Tabla 6: Codificación de espesores de filtro.....	28
Tabla 7: Codificación de muestras.....	32
Tabla 8: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C1	35
Tabla 9: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C1	36
Tabla 10: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C2.....	37
Tabla 11: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C2.....	37
Tabla 12: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C3	38
Tabla 13: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C3	39
Tabla 14: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C4.....	40
Tabla 15: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C4	41
Tabla 16: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C5.....	42
Tabla 17: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C5	43
Tabla 18: Comparativa de eficiencia del filtro con espesor E5 con las concentraciones utilizadas.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Problemas causados por la alta dureza del agua. Aunque el exceso de sales de calcio, magnesio y otros metales no representa daños a la salud, si causa grandes inconvenientes en el uso del agua.....	9
Figura 2: resina de intercambio iónico en ciclo sodio, en proceso de suavización del agua y durante el paso de regeneración de la capacidad de intercambio de la resina.....	10
Figura 3: Tanque con resinas de intercambio iónico en ciclo sodio, para ablandamiento del agua, al intercambiar sodio por otros cationes, cuando fluye el agua y se pone en contacto con la resina.	14
Figura 4: Secuencia en la regeneración de la resina en ciclo sodio con una solución concentrada de salmuera.....	15
Figura 5: Construcción de la estructura metálica.....	25
Figura 6: Colocación del tanque de polietileno sobre la estructura metálica.....	25
Figura 7: Filtro en vidrio.....	26
Figura 8: Tamizado de la zeolita.....	27
Figura 9: Curva granulométrica de la zeolita.....	28
Figura 10: Filtro de zeolita de 3 cm.	29
Figura 11: Filtro de zeolita de 6 cm.....	29
Figura 12: Filtro de zeolita de 9 cm.	29
Figura 13: Filtro de zeolita de 12 cm.	29
Figura 14: Filtro de zeolita de 15 cm.	29
Figura 15: Preparación de salmuera.....	30
Figura 16: Vertimiento de salmuera a los filtros.....	30
Figura 17: Filtros con salmuera.....	31
Figura 18: Regulación caudal de ingreso.....	31
Figura 19: Regulación caudal de salida.....	32
Figura 20: Titulación de muestra de agua filtrada.....	34
Figura 21: Resultado de reducción de dureza C1.....	36
Figura 22: Resultado de reducción de dureza C2.....	38
Figura 23: Resultado de reducción de dureza C3.....	40
Figura 24: Resultado de reducción de dureza C4.....	42
Figura 25: Resultado de reducción de dureza C5.....	43
Figura 26: Resultados en el filtro de espesor E5.....	44
Figura 27: Material para filtro tamizado.....	52

Figura 28: Filtro construido en vidrio	52
Figura 29: Colocación de los filtros en sus respectivos soportes.....	52
Figura 30: Prueba de hermeticidad y buen funcionamiento de los filtros.....	53
Figura 31: Colocación y medición de espesor del lecho filtrante	53
Figura 32: Sal utilizada para la activación de zeolita.....	53
Figura 33: Pesaje de la cantidad de sal a utilizar en la activación de zeolita	54
Figura 34: Mezcla y disolución de la sal en agua	54
Figura 35: Vertimiento de salmuera en el filtro de zeolita	54
Figura 36: Material filtrante sumergido en una solución de salmuera.....	55
Figura 37: Regulación y medición del caudal entrante al filtro de zeolita.....	55
Figura 38: Regulación y medición del caudal saliente del filtro de zeolita	55
Figura 39: Toma de muestra de agua sin tratar	56
Figura 40: Toma de muestra de agua tratada a la salida del filtro.....	56
Figura 41: Muestras para análisis en laboratorio	56
Figura 42: Análisis de dureza en el laboratorio.....	57

RESUMEN

En nuestro Perú se opta por captar aguas de manantiales, pero no se toma mucho en cuenta la caracterización química de la misma como por ejemplo el parámetro de la dureza, lo cual esto conlleva a que en algunos casos las tuberías se obstruyan debido a las altas concentraciones de carbonatos en el agua. Se tubo la hipótesis que con un filtro de zeolita se puede reducir la dureza del agua en más de un 50%, por lo tanto, el objetivo de esta tesis es determinar la reducción de la dureza del agua que consume una población rural utilizando un filtro de zeolita; para ello se hizo pasar agua con diferentes durezas (C1, C2, C3, C4 y C5) a través de filtros de zeolita de diferentes espesores (E1, E2, E3, E4 y E5) para determinar la reducción de dureza y saber cuál de estos espesores es más eficiente.

Todos los espesores disminuyen las durezas del agua, pero ninguno de los resultados logro superar el 50 % de reducción de dureza y el resultado más sobresaliente que se obtuvo fue al pasar el agua con dureza C1 a través del filtro con espesor E5 reduciendo la dureza de 218 mg/l a 175.6 mg/l, esta reducción equivale a un 19.45% colocando así al espesor E5 como es más eficiente de todos.

Palabras Claves: dureza, eficiencia, espesores, filtro, salmuera, zeolita.

ABSTRACT

In our Peru, it is chosen to capture water from springs, but the chemical characterization of it is not taken into account, such as the hardness parameter, which leads to the fact that in some cases the pipes become clogged due to high carbonate concentrations in water. It was hypothesized that with a zeolite filter the hardness of the water can be reduced by more than 50%, therefore the objective of this thesis is to determine the reduction of the hardness of the water consumed by a rural population using a filter of zeolite; For this, water with different hardnesses (C1, C2, C3, C4 and C5) was passed through zeolite filters of different thicknesses (E1, E2, E3, E4 and E5) to determine the reduction in hardness and to know which of these thicknesses is more efficient.

All the thicknesses reduce the hardness of the water, but none of the results managed to exceed 50% reduction in hardness and the most outstanding result that was obtained was when the water with C1 hardness passed through the E5 thickness filter, reducing the hardness of 218 mg / l to 175.6 mg / l, this reduction is equivalent to 19.45%, thus placing the E5 thickness as the most efficient of all.

Keywords: hardness, efficiency, thicknesses, filter, brine, zeolite.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El agua potable es indispensable en la vida de los seres humanos, ya que permite su sostenibilidad en el tiempo, pero para que cumpla ese objetivo, entre otras condiciones debe cumplir con ciertas características de calidad, cantidad y oportunidad.

A nivel nacional y en forma específica en la zona de nuestra serranía, por una serie de consideraciones se ha optado por captar las aguas de manantiales, para poder responder a la demanda de agua por una población, pero por lo general en los expedientes técnicos de un proyecto de agua potable, se han centrado más en la parte de la cantidad y del diseño estructural, y muy poco en su caracterización química del agua, teniendo entre otros lo que corresponde a la concentración de la dureza.

Como sabemos la dureza en las fuentes de agua, se debe a la concentración de carbonatos, los cuales tienen presencia por el contacto del agua con formaciones rocosas ricas en carbonato. El Perú geomorfológicamente tiene una gran diversidad de zonas rocosas carbonatadas; y éstos al estar en contacto con el agua, generan alteraciones en su concentración de carbonatos resultando por ello aguas duras, que son captadas para dar respuesta a la demanda de suministro de agua en las zonas rurales.

Pero no basta solo con captar el agua y distribuirla, se tiene que tener muy en cuenta su caracterización química, ya que algunas veces debido a la alta concentración de carbonatos en el agua se llegan a obstruir las tuberías de conducción resultando esto en un gran problema.

Por tal motivo se tomó la iniciativa de investigar la reducción de la dureza mediante el tratamiento del agua con un filtro de zeolita; en las tesis denominadas: “Diseño de un sistema de tratamiento para la potabilización del agua en la parroquia San Andrés del Cantón Guano, provincia de Chimborazo” y “Diseño de un sistema de tratamiento de agua potable para la parroquia

San Isidro del Cantón Guano”, se ha utilizado la zeolita como filtro para su diseño; es por ello que se espera que con los datos obtenidos del porcentaje de reducción obtenidos en esta investigación, talvez se pueda implementar este filtro compuesto por zeolita en aquellas zonas rurales donde existen afloramientos de agua con altas concentraciones de carbonatos y así evitar que las tuberías se obstruyan.

Entonces conociendo el problema en forma general la utilización de zeolita como medio filtrante para el tratamiento de la dureza del agua (disminución de concentración de carbonatos) está plenamente justificado debido a su bajo costo de adquisición y también a la ventaja de que al filtro se le puede hacer un retro lavado con salmuera y volver a utilizarlo una y otra vez.

Por ello hizo la pregunta ¿Cuánto es la reducción de la dureza del agua, que consume una población rural, utilizando un filtro de zeolita?. Por lo cual nuestra hipótesis fue que con el filtro de zeolita se puede reducir la dureza del agua en más de un 50% con respecto a dureza inicial y el objetivo principal de esta tesis fue determinar la reducción de la dureza del agua, que consume una población rural, utilizando un filtro de zeolita. Para lo cual se determinó la reducción de la dureza de agua utilizando un filtro con espesores de 3 cm., 6 cm., 9 cm., 12 cm. y 15 cm. de zeolita y se determinó cuál de estos espesores es más eficiente reduciendo la dureza del agua.

El Capítulo II contiene los antecedentes y bases teóricas en los que se basa esta tesis. El Capítulo III contiene los materiales que se utilizaron y la metodología que se siguió para la obtención de datos. El Capítulo IV contiene los resultados obtenidos después de realizado el proceso de tratamiento del agua. El Capítulo V contiene las conclusiones y las recomendaciones de la tesis.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Esta investigación tiene como estudio precedente la tesis denominada: Diseño de un sistema de tratamiento para la potabilización del agua en la parroquia San Andrés del Cantón Guano, provincia de Chimborazo la cual se desarrolló en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador por el entonces Bachiller Pablo Serafin Valdivieso Sánchez en el año 2013; esta tesis propuso como material filtrante la zeolita y para ello realizo pruebas de tratabilidad del agua en laboratorio utilizando un volumen de 50 ml de agua de muestra y 25 gr de zeolita con una granulometría de 1-3mm, logrando reducir la dureza del agua de 390 mg/l a 48 mg/l.

Otro precedente también tenemos la tesis denomina: Diseño de un sistema de tratamiento de agua potable para la parroquia San Isidro del Cantón Guano la cual también se desarrolló en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador por la entonces Bachiller Clara Isabel Ruiz Sánchez también en el año 2013; esta tesis también propuso como material filtrante la zeolita y para ello también realizo pruebas de tratabilidad del agua en laboratorio utilizando un volumen de 60 ml de agua de muestra y 25 gr de zeolita con una granulometría de 1-3mm, logrando reducir la dureza del agua de 504 mg/l a 55 mg/l.

