

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de una columna de intercambio iónico para el tratamiento de agua destinada a la producción de cerveza artesanal en la Factoría Santa Ana.

Autor: Daniel Alejandro Venegas Ortiz

Tutor: Dr. C. Irenia Gallardo Aguilar

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

DIPLOMA THESIS

Title: Evaluation of a column of ionic exchange for the treatment of water dedicated to the production of handmade beer in the "Factoría Santa Ana".

Author: Daniel Alejandro Venegas Ortiz

Thesis Director: Dr. C. Irenia Gallardo Aguilar

Santa Clara , june 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Þensamíento

“La Química es necesariamente una ciencia experimental: las conclusiones se extraen de datos y sus principios son aportados por la evidencia de los hechos”.

Michael Faraday.

Agradecimientos

A mi mamá y mi papá: por apoyarme siempre y educarme en el camino de la virtud.

A mi hermana: por ser mi eterno paradigma.

A mi chachi: por apoyarme siempre.

A mi pequeño Dylan: por convertirse en mi mayor fuerza y motivo.

A mis amigos de siempre: por estar siempre.

A mis compañeros de aula: por los cinco años compartidos.

A mis profesores: por todos los conocimientos aportados en mi formación como profesional.

A mi tutora Irenia: por su apoyo y guía constante.

Dedicatoria

A mi pequeño Dylan:

para que se erija en el esfuerzo y dedicación de sus padres, para él y por él todo lo
que soy y todo lo que seré.

Resumen/Abstract

Resumen

De todos los elementos que forman la cerveza, probablemente el agua sea el más importante y el menos atendido; por lo que en el siguiente trabajo se evaluó una columna de intercambio iónico con el objetivo fundamental de tratar el agua para la producción de cerveza artesanal en la factoría Santa Ana. Primeramente, se elaboró el marco referencial que permitió identificar los principales parámetros de calidad que debe tener el agua para la producción de cervezas artesanales y su uso en calderas, sistemas de enfriamiento y limpieza de líneas, así como los tipos de resinas empleados para este fin. Luego se examinó el agua con que se surte la fábrica y se analizaron experimentalmente diferentes tipos de resina para llevar el agua a los parámetros adecuados. Como resultado se obtuvo que la resina Amberlita IRC-50 es la más adecuada, razón por la cual se le analizó experimentalmente su capacidad de regeneración, para ello se utilizó como solución regenerante HCl al 2% y al 5% obteniéndose resultados eficientes. Finalmente, con los resultados obtenidos por la resina seleccionada se escaló la columna a nivel industrial y se determinaron los principales parámetros de operación del intercambiador iónico de la fábrica tales como: capacidad de operación por ciclo de 62788 L, volumen de agua y de ácido clorhídrico al 38% requeridos para la regeneración y enjuague de 7401.14 L y 304.1 L respectivamente.

Abstract

Of all the elements that form the beer, the water is probably the most important and the fewer assisted of all. For what in the following work a column of ionic exchange was evaluated with the fundamental objective of treating the water for the production of handmade beer in the factory Santa Ana. Firstly, the mark referencial was elaborated that allowed us to identify the main parameters of quality that should have the water for the production of handmade beers and its use in boilers, cooling systems and cleaning of lines as well as the types of resins used for this end, then the water was examined with which the factory is provided and they were analyzed different types of resin experimentally to take the water to the appropriate parameters giving as a result that the resin Amberlita IRC-50 was the most appropriate, to which was analyzed the regeneration capacity experimentally obtaining efficient results using as regenerating solution HCl to 2% and 5%. Finally, with the results obtained by the selected resin it was climbed at industrial level and the main parameters of operation of the ionic intercambiador of the such factory were determined as operation capacity by cycle (62788 L), volume of water and hydrochloric acid required for the regeneration and mouthwash (7401.14 L and 304.1 L) respectively.

Índice

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.1. El agua en la industria alimenticia.....	3
1.1.1 Importancia de la calidad del agua en la industria alimenticia.	3
1.1.2 Desafíos para la industria de alimentos.	4
1.1.3 Importancia del agua en la producción de cerveza.	5
1.1.4 Características óptimas del agua para la producción de cerveza artesanal. (Celenza)	5
1.2. La cerveza artesanal.....	7
1.2.1. Características de la Cerveza Artesanal.....	7
1.2.2. Beneficios saludables de la cerveza artesanal.	7
1.2.3. Proceso de producción de la cerveza artesanal.....	8
1.3. Tipos de tratamientos de aguas.....	11
1.3.1. Antecedentes Históricos.	11
1.3.2. Tipos de tratamientos.....	13
1.3.3. Parámetros de calidad.....	14
1.4. Conceptos teóricos de desmineralización e intercambio iónico.....	15
1.4.1. Intercambio Iónico.	16
1.4.2. Cómo funcionan los intercambiadores iónicos. Reacción de intercambio iónico. 17	
1.4.3. Parámetros característicos de los intercambios iónicos.....	18
1.4.4. ¿Cómo se trabaja con los intercambiadores iónicos?.....	19
1.4.5. Las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de aguas.....	22
1.5. Conclusiones parciales.	22
CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL.	24
2.1. Evaluación del agua con que se surte la fábrica.....	24
2.2. Evaluación del intercambiador iónico.....	25
2.2.1. Análisis de la resina del intercambiador iónico de la fábrica.....	25
2.3. Valoración de otros tipos de resina.	27
2.3.1. Evaluación de la resina Amberlita MB-150.....	28
2.3.2. Evaluación de la resina Merck 4836.....	31
2.3.3. Evaluación de la resina Amberlita IRC-50.	34
2.4. Análisis de los resultados obtenidos por las tres resinas.....	37
2.5. Parámetros de calidad del agua tratada con la resina Amberlita IRC-50.....	37
2.6. Determinación de la capacidad de regeneración de la resina Amberlita IRC-50.....	38