El objetivo de estas tesis fue como sus mismos títulos lo dicen diseñar un sistema de tratamiento de agua para una futura construcción e implementación en el cual se incluyen medios filtrantes compuestos por zeolita.

2.2. BASES TEÓRICAS

A. El agua

El agua es un componente de nuestra naturaleza que ha estado presente en la Tierra desde hace más de 3,000 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta.

Alrededor del 98%, corresponde a agua salada que se encuentra en mares y océanos, el agua dulce que poseemos en un 69% corresponde a agua atrapada en glaciares y nieves, un 30% está constituido por aguas subterráneas y una cantidad no superior al 0,7% se encuentra en forma de ríos y lagos. El agua es una molécula simple y extraña, puede ser considerada como el líquido de la vida. Es la sustancia más abundante en la biosfera, donde la encontramos en sus tres estados y es además el componente mayoritario de los seres vivos, pues entre el 65 y el 95% del peso de la mayor parte de las formas vivas es agua. El agua fue además el soporte donde surgió la vida. Posee un extraño comportamiento, que la convierte en una sustancia diferente a la mayoría de los líquidos, manifiesta extraordinarias propiedades físicas y químicas que van a ser responsables de su importancia biológica. Durante la evolución de la vida, los organismos se han adaptado al ambiente acuoso y han desarrollado sistemas que les permiten aprovechar las propiedades del agua (LOARTE y SANABRIA 2015).

B. Tratamiento de aguas para el consumo humano

El tratamiento de aguas se conoce como la forma más antigua que el ser humano ha conseguido para eliminar los residuos y mejorar la calidad en cuanto a olor, color, sabor y apariencia. Si hacemos un poco de historia, el agua se trataba con métodos muy sencillos como hirviéndola, exponiéndola al sol, sedimentándola o filtrándola a través de arena o grava para purificarla. Como lo muestra el siguiente esquema ilustrativo:

En la actualidad, las técnicas de uso general para el tratamiento de aguas residuales y de abastecimiento para consumo humano se complementan con procesos físicos, químicos o biológicos.

Tratamientos Físicos: son los que no generan sustancias nuevas, sino que concentran los contaminantes al evaporar el agua o filtran los sólidos de tamaño considerable. Los más comunes son:

- Filtración
- Adsorción
- Aereación
- Floculación
- Clarificación o sedimentación

Tratamientos químicos: de este proceso resultan nuevas sustancias, los más comunes son:

- Coagulación
- Desinfección
- Ablandamiento
- Oxidación

Tratamientos biológicos: se usan en este proceso organismos vivos para provocar cambios químicos (puede ser visto como tratamiento químico):

- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia

Estos tratamientos tienen lugar en lo que se conoce como planta de tratamiento, cuya finalidad es acondicionar el agua para el consumo humano (Salamanca 2016).

C. Filtración

Es el proceso, mediante el cual el agua fluye lentamente atravesando un lecho de medios granulares, que suelen ser de arena, carbón antracita o granate. Cuando el agua logra

atravesar el medio, las partículas quedan atrapadas debido a que existen varios mecanismos: intercepción, floculación, colado y sedimentación. Las partículas más densas son retenidas como el espagueti en un colador.

Esas partículas simplemente son demasiado grandes para pasar por los poros del medio, y quedan atrapadas en las capas superiores del filtro (suponiendo que el flujo sea de arriba hacia abajo). Las partículas que fluyen a una velocidad lo suficientemente baja son “interceptadas” y fijadas al medio filtrante por débiles fuerzas electroestáticas.

Si el agua se trata químicamente antes de ser filtrada puede haber floculación adicional, lo que permite que las partículas crezcan de modo que las mayores se puedan eliminar por los demás mecanismos. Las partículas densas se asientan y separan sobre el medio filtrante (Mackense y Susen 2005).

a. Filtro lento

La filtración lenta en arena es un tipo de sistema de purificación de agua centralizado o semicentralizado. Un filtro de arena lento bien diseñado y debidamente mantenido elimina eficazmente la turbiedad y los organismos patógenos a través de diversos procesos biológicos, físicos y químicos en un único paso de tratamiento. Según la OMS, este es un método simple pero altamente efectivo y considerablemente asequible que puede contribuir a un sistema sostenible de gestión del agua, bastante prometedor para comunidades rurales pequeñas y medianas que tengan una calidad buena de la fuente de agua superficial inicial. (<https://sswm.info/> 2020).

Lecho filtrante

El medio filtrante debe estar compuesto por granos de arena duros y redondeados, libres de arcilla y materia orgánica. La arena no debe contener más de 2% de carbonato de calcio y magnesio. Experimentalmente se ha encontrado que el diámetro efectivo de la arena debe

ser del orden de 0.15 a 0.35mm. La profundidad del lecho puede variar entre 0.50 y 1.00 m, pudiendo el filtro operar con un espesor mínimo de 0.30 m. El coeficiente de uniformidad puede ser menor de 3.0, se recomienda un rango de 1.8 a 2.0. En última instancia, cualquier material inerte puede utilizarse como medio filtrante.

La capa soporte debe reunir características similares a las indicadas para la arena. Debe considerarse una altura mínima de 0.30 m de grava dispuesta en tres capas de diferente granulometría. La grava más fina debe seleccionarse, teniendo en cuenta el tamaño de los granos de arena y la más gruesa de acuerdo al tamaño de los orificios del drenaje. La tabla 1 sintetiza las recomendaciones al respecto, indicando para cada capa límites máximos y mínimos para arenas finas y gruesas (Blacio Ordoñez y Palacios Perez 2011).

Tabla 1: Granulometría de la capa soporte

Capas	Diámetros mínimos (mm)	Diámetros máximos (mm)	Altura (cm)
1	0.5 – 2.0	1.5 – 4.0	5
2	2.0 – 2.5	4.0 – 15.0	5
3	5.0 – 20.0	10.0 – 40.0	10

Fuente: FILTROS BIOLÓGICOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA, POSIBILIDADES DE USO DE FLA (FILTROS LENTOS DE ARENA) CON AGUA SUPERFICIAL DE NUESTRA REGIÓN, Blacio Ordoñez y Palacios Perez 2011

D. Dureza de aguas

La dureza del agua es uno de los parámetros para calificar la calidad del agua. Las aguas duras son aquellas que provienen de fuentes con carbonatos de Ca y de Mg. Tienen la propiedad de acumular sarro en las cañerías e inhiben la capacidad del jabón de hacer espuma: el jabón “se corta” (precipita), con lo cual el lavado es deficiente (Aldabe, Aramendia, Bonazzola y Lacreu 2004)

El termino dureza se refiere a la concentración total de iones alcalinotérreos (Grupo 2) que hay en el agua. Como la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , de ordinario, es mucho mayor que

la de otros iones alcalinotérreos, la dureza prácticamente es igual a $[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$ (Harris 2007).

La dureza del agua es consecuencia del contacto con los suelos y rocas, en particular la piedra caliza, en presencia de CO_2 (Heinke, Henry y Escalona 1999)

E. Intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga de un fluido (<http://tesis.uson.mx/> 2019).

Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H^+) y/o el ion hidroxilo (OH^-) respectivamente (Manahan 2007).

La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión; éste último factor está en función de la dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina (GRÁGEDA ZEGARRA y GRÁGEDA ZEGARRA 2006).

a. Resinas intercambiadoras de iones

En ocasiones es necesario remover o separar del agua ciertos componentes no deseables, y en otros usos se requiere remover el total de sales disueltas en el agua. Como ejemplo del primer caso, un agua con un alto contenido de calcio y magnesio (o dureza), deberá ser tratada para disminuir este contenido de dureza a valores tolerables, para su empleo en usos específicos donde el exceso de dureza es indeseable (Rocha Castro 2010).



Figura 1: Problemas causados por la alta dureza del agua. Aunque el exceso de sales de calcio, magnesio y otros metales no representa daños a la salud, si causa grandes inconvenientes en el uso del agua.

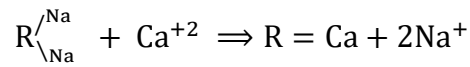
Fuente: Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas, Rocha Castro 2010

Las resinas de intercambio iónico son pequeñas sustancias granuladas o esféricas insolubles en agua (GRÁGEDA ZEGARRA y GRÁGEDA ZEGARRA 2006), los cuales pueden reaccionar como ácidos, bases o sales teniendo la habilidad de migrar sus cationes o aniones por medio de una reacción química; estas resinas tienen la ventaja que pueden recuperar su capacidad original al ser tratados con una solución ácido, base o sal permitiendo que pueda ser utilizada una y otra vez.

b. Cinética y equilibrio del intercambio iónico

Una reacción de intercambio iónico es aquella en la cual un átomo o una molécula que han ganado o perdido un electrón, y que por lo tanto adquiere una carga positiva o negativa, se intercambia por otra partícula de igual signo, pero de naturaleza diferente. Esta última partícula inicialmente está ligada a la superficie de un cuerpo sólido inerte y pasa a solución y su lugar es ocupado por otra partícula que queda retenida (temporalmente) en la superficie del polímero o soporte. Este soporte sólido puede ser una zeolita natural o un polímero sintético, aunque en la actualidad por su mayor capacidad de intercambio y menor costo,

casi siempre se emplea una resina sintética. Una reacción de intercambio en una resina puede ser representada de la siguiente manera:



R es la fase estacionaria o soporte (el copolímero de divinilbenceno) y Na^+ y Ca^{+2} son las especies que reaccionan.

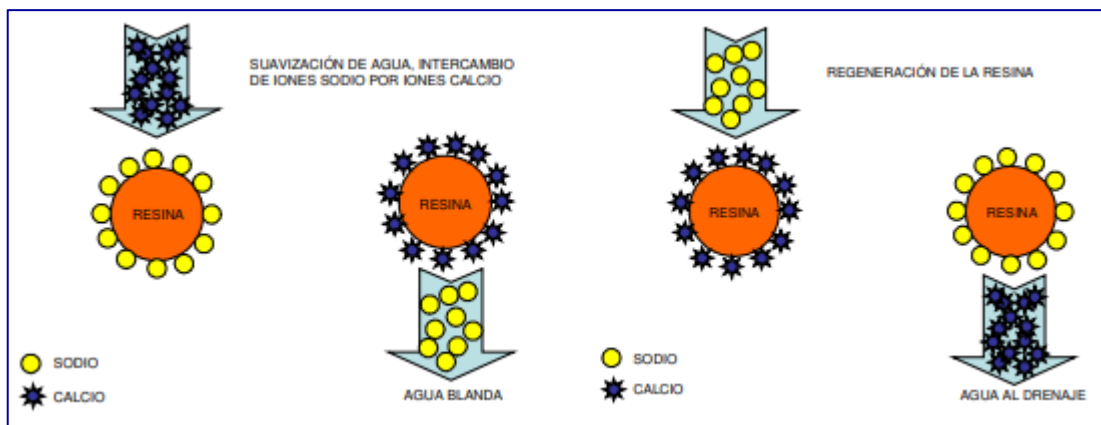


Figura 2: resina de intercambio iónico en ciclo sodio, en proceso de suavización del agua y durante el paso de regeneración de la capacidad de intercambio de la resina
Fuente: Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas, Rocha Castro 2010

En la práctica o en el "mundo real", los iones que se adhieren a los sitios activos de la resina son de muy diferente tipo y pueden ser removidos total o parcialmente durante el proceso de regeneración. Si la naturaleza o la concentración de los iones en solución son similares, el orden de preferencia o la selectividad de la resina para los diferentes iones es la que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Orden de selectividad decreciente de los iones en resinas de intercambio iónico, a igual concentración de la especie en solución.

CATIÓN	ANIÓN
Fierro Fe^{+3}	Cromato CrO_4^{-2}
Aluminio Al^{+3}	Sulfato SO_4^{-2}
Plomo Pb^{+2}	Sulfito SO_3^{-2}
Bario Ba^{+2}	HPO_4^{-2}
Estroncio Sr^{+2}	CNS^-
Cadmio Cd^{+2}	CON^-
Níquel Ni^{+2}	Nitrato NO_3^-
Zinc Zn^{+2}	Nitrito NO_2^-

Cobre Cu^{+2}	Yoduro I^-
Fierro Fe^{+2}	Bromuro Br^-
Manganeso Mn^{+2}	Cloruro Cl^-
Calcio Ca^{+2}	Cianuro CN^-
Magnesio Mg^{+2}	Bicarbonato HCO_3^-
Potasio K^+	HSiO_3^-
Amonio NH^+	Hidróxido OH^-
Sodio Na^+	Fluoruro F^-
Hidrógeno H^+	
Litio Li^+	

Fuente: Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas, Rocha Castro 2010

c. Aplicaciones de las resinas intercambiadoras en acondicionamiento de aguas

Ablandamiento o suavización: Una de las principales aplicaciones de las resinas intercambiadoras de iones es para el ablandamiento o suavización de las aguas de proceso. El término "dureza" se refiere a la dificultad que se tiene en aguas con alto contenido de calcio y magnesio para producir espuma en el jabón. El calcio y el magnesio forman estearatos de calcio y de magnesio que impiden que el jabón disuelva las grasas de suciedad en la ropa, por lo que desde hace años se clasificó como aguas duras (difíciles, problemáticas), las que presentan este problema.

La dureza es causa de los siguientes problemas:

- a) Desagradable sensación de resequeza en la piel y en el cabello después de un baño con esta agua o después de usarla continuamente.
- b) La ropa lavada con un agua de alta dureza, tiene apariencia desagradable al tacto y a la vista.

Una clasificación de dureza y contenido de ésta en miligramos por litro de CaCO_3 (mg/l) es la que se presenta en la Tabla 3 y Tabla 4.

También, la formación de precipitados de calcio y magnesio en platos, tazas, vasos, cuchillería y demás utensilios de cocina la hacen objetable.

- c) Aumento en el consumo de jabón debido a que el calcio y el magnesio que causan la dureza reaccionan con el jabón produciendo estearatos de calcio y de magnesio los cuales son insolubles en el agua y precipitan como tales.
- d) Las tuberías se obstruyen en un tiempo más corto de lo normal, debido a la formación de depósitos de sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio principalmente. En ocasiones esta oclusión es tan persistente que es más conveniente cambiar toda la tubería que limpiar ésta, con el consiguiente gasto que involucra dicha situación. Aún y cuando no se llegue a tales extremos, los depósitos de sarro en líneas y tuberías de por ejemplo una casa habitación son indeseables.
- e) Si un agua de alta dureza es utilizada sin un tratamiento previo en: calderas, humidificadores, sistemas de enfriamiento, intercambiadores de calor, calentadores de agua domésticos, etc. seguramente se formarán depósitos o incrustaciones en el equipo.

Debido a que la conductividad térmica de los depósitos de calcio y magnesio es sumamente baja, para calentar el agua se requiere de cantidades excesivas de calor, el metal se sobrecalienta y se desgasta prematuramente por fatiga mecánica.

Estas son las razones por las cuales es conveniente disminuir la dureza a valores aceptables.

El proceso de ablandamiento generalmente es por medio de precipitación química o por medio del uso de resinas intercambiadoras de iones en ciclo sódico (Rocha Castro 2010).

Tabla 3: Clasificación del grado de dureza en el agua

Característica	Concentración mg/l
Blanda	0 – 75
Moderadamente dura	75 – 150
Dura	150 – 300
Muy dura	> 300

Fuente: Ministerio de Salud

Tabla 4: Clasificación del grado de dureza en el agua, según OMS

Característica	Concentración mg/l
Blanda	0 – 60
Moderadamente dura	61 – 120
Dura	121 – 180
Muy dura	> 180

Fuente: Organización Mundial de la Salud

La aceptación de la dureza del agua por el público puede ser muy variable y está en función de las condiciones locales. El umbral de sabor del ion calcio es 100 a 300 mg/L y el umbral de sabor del magnesio es menor al del calcio, en concentraciones de 200 mg/L puede causar incrustaciones. En algunos casos, los consumidores toleran una dureza de más de 500 mg/L (<http://www.digesa.minsa.gob.pe> 2019).

d. Resinas intercambiadoras en ciclo sódico

Las resinas intercambiadoras de iones son hoy en día ampliamente utilizadas en el ablandamiento de aguas. Como ya se ha mencionado anteriormente, éstas consisten de esferas de polímeros de polivinilbenceno las cuales tienen terminales de grupos sulfónicos. Estos son grupos funcionales que tienen capacidad de intercambio, donde se pueden fijar especies químicas tales como H^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , etc.

Cuando se pone en contacto una solución que contiene como cationes H^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+ , los cationes serán removidos selectivamente en orden a su relación tamaño/carga del ión (Tabla I), así como en función de la concentración del catión. La selectividad aumenta a medida que disminuye la relación-tamaño/carga y también se incrementa con la concentración de la especie.

Si la resina está en contacto con una solución de igual concentración (igual normalidad) de iones Ca^{+2} , Mg^{+2} , y Na^+ , el orden de selectividad es $Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^+$ y de esta forma el calcio y el magnesio serán removidos antes que el sodio.

En una resina intercambiadora de iones en ciclo sódico, las terminales activas de las esferas de PVB (Polivinilbenceno) tienen grupos sodio, los cuales se intercambian por los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , en ese orden. El agua que ha estado en contacto con la resina ya no tiene cantidades apreciables de calcio y magnesio y se dice que el agua es blanda. (Rocha Castro 2010).

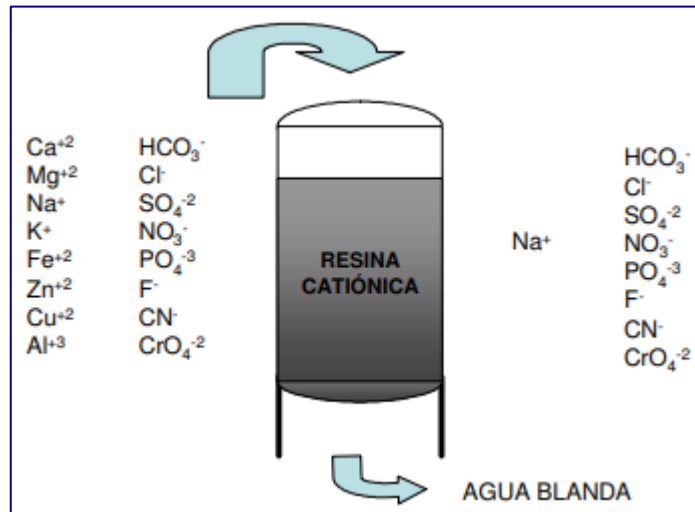


Figura 3: Tanque con resinas de intercambio iónico en ciclo sodio, para ablandamiento del agua, al intercambiar sodio por otros cationes, cuando fluye el agua y se pone en contacto con la resina.

Fuente: Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas, Rocha Castro 2010

e. Regeneración de la resina

Después de que la resina se encuentra saturada (con el calcio y el magnesio que ha removido del agua ya tratada), es necesario regenerar esta. Para esto se efectúan las siguientes operaciones (Figura 4)

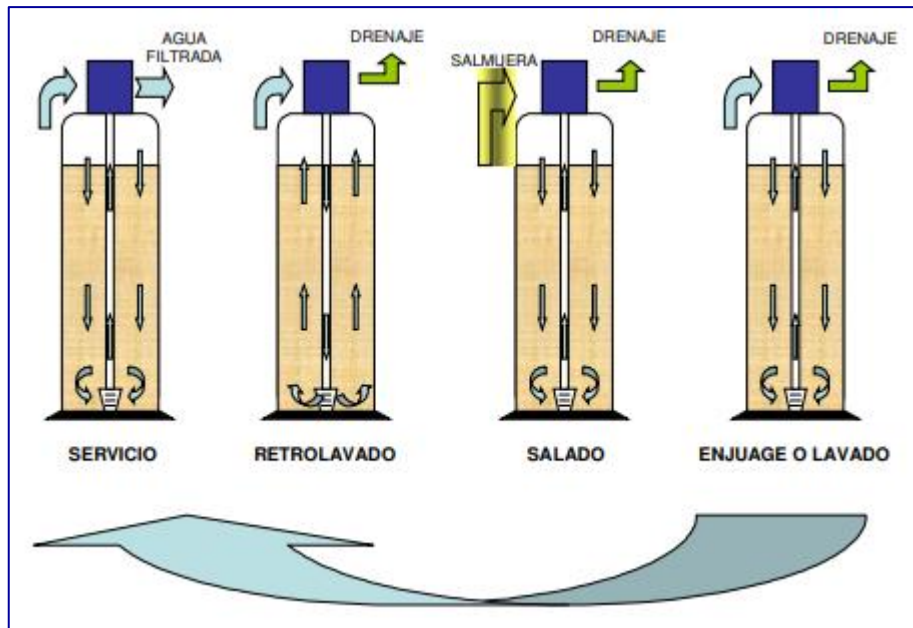


Figura 4: Secuencia en la regeneración de la resina en ciclo sodio con una solución concentrada de salmuera.

Fuente: Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas, Rocha Castro 2010

RETROLAVADO: En el retrolavado se hace circular el agua de alimentación al filtro, de abajo hacia arriba, al contrario de como circula normalmente cuando el filtro está en operación. Esta agua de retrolavado sale por la parte superior del filtro y es desechada. El retrolavado tiene la finalidad de redistribuir el lecho o cama de resina y evitar que esta se compacte, formando canalizaciones en el agua que fluye, y disminuyendo con esto la eficiencia y capacidad del filtro.

SALADO: Después del retrolavado se hace circular una solución de sal a través del lecho de resina. Para esto se prepara una solución de sal en agua y se hace circular en el filtro, fluyendo esta solución de arriba hacia abajo. La cantidad de sal empleada es de aproximadamente 5 Kg. de sal de grano por cada pie cúbico de resina en el filtro (aprox. 180 gr por litro de resina). Esta sal se disuelve en la cantidad de agua que sea suficiente para su disolución completa y se vierte en el filtro, o se agrega directamente a éste y se disuelve la sal agregando agua al recipiente.

La solución de sal o la sal entera, se puede hacer pasar por el filtro abriendo este por la parte superior vertiendo la sal o solución salina, o también a través de una válvula de paso. En caso de que el volumen de salmuera sea considerable, es conveniente inyectar esta salmuera por medio de una bomba.

En cualquiera de los dos casos la solución tiene contacto con la resina y ésta es regenerada. Con esto la resina regresa a su condición original y es capaz de remover nuevamente la dureza de un cierto volumen de agua que pase por el filtro. Durante el salado el agua que fluye y sale por la parte inferior del filtro es desechada hacia el drenaje.

LAVADO: El lavado tiene como finalidad eliminar toda la solución de salado, que tiene una alta concentración de dureza (calcio y magnesio), para esto se hace fluir agua de alimentación (el agua que entra al filtro para tratamiento) de arriba hacia abajo, es decir, en la forma normal de operación del filtro, y el agua de lavado es desechada hacia el drenaje. Al término de la operación la resina y el filtro están listos para su operación normal. (Rocha Castro 2010).

F. Zeolita

La zeolita es un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, caracterizados por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, intercambian cationes como Ca^+ , Mg^{++} , K^+ y NH_4^+ , así como diversos compuestos de fosfatos, amonio y componentes de la materia orgánica. Posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando una amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la adsorción de humedad (Chica Toro 2006).

El descubrimiento de zeolitas naturales data de 1756, cuando el geólogo A. Cronstedt observó que ciertos minerales, como la estilbita, al ser calentados fundían y hervían al mismo tiempo, por lo que se les denominó zeolitas (del griego “zeo” hervir y “lithos” piedra). Pronto se observó que estos minerales eran capaces de intercambiar sus iones metálicos en disoluciones acuosas y que, una vez anhidros, podían adsorber selectivamente distintos compuestos. Por todo ello también se les llamaron tamices moleculares (Mc Bain 1932).

a. Génesis

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros, tal como en las ocurrencias hidrotermales, o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas (Jiexiang 1993).

Se pueden encontrar yacimientos de zeolitas en una variedad de regiones del mundo, donde ha ocurrido una actividad volcánica prehistórica cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones (Bustillos Yaguana y Suin Arévalo 2014).

b. Características

Las Zeolitas son sólidos cristalinos con estructuras compuestas de silicio, aluminio y oxígeno. Son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalinoterrosos, predominando los metales sodio y calcio.

Las zeolitas naturales presentan, como características relevantes, una estructura microporosa, cavidades de dimensiones moleculares de 8 a 10 angstrom y canales internos, donde los cationes, agua y/o moléculas pequeñas pueden alojarse, lo que le confiere propiedades adsorbentes y una gran capacidad de intercambio catiónico (CIC) debido a que se produce un desequilibrio en las cargas.

Los iones grandes y las moléculas de agua contenidas en las zeolitas poseen una libertad de movimiento tal que permite que se produzca dicha capacidad de intercambio catiónico, el mismo que es una función de la relación Si y Al. Las zeolitas poseen densidades específicas en el rango de 1,9 a 2,8 y durezas entre 3 y 6 en la escala de Mohs.

Muchas de las zeolitas, que se encuentran de forma natural como minerales, son altamente explotadas en muchas partes del mundo, dado su gran uso en la industria y en la medicina. Se conocen como tamices moleculares (Baerlocher, McCusker y Olson 2007).

c. Propiedades de las zeolitas.

Las propiedades más relevantes de las zeolitas naturales son: porosidad, adsorción e intercambio iónico.

- Porosidad

Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Sing et al. 1985). Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos.

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando

una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas) (Curi, Granda, Lima y Sousa 2006).

- *Adsorción*

La adsorción es un proceso en el cual los átomos, iones o moléculas de la superficie de un sólido atraen y retienen las moléculas de otros compuestos mediante fuerzas de atracción de Van Der Waals. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que ésta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye, se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro y, por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (Curi, Granda, Lima y Sousa 2006).

- *Intercambio iónico*

La capacidad de intercambio iónico de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química. (Breck, 1974) Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. (Curi, Granda, Lima y Sousa 2006). La Capacidad de intercambio iónico teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles (Breck 1974).

d. Aplicaciones de las zeolitas

Las zeolitas naturales son un medio filtrante nuevo y muy bueno disponible para la filtración del agua. Ofrece un funcionamiento superior a los filtros de arena y carbón, con una calidad

más pura y mayores tasas de rendimiento sin necesidad de altos requisitos de mantenimiento. Tiene muchas ventajas sobre la arena y puede ser directamente reemplazado por la arena en un filtro normal de arena.

Existen tres usos de zeolitas en industria: catálisis, separación de gas e intercambiador de iones.

Catálisis: Las zeolitas son extremadamente útiles como catalizadores para procesos industriales de refinación, petroquímica y química fina. Entre las que se destacan: el craqueo, la isomerización y la síntesis de hidrocarburos. El reemplazo de catalizadores convencionales por zeolitas en numerosos procesos es debido a las mejoras en la actividad y la selectividad. Estas pueden promover una serie de reacciones catalíticas, incluyendo ácido-base y reacciones de metal inducido. Las zeolitas también pueden usarse como soporte para metales activos o reactivos.

Absorción: Las zeolitas se usan para la absorción de una gran variedad de materiales. Esto incluye aplicaciones en secado, purificación y separación. Poseen una gran capacidad de absorción, la cual depende del volumen y el diámetro de los poros. Una propiedad de las zeolitas es su capacidad para la separación de gases. La estructura porosa de las mismas puede utilizarse como "tamiz" para moléculas con un cierto tamaño permitiendo su entrada en los poros.

Intercambio de iones: Cationes hidratados dentro de los poros de la zeolita están unidos débilmente y preparados para intercambiarse con otros cationes cuando se encuentran en un medio acuoso. Esta propiedad permite su aplicación como ablandadores de agua, y el uso de zeolitas en detergentes y jabones, así como también se ha aprovechado de utilizar a ciertas zeolitas como soporte de fertilizantes, drogas medicinales y desechos radiactivos (www.lenntech.es 2019).

e. Tratamiento de aguas

El uso más amplio de la zeolita en la industria se aplica al tratamiento de agua. La zeolita sustituye medios filtrantes convencionales como arena y antracita, debido a que por su estructura porosa permite filtrar partículas hasta 5 micras de tamaño, a comparación de los medios filtrantes convencionales que filtran partículas hasta 15micras. Asimismo, se emplea para reducción de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales, municipales e industriales, así como para albercas, brindando agua con una claridad y calidad superior. La zeolita también se utiliza como ablandador de agua. Para esto se aprovecha la propiedad de intercambio iónico. Esta es una técnica que permite intercambiar iones entre un líquido y un sólido, llamado resina que puede ser la zeolita. Hay dos tipos de resina: resina catiónica y resina aniónica. Las resinas de intercambio iónico poseen un radical fijo y un ión móvil o ión de sustitución. El ión móvil es el ión que es intercambiado por iones que desean eliminarse de la solución y este intercambio sólo funciona entre iones de igual carga eléctrica: cationes por cationes y aniones por aniones. Para ablandar el agua se puede usar zeolitas, que intercambiarán los iones sodio por los iones del agua; los iones sodio no hacen al agua dura, ya que no forman sarro.

Para regenerar la zeolita, se pasa una solución salina, de tal forma que la zeolita recupere los iones perdidos y pueda usarse nuevamente. Así ésta puede usarse varias veces antes de que deba desecharse (<https://es.scribd.com> 2018).

f. Ventajas de la zeolita

- Reduce un poco la acidez del agua.
- Se requiere una menor cantidad de producto respecto a la arena silica por la porosidad y densidad.
- Posee una mayor superficie y porosidad.

- Produce una mayor claridad en el agua filtrada.
- La zeolita es el medio filtrante más durable (más de 5 años).
- La zeolita solo requiere de un simple retro lavado periódico para mantener su eficiencia y su desempeño.
- La zeolita tiene una capacidad de flujo 4 veces superior a la de los medios filtrantes convencionales.
- La zeolita Incrementa el flujo en equipos con multimedia y sistemas de gravedad y presión comparado con los filtros de arena (Larrea Vargas 2015).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

a. Ablandamiento de agua

El ablandamiento del agua es un proceso que quita la dureza, causada por la presencia de iones metálicos divalentes, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} (Heinke, Henry y Escalona 1999).

b. Agua cruda

Agua no sometida a ningún tipo de tratamiento, y susceptible de ser potabilizada (<http://www.siss.gob.cl/> 2018).

c. Agua dura

Agua que contiene un gran número de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes. El jabón generalmente se disuelve malamente en las aguas duras (<http://www.lenntech.es/> 2018).

d. Agua potable

Agua que es segura para beber y para cocinar. Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos (olor, sabor y percepción visual), físicos, químicos y microbiológicos, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud (<http://www.infoiarna.org.gt/> 2018).

e. Eficiencia

La palabra eficiencia proviene del latín «efficientia» que puede aludir a «completar», «acción», «fuerza» o «producción». La eficiencia es la capacidad de hacer las cosas bien, la eficiencia comprende y un sistema de pasos e instrucciones con los que se puede garantizar calidad en el producto final de cualquier tarea. La eficiencia depende de la calidad humana o motora de los agentes que realizan la labor a realizar, para expedir un producto de calidad, es necesario comprender todos los ángulos desde donde es visto, a fin de satisfacer todas las necesidades que el producto pueda ofrecer (Concepto Definición 2020).

f. Medio de filtro

Materiales permeables que separan sólido de líquido haciéndolo pasar por él (<http://www.quiminet.com/> 2019).

g. Zonas rurales

Las zonas rurales comprenden asentamientos humanos de menos de 10.000 habitantes y en el espacio rural predominan las granjas, los bosques, los ríos y lagos, las montañas o el desierto.

Lo característico de esas regiones es que su población depende de la agricultura; en su condición de campesinos, pastores nómadas o pescadores se ocupan de la cría de animales, la transformación y comercialización de alimentos y otros productos y servicios derivados del agro (<http://www.unesco.org/> 2018).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Equipos y materiales

- Tanque de Polietileno de 1100 litros
- Estructura metálica para soporte de tanque
- Filtro, en vidrio
- Zeolita con diámetro de 2 – 4 mm.
- Computadora portátil marca Qosmio Toshiba
- Wincha
- Balanza de mano
- Agua

2.2. Procedimiento

La metodología que se utilizó para la elaboración de esta tesis es netamente experimental, por lo cual se basó en remover los carbonatos que se puedan encontrar en cualquier manantial de agua subterránea y que sirven de fuente de abastecimiento para alguna población sin que ello pueda perjudicar a futuro sus redes de tuberías debido a las concentraciones de carbonatos que dan la caracterización de la dureza en las aguas, en nuestro caso el agua utilizada para esta tesis provino del manantial denominado Huaca Cerro ubicado en la zona de Cuchunga y pertenece a la Jass Samanacruz parte Alta la cual abastece al barrio de Samanacruz en Cajamarca; para lo cual se hizo pasar agua con 5 diferentes concentraciones de carbonatos a través de 5 filtros compuestos por zeolita de diversos espesores y recolectando 5 muestras a la salida de cada filtro, obteniendo así 125 muestras no probabilísticas a las cuales se les realizó un análisis cualitativo y cuantitativo.

a. Construcción de estructura metálica

Esta estructura metálica servirá como soporte para la colocación de un tanque de polietileno de 1100 litros en el cual estará el agua con cierta dureza la cual va hacer tratada, para ello se compró una plancha de acero estrellada de 1/8, tubos cuadrados de 2x2x2 y se lo mando a construir.



Figura 5: Construcción de la estructura metálica



Figura 6: Colocación del tanque de polietileno sobre la estructura metálica

b. Filtro en vidrio

Es una caja de vidrio construida de 0.3 x 0.4 x 0.4 m. la cual contendrá el medio filtrante que será la zeolita, también cuenta con una lámina de vidrio con muchos orificios de aproximadamente 3mm por donde pasara el agua a un falso fondo para luego salir por un orificio que tiene en uno de sus lados a través de una llave de paso.



Figura 7: Filtro en vidrio

c. Análisis granulométrico de zeolita

Se realizó el análisis granulométrico de la zeolita, primero realizando el tamizado del material para luego obtener el cuadro de porcentajes que pasa a través de los tamices y la curva granulométrica.



Figura 8: Tamizado de la zeolita

Tabla 5: Análisis granulométrico

N TAMIZ"	FAC MALLA mm	PESO PARCIAL gr.	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
1/2	12.7	0	0.000	0.000	100.000
3/8	9.52	0	0.000	0.000	100.000
4	4.75	539.20	10.784	10.784	89.216
6	3.36	1669.00	33.380	44.164	55.836
8	2.38	1314.10	26.282	70.446	29.554
10	2	830.70	16.614	87.060	12.940
20	0.84	390.20	7.804	94.864	5.136
40	0.42	132.50	2.650	97.514	2.486
60	0.25	89.90	1.798	99.312	0.688
80	0.17	19.70	0.394	99.706	0.294
100	0.14	8.30	0.166	99.872	0.128
200	0.074	3.70	0.074	99.946	0.054
FONDO		2.70	0.054	100.000	0.000
TOTAL		5000.00	100.000		

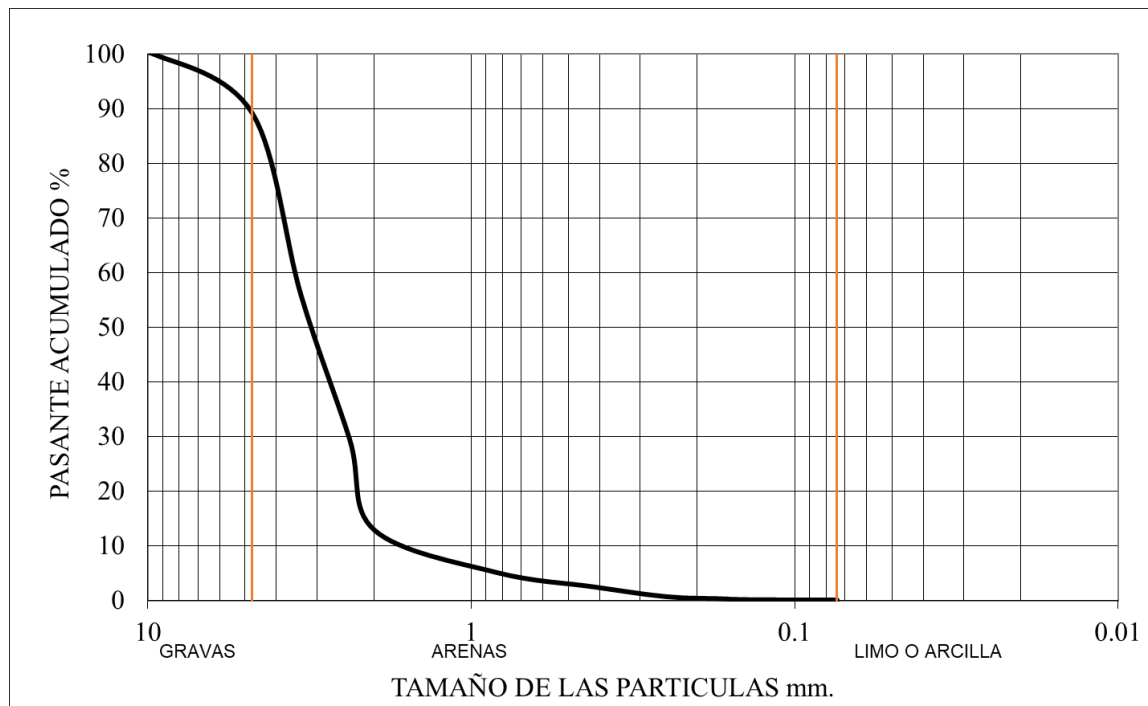


Figura 9: Curva granulométrica de la zeolita

d. Colocación de zeolita en el filtro

Se procedió a colocar el material filtrante (zeolita) tomando como granulometría de 2 – 4 mm de acuerdo a la Tabla 1, el material fue traída de la provincia de Arequipa, en cada uno de los filtros los cuales tendrán un espesor diferente para así poder determinar cuál de estos espesores tiene mayor eficiencia en la reducción de la dureza en el agua. Los espesores que se determinaron para usar son: 3 cm, 6 cm, 9 cm, 12 cm y 15 cm.

Tabla 6: Codificación de espesores de filtro

CODIFICACIÓN	ESPESOR
E1	3 cm.
E2	6 cm.
E3	9 cm.
E4	12 cm.
E5	15 cm.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 10: Filtro de zeolita de 3 cm.



Figura 11: Filtro de zeolita de 6 cm.



Figura 12: Filtro de zeolita de 9 cm.



Figura 13: Filtro de zeolita de 12 cm.



Figura 14: Filtro de zeolita de 15 cm.

e. Activación de zeolita

Para la activación de nuestra zeolita se preparó una salmuera, mezcla de agua con sal, la cual se deja que reaccione con la zeolita durante un periodo de 12 horas para que el material se llene de iones sodio, después de este tiempo al material se le hace un lavado con agua, con ello la zeolita esta lista para ser utilizada como medio filtrante.



Figura 15: Preparación de salmuera



Figura 16: Vertimiento de salmuera a los filtros



Figura 17: Filtros con salmuera

f. Regulación de caudales

Antes de tomar cualquier muestra para llevar al laboratorio se creyó coherente regular los caudales tanto de ingreso como de salida para que así el flujo de agua sea constante en todo momento durante el proceso de filtración. El caudal que se tomó en cuenta para esta tesis es de 0.10 l/s.



Figura 18: Regulación caudal de ingreso



Figura 19: Regulación caudal de salida

Cabe mencionar que para cada toma de muestra se tiene que tener en cuenta tanto el caudal de ingreso como de salida para así poder tener todas las muestras estén en las mismas circunstancias.

g. Muestreo

Para la toma de muestras se consideró una muestra base a la cual se le denominó C1 la cual proviene del manantial denominado Huaca Cerro ubicado en la zona de Cuchunga y pertenece a la Jass Samanacruz parte Alta la cual abastece al barrio de Samanacruz en Cajamarca, después a la salida de cada filtro se le tomó 5 muestras a cada uno para luego sacar un promedio de estas y que sea el resultado representativo de cada filtro.

Tabla 7: Codificación de muestras

Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C1E1M1			
C1E1M2			
...			
C1E1M5			
C1E2M1			
...			
C1E2M5			

C1E3M1

...

C1E3M5

C1E4M1

...

C1E4M5

C1E5M1

...

C1E5M5

Fuente: Elaboración propia

h. Análisis de laboratorio

El análisis para determinar la dureza de las muestras se realizó en el laboratorio de EPS SEDACAJ S.A., siguiendo estos pasos:

- En un matraz se vertió 50 ml de muestra de agua
- Se agregó 10 gotas de buffer pH 10
- Se agregó unos gramos de Indicador Negro de Eriocromo T (NET)
- Se agito la muestra para que se disuelvan los reactivos que hemos vertido hasta que la solución tome un color rojo vinoso
- Se tituló la solución con EDTA 0.01M agitando constantemente hasta que cambie a un color azul, para determinar la dureza lo único que se hace es leer la cantidad de mililitros que se utilizó en la titulación y se multiplica por 20 para que nos de la dureza en mg/l.



Figura 20: Titulación de muestra de agua filtrada

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados y discusión

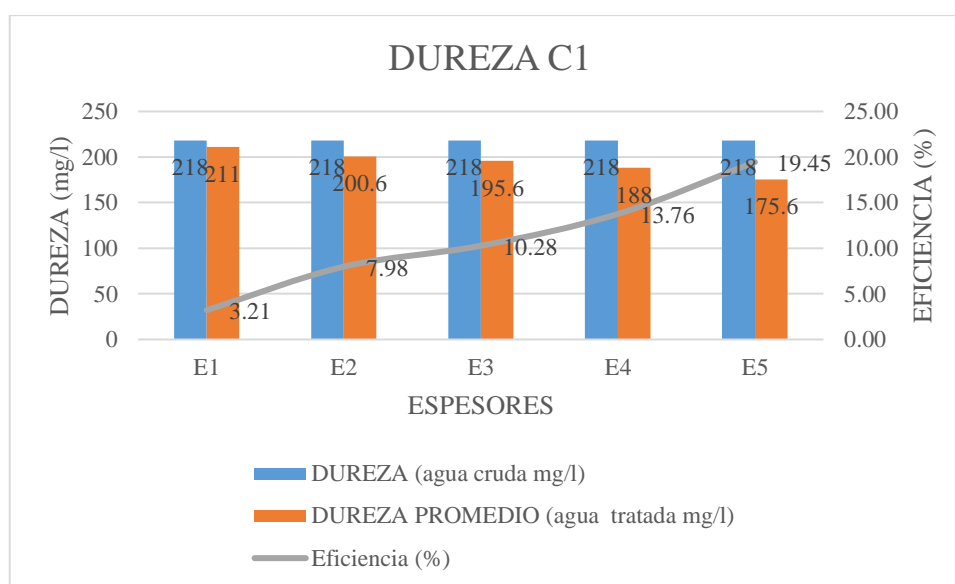
Tabla 8: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C1

Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C1E1M1	218	211	210.8
C1E1M2	218	212	
C1E1M3	218	210	
C1E1M4	218	211	
C1E1M5	218	210	
C1E2M1	218	202	200.8
C1E2M2	218	200	
C1E2M3	218	199	
C1E2M4	218	201	
C1E2M5	218	202	
C1E3M1	218	195	195.4
C1E3M2	218	197	
C1E3M3	218	195	
C1E3M4	218	196	
C1E3M5	218	194	
C1E4M1	218	189	187.6
C1E4M2	218	187	
C1E4M3	218	186	
C1E4M4	218	187	
C1E4M5	218	189	
C1E5M1	218	177	176
C1E5M2	218	175	
C1E5M3	218	176	
C1E5M4	218	175	
C1E5M5	218	177	

Tabla 9: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C1

Espesor	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
E1	218	211	3.21
E2	218	200.6	7.98
E3	218	195.6	10.28
E4	218	188	13.76
E5	218	175.6	19.45

Figura 21: Resultado de reducción de dureza C1



En la figura 21 se puede observar que de acuerdo a la clasificación del grado de dureza del ministerio de salud (Minsa) el agua cruda se puede caracterizar como un agua dura (150 – 300 mg/l), y de acuerdo a la OMS se caracteriza como un agua muy dura (> 180 mg/l).

Después de la tratabilidad de la dureza mediante el filtro de zeolita se observa que en los 5 diferentes espesores de zeolita hay una reducción de la dureza en el agua tratada, siendo el E5 (15 cm de espesor) el que pudo lograr la mayor cantidad de reducción de dureza; de 218 mg/l bajo a 175.6 mg/l; y por tanto ser el espesor más eficiente con un 19.45%, logrando así cambiar la caracterización del agua tratada según la OMS a un agua dura (121 – 180 mg/l).

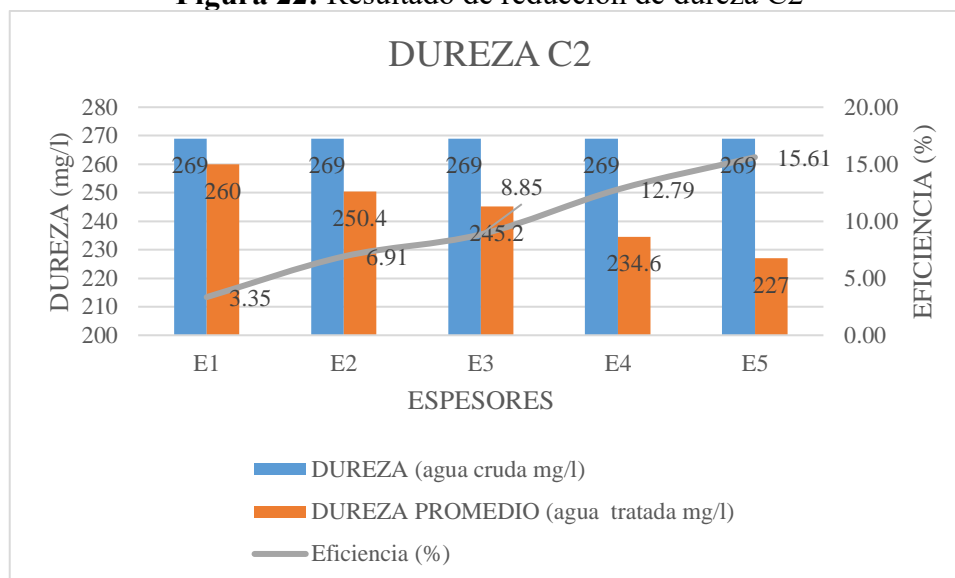
Tabla 10: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C2

Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C2E1M1	269	261	260
C2E1M2	269	261	
C2E1M3	269	259	
C2E1M4	269	260	
C2E1M5	269	259	
C2E2M1	269	251	250.4
C2E2M2	269	250	
C2E2M3	269	250	
C2E2M4	269	250	
C2E2M5	269	251	
C2E3M1	269	244	245.2
C2E3M2	269	246	
C2E3M3	269	244	
C2E3M4	269	247	
C2E3M5	269	245	
C2E4M1	269	236	234.6
C2E4M2	269	234	
C2E4M3	269	234	
C2E4M4	269	235	
C2E4M5	269	234	
C2E5M1	269	226	227
C2E5M2	269	228	
C2E5M3	269	227	
C2E5M4	269	228	
C2E5M5	269	226	

Tabla 11: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C2

Espesor	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
E1	269	260	3.35
E2	269	250.4	6.91
E3	269	245.2	8.85
E4	269	234.6	12.79
E5	269	227	15.61

Figura 22: Resultado de reducción de dureza C2



En la figura 22 se puede observar que el agua cruda se caracteriza como agua dura según el Minsa y como agua muy dura según la OMS.

Después de darle tratabilidad al agua cruda, la cual tiene una concentración C2, se observa que nuevamente el filtro E5 es el que logra la mayor reducción de dureza bajándola de 269 mg/l a 227 mg/l y obteniendo el mayor porcentaje de eficiencia (15.61%); pero aun después de la disminución de esta dureza no se logró cambiar la caracterización del agua según el Minsa y OMS.

Tabla 12: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C3

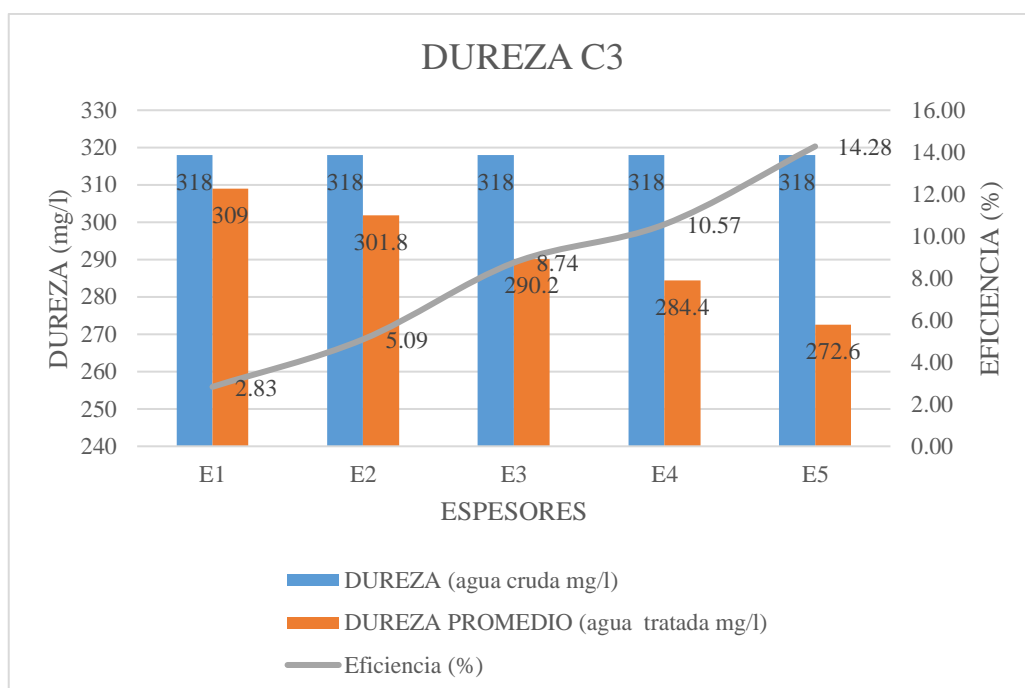
Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C3E1M1	318	309	
C3E1M2	318	310	
C3E1M3	318	310	309
C3E1M4	318	308	
C3E1M5	318	308	
C3E2M1	318	302	
C3E2M2	318	301	301.8
C3E2M3	318	300	

C3E2M4	318	303	
C3E2M5	318	303	
C3E3M1	318	291	
C3E3M2	318	290	
C3E3M3	318	290	290.2
C3E3M4	318	290	
C3E3M5	318	290	
C3E4M1	318	283	
C3E4M2	318	284	
C3E4M3	318	284	284.4
C3E4M4	318	286	
C3E4M5	318	285	
C3E5M1	318	272	
C3E5M2	318	274	
C3E5M3	318	273	272.6
C3E5M4	318	272	
C3E5M5	318	272	

Tabla 13: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C3

Espesor	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
E1	318	309	2.83
E2	318	301.8	5.09
E3	318	290.2	8.74
E4	318	284.4	10.57
E5	318	272.6	14.28

Figura 23: Resultado de reducción de dureza C3



En la figura 23 se puede observar que el agua cruda con dureza C3 sobrepasa los 300 mg/l, tanto para la OMS y el Minsa el agua se caracteriza como un agua muy dura.

Después de darle tratabilidad al agua cruda, se observó que los filtros E3, E4 y E5 son los únicos que logran cambiar la caracterización del agua a un agua dura la cual está dentro del rango de 150 – 300 mg/l, según el Minsa. Y nuevamente el filtro E5 es el que tiene la mayor eficiencia con un 14.28%.

Tabla 14: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C4

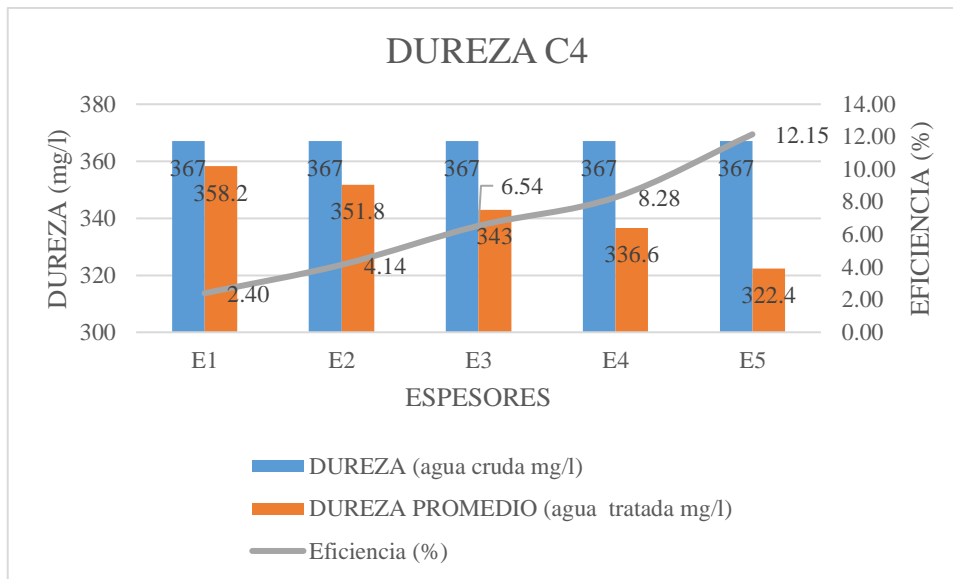
Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C4E1M1	367	360	
C4E1M2	367	357	
C4E1M3	367	359	358.2
C4E1M4	367	357	
C4E1M5	367	358	
C4E2M1	367	353	
C4E2M2	367	352	351.8
C4E2M3	367	352	

C4E2M4	367	351	
C4E2M5	367	351	
C4E3M1	367	343	
C4E3M2	367	343	
C4E3M3	367	343	343
C4E3M4	367	343	
C4E3M5	367	343	
C4E4M1	367	337	
C4E4M2	367	337	
C4E4M3	367	337	336.6
C4E4M4	367	337	
C4E4M5	367	335	
C4E5M1	367	323	
C4E5M2	367	323	
C4E5M3	367	323	322.4
C4E5M4	367	322	
C4E5M5	367	321	

Tabla 15: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C4

Espesor	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
E1	367	358.2	2.40
E2	367	351.8	4.14
E3	367	343	6.54
E4	367	336.6	8.28
E5	367	322.4	12.15

Figura 24: Resultado de reducción de dureza C4



En la figura 24 se puede observar que el agua cruda se caracteriza como un agua muy dura y después de la tratabilidad del agua ninguno de los filtros logra cambiar la caracterización de la misma; y nuevamente el filtro E5 tiene la mayor eficiencia con 12.15%.

Tabla 16: Resultados tratamiento de agua con zeolita con una dureza C5

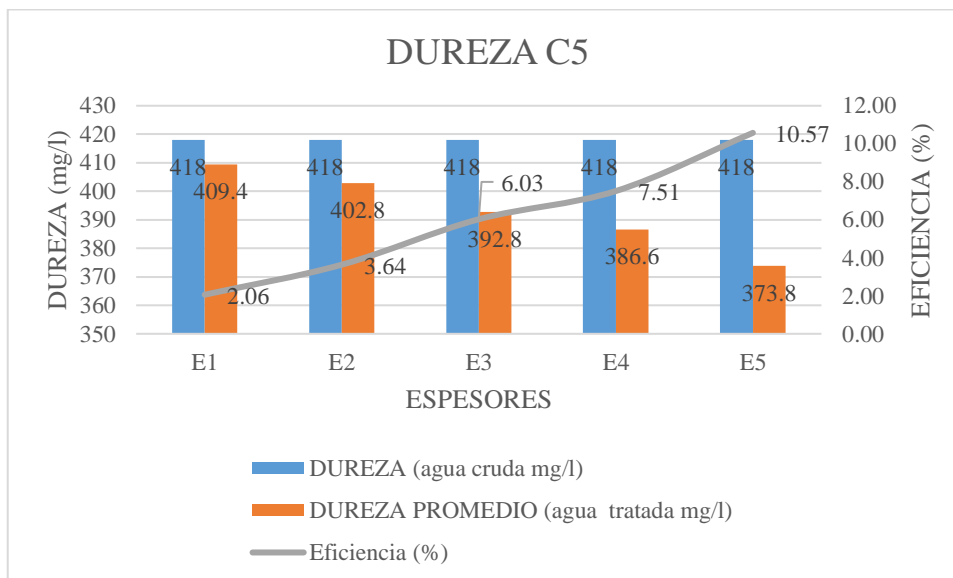
Codificación de muestra	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA (agua tratada mg/l)	Promedio (mg/l)
C5E1M1	418	408	
C5E1M2	418	410	
C5E1M3	418	411	409.4
C5E1M4	418	409	
C5E1M5	418	409	
C5E2M1	418	404	
C5E2M2	418	402	
C5E2M3	418	402	402.8
C5E2M4	418	402	
C5E2M5	418	404	
C5E3M1	418	394	
C5E3M2	418	392	
C5E3M3	418	392	392.8
C5E3M4	418	393	
C5E3M5	418	393	
C5E4M1	418	386	386.6

C5E4M2	418	387	
C5E4M3	418	386	
C5E4M4	418	386	
C5E4M5	418	388	
C5E5M1	418	374	
C5E5M2	418	374	
C5E5M3	418	373	373.8
C5E5M4	418	374	
C5E5M5	418	374	

Tabla 17: Resultado de eficiencia de reducción de dureza C5

Espesor	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
E1	418	409.4	2.06
E2	418	402.8	3.64
E3	418	392.8	6.03
E4	418	386.6	7.51
E5	418	373.8	10.57

Figura 25: Resultado de reducción de dureza C5

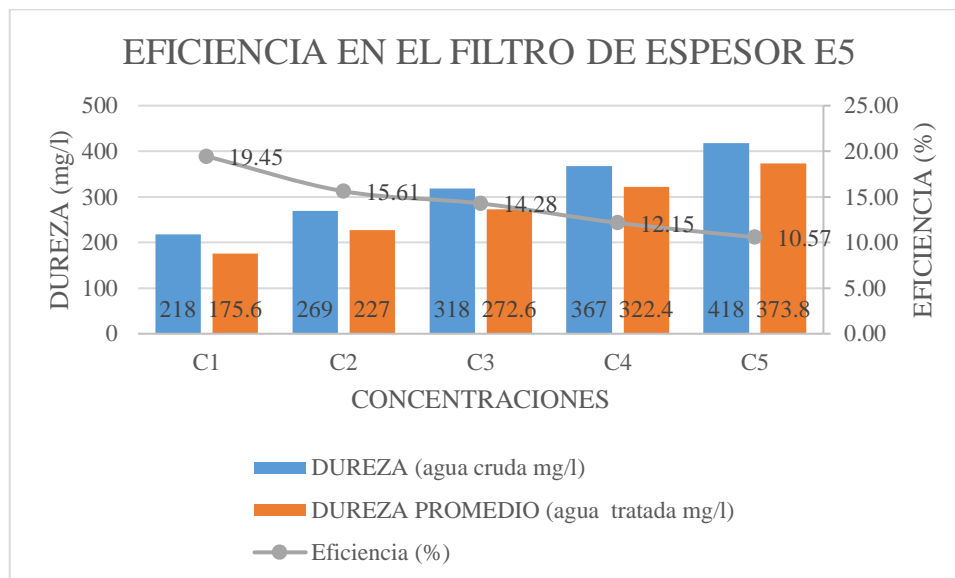


En la figura 25 se puede observar que el filtro con mayor eficiencia es el filtro E5 con 10.57% y que tanto el agua cruda como el agua tratada, según el Minsa y la OMS se caracteriza como un agua muy dura.

Tabla 18: Comparativa de eficiencia del filtro con espesor E5 con las concentraciones utilizadas

Concentración	DUREZA (agua cruda mg/l)	DUREZA PROMEDIO (agua tratada mg/l)	Eficiencia (%)
C1	218	175.6	19.45
C2	269	227	15.61
C3	318	272.6	14.28
C4	367	322.4	12.15
C5	418	373.8	10.57

Figura 26: Resultados en el filtro de espesor E5



En la figura 26 se puede apreciar los resultados del filtro con espesor E5, en comparación a la eficiencia que se obtuvo con los otros espesores, al realizar la tratabilidad de las aguas con las diferentes concentraciones de carbonatos se aprecia que la eficiencia en la reducción de la dureza es inversamente proporcional a la concentración de carbonatos, eso quiere decir que a mayor sea la concentración de carbonatos en el agua la eficiencia del filtro con espesor E5 será menor.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Ninguno de los cinco espesores de filtro de zeolita logro reducir la dureza en más del 50% como se esperaba.
- Se determino que, si hubo un efecto positivo en la reducción de dureza en las muestras de aguas tomadas y analizadas en laboratorio, teniendo como resultado más sobresaliente el poder reducir la dureza del agua de 218 mg/l a 175.6 mg/l, el cual fue obtenido al pasar el agua con dureza C1 a través de filtro de zeolita con espesor E5.
- El filtro más eficiente, de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio, es el filtro de zeolita con espesor E5 (15 cm de espesor), obteniendo en su pico más alto de eficiencia un 19.45%.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar más ensayos con estos filtros de zeolita aumentándoles los espesores a unos 20 cm, 30 cm o más centímetros para determinar si estos filtros con nuevos espesores pudieran ser más eficientes al reducir la dureza del agua.
- Se recomienda realizar el mismo estudio de reducción de la dureza del agua, pero al momento de hacer la activación de la zeolita utilizar una solución química de NaCl en vez de utilizar sal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldabe, S.; Aramendia, P.; Bonazzola, C.; Lacreu, L. 2004. Química 2. Química en acción. Buenos Aires: Ediciones Colihue SRL.
- Baerlocher, C., McCusker, L., & Olson, D. (2007). Atlas of Zeolite Framework Types. The Netherlands, UK: Elsevier B.V.
- Blacio Ordoñez, DA.; Palacios Perez, JL. 2011. FILTROS BIOLÓGICOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA, POSIBILIDADES DE USO DE FLA (FILTROS LENTOS DE ARENA) CON AGUA SUPERFICIAL DE NUESTRA REGIÓN. Cuenca Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Breck, D. 1974. Zeolite Molecular Sieves. New York. USA: Ediciones Steves Wiley and Sons.
- Bustillos Yaguana, AE.; Suin Arévalo, MA. 2014. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR QUÍMICO PARA LA OBTENCIÓN DE ZEOLITAS SINTÉTICAS. Cuenca, Ecuador.
- Chica Toro, F. &. (2006). La zeolita en la mitigación ambiental. Revista Lasallista de Investigación, p 30-34.
- Concepto Definición. Consultado 10 ene. 2020 Disponible en <https://conceptodefinicion.de/eficiencia/>
- Curi, A.; Granda, W.; Lima, H.; Sousa, W. 2006. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Información Tecnológica-Vol. 17, p 111-118.
- GRÁGEDA ZEGARRA, M.; GRÁGEDA ZEGARRA, M. 2006. Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos. Santiago de Chile, Chile.
- Harris, DC. (2007). Análisis químico cuantitativo. Barcelona: Reverté S.A.

- Heinke, G. W., Henry, G., & Escalona, H. J. (1999). Ingeniería ambiental. Mexico: Pearson Educación.
- <http://tesis.uson.mx/>. Consultado 31 ago. 2019. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>
- <http://www.digesa.minsa.gob.pe>. Consultado 11 jul. 2019. Disponible en http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf
- <http://www.infoiarna.org.gt/>. Consultado 02 jun. 2018. Disponible en http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/11_Glosario_del_Agua.pdf
- <http://www.lenntech.es/>. Consultado 02 jun. 2018. Disponible en <http://www.lenntech.es/glosario-agua.htm>
- (<http://www.lenntech.es/> 2018).
- <http://www.quiminet.com/>. Consultado 07 ago. 2019. Disponible en <http://www.quiminet.com/articulos/el-ablandamiento-del-agua-18658.htm>
- <http://www.siss.gob.cl/>. Consultado 02 jun. 2018. Disponible en <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3440.html>
- <http://www.unesco.org/>. Consultado 02 jun. 2018. Disponible en <http://www.unesco.org/new/es/education/themes/strengthening-education-systems/inclusive-education/rural-people/>
- <https://es.scribd.com>. Consultado 25 may. 2018. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/18034595/Aplicaciones-de-las-Zeolitas>
- <https://sswm.info/>. Consultado 11 ene. 2020. Disponible en <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-lenta-de-arena>

- Jiexiang, G. 1993. The application of natural zeolite in China. Proceeding Intern. Congress Applied Mineralogy; ICAM' 93. Fremantle, Wester Australia.
- Larrea Vargas, CJ. 2015. APLICACIÓN DE UN FILTRO DE ZEOLITA PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA A NIVEL DOMICILIARIO EN EL SITIO LA PALESTINA, CANTÓN EL GUABO, PROVINCIA DE EL ORO. Tesis Ing. Machala, El Oro, Ecuador. Consultado 11 set. 2019. Disponible en <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/3120/1/TESIS%20-%20JONATHAN%20LARREA.pdf>
- LOARTE VARGAS, AD; SANABRIA CONTRERAS, VR. 2015. EFECTO DEL pH Y TIPO DE ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO DE AGUAS SUPERFICIALES CONTAMINADAS POR RELAVES MINEROS. Huancayo, Perú.
- Mackense, L.; Susen, J. 2005. Ingeniería y ciencias ambientales. Editorial Mc Graw Hill.
- Manahan, S. 2007. Introducción a la Química Ambiental. Mexico: Reverte Ediciones S.A.
- Mc Bain, J. 1932. "The Sorption of Gases and Vapors by Solids" . London: G. Rutledge and Sons, Eds.
- Rocha Castro, E. 2010. Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Salamanca, E. 2016. Tratamiento de aguas para el consumo humano. Módulo Arquitectura CUC, p. 29-48.
- www.lenntech.es. Consultado 28 set. 2019. Disponible en <https://www.lenntech.es/zeolitas-aplicaciones.htm>

ANEXOS

ANEXO 1. CALCULO DE LA CANTIDAD DE CLORURO DE SODIO PARA LA ACTIVACIÓN DE LA ZEOLITA DE ACUERDO A LOS ESPESORES DE CADA FILTRO.

a. Espesor E1

Ancho de filtro: $A=0.3$ m

Largo de filtro: $L=0.4$ m

Espesor de filtro: $E1=0.03$ m

Volumen de filtro: $V=A*L*E1$

$$V = 0.3 * 0.4 * 0.03 = 0.0036 \text{ m}^3$$

$$V = 0.0036 \text{ m}^3 * 35.315$$

$$V = 0.127 \text{ pie}^3$$

Se tiene que para un pie cubico de zeolita se necesita 5 kg de sal, entonces tenemos:

$$5 \text{ kg} \leftrightarrow 1 \text{ pie}^3$$

$$X \text{ kg} \leftrightarrow 0.127 \text{ pie}^3$$

$$\Rightarrow X = 0.64 \text{ kg}$$

b. Espesor E2

Ancho de filtro: $A=0.3$ m

Largo de filtro: $L=0.4$ m

Espesor de filtro: $E1=0.06$ m

Volumen de filtro: $V=A*L*E1$

$$V = 0.3 * 0.4 * 0.06 = 0.0072 \text{ m}^3$$

$$V = 0.0072 \text{ m}^3 * 35.315$$

$$V = 0.254 \text{ pie}^3$$

Se tiene que para un pie cubico de zeolita se necesita 5 kg de sal, entonces tenemos:

$$5 \text{ kg} \leftrightarrow 1 \text{ pie}^3$$

$$X \text{ kg} \leftrightarrow 0.254 \text{ pie}^3$$

$$\Rightarrow X = 1.27 \text{ kg}$$

c. Espesor E3

Ancho de filtro: $A=0.3 \text{ m}$

Largo de filtro: $L=0.4 \text{ m}$

Espesor de filtro: $E1=0.09 \text{ m}$

Volumen de filtro: $V=A*L*E1$

$$V = 0.3 * 0.4 * 0.09 = 0.0108 \text{ m}^3$$

$$V = 0.0108 \text{ m}^3 * 35.315$$

$$V = 0.381 \text{ pie}^3$$

Se tiene que para un pie cubico de zeolita se necesita 5 kg de sal, entonces tenemos:

$$5 \text{ kg} \leftrightarrow 1 \text{ pie}^3$$

$$X \text{ kg} \leftrightarrow 0.381 \text{ pie}^3$$

$$\Rightarrow X = 1.91 \text{ kg}$$

d. Espesor E4

Ancho de filtro: $A=0.3 \text{ m}$

Largo de filtro: $L=0.4 \text{ m}$

Espesor de filtro: $E1=0.12 \text{ m}$

Volumen de filtro: $V=A*L*E1$

$$V = 0.3 * 0.4 * 0.12 = 0.0144 \text{ m}^3$$

$$V = 0.0144 \text{ m}^3 * 35.315$$

$$V = 0.509 \text{ pie}^3$$

Se tiene que para un pie cubico de zeolita se necesita 5 kg de sal, entonces tenemos:

$$5 \text{ kg} \leftrightarrow 1 \text{ pie}^3$$

$$X \text{ kg} \leftrightarrow 0.509 \text{ pie}^3$$

$$\Rightarrow X = 2.54 \text{ kg}$$

e. Espesor E5

Ancho de filtro: $A=0.3 \text{ m}$

Largo de filtro: $L=0.4 \text{ m}$

Espesor de filtro: $E1=0.15 \text{ m}$

Volumen de filtro: $V=A*L*E1$

$$V = 0.3 * 0.4 * 0.15 = 0.0180 \text{ m}^3$$

$$V = 0.0180 \text{ m}^3 * 35.315$$

$$V = 0.636 \text{ pie}^3$$

Se tiene que para un pie cubico de zeolita se necesita 5 kg de sal, entonces tenemos:

$$5 \text{ kg} \leftrightarrow 1 \text{ pie}^3$$

$$X \text{ kg} \leftrightarrow 0.636 \text{ pie}^3$$

$$\Rightarrow X = 3.18 \text{ kg}$$

ANEXO 2. PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 27: Material para filtro tamizado



Figura 28: Filtro construido en vidrio



Figura 29: Colocación de los filtros en sus respectivos soportes



Figura 30: Prueba de hermeticidad y buen funcionamiento de los filtros



Figura 31: Colocación y medición de espesor del lecho filtrante



Figura 32: Sal utilizada para la activación de zeolita



Figura 33: Pesaje de la cantidad de sal a utilizar en la activación de zeolita



Figura 34: Mezcla y disolución de la sal en agua



Figura 35: Vertimiento de salmuera en el filtro de zeolita



Figura 36: Material filtrante sumergido en una solución de salmuera



Figura 37: Regulación y medición del caudal entrante al filtro de zeolita



Figura 38: Regulación y medición del caudal saliente del filtro de zeolita



Figura 39: Toma de muestra de agua sin tratar



Figura 40: Toma de muestra de agua tratada a la salida del filtro



Figura 41: Muestras para análisis en laboratorio



Figura 42: Análisis de dureza en el laboratorio

ANEXO 3. RESULTADOS DE LABORATORIO