2.7. Conclusiones Parciales.....	42
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA RESINA AMBERLITA IRC-50 EN LAS COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO DE LA FÁBRICA.....	44
3.1. Características del intercambiador.....	44
3.2. Escalado de la columna de intercambio iónico a nivel de planta piloto.	44
3.3. Determinación del volumen de resina catiónica IRC-50 que necesita el intercambiador.....	45
3.4. Cálculo del Área de intercambio iónico.....	46
3.5. Cálculo de la cantidad de agua que se puede tratar antes de que las resinas se agoten.....	47
3.6. Cálculo de los parámetros de operación, regeneración y enjuague del intercambiador.....	47
3.6.1. Cálculo de los parámetros de operación.	47
3.6.2. Cálculo de los parámetros de regeneración.	48
3.6.3. Cálculo de los parámetros de enjuague.....	49
3.7. Manejo del agua tratada para el proceso de producción de cerveza artesanal.....	51
3.8. Conclusiones parciales.	52
CONCLUSIONES:	54
RECOMENDACIONES:	55
BIBLIOGRAFÍA:	56
ANEXOS.....	58

Introducción

INTRODUCCIÓN

En Cuba un renglón importante en la economía lo ocupa el turismo, y en consecuencia con el perfeccionamiento empresarial y los Lineamientos del Partido se han buscado alternativas para lograr un turismo sostenible. Uno de los polos turísticos dentro del país lo ocupa la Villa de la Santísima Trinidad que recibe anualmente miles de turistas nacionales y extranjeros.

Con el propósito de diversificar las ofertas turísticas y de aumentar los ingresos en divisa, la Sucursal Extrahotelera Palmares S.A. Sancti Spíritus asumió la ejecución de una fábrica-taberna de cerveza artesanal, en Trinidad, a unos 3 588 000 de pesos en moneda total, en su mayoría en CUC, ascendió la inversión, emprendida en el plano constructivo por la Empresa de Servicios al Turismo (Emprestur), para esto se contrató los servicios y tecnología de la compañía austriaca SALM, la nueva mini industria se erige en áreas de la antigua Cárcel Real, en las cercanías de la Plaza Santa Ana.

Algo más de 40 trabajadores laboran en dicha factoría, con capacidad para producir 200 000 litros al año, sumados tres tipos de cerveza (clara, media y oscura) y malta, también de la marca SALM, de dicha compañía austriaca. Hasta ahora, en Cuba funcionan dos en La Habana una en Santiago de Cuba, otra en Varadero, una en Trinidad inaugurada en el segundo semestre del pasado año y actualmente está aprobado el proyecto para montar una en Santa Clara.

El contrato con SALM no incluía una planta de tratamiento de agua para la producción de cerveza y dado a las características de las aguas del territorio la entidad solventó dicho problema con una columna de intercambio iónico traído de las instalaciones hoteleras de la península que estaba en desuso por su mal funcionamiento

Problema científico: La fábrica no cuenta en sus instalaciones con una planta de tratamiento de agua adecuada que ablande el agua de proceso y a pesar del corto tiempo de operación (menos de seis meses) ya se ven las primeras señales de incrustaciones en las tuberías, la caldera y el intercambiador de calor.

Hipótesis: Si se evalúa el funcionamiento de la columna de intercambio iónico, se podrá poner en correcto funcionamiento y así mejorar la calidad del agua tratada y la calidad de la cerveza.

Es por ello que se define el siguiente **Objetivo General:** Evaluar el funcionamiento de la columna de intercambio iónico para ponerla en correcto funcionamiento.

Para dar cumplimiento al Objetivo General se plantean los siguientes **Objetivos Específicos:**

1. Fundamentar teórica y metodológicamente la investigación sobre los aspectos relacionados con el tratamiento de agua para el proceso productivo de cervezas artesanales
2. Analizar los parámetros de calidad del agua con que cuenta la cervecería

3. Estudiar experimentalmente diferentes tipos de resinas que permita obtener un agua con los parámetros de calidad requeridos
4. Seleccionar la mejor resina a emplear de acuerdo a la capacidad adsorptiva de la misma
5. Escalar los resultados obtenidos en el laboratorio con la resina seleccionada a nivel de fábrica

CAPÍTULO 1:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

1.1. El agua en la industria alimenticia.

1.1.1 Importancia de la calidad del agua en la industria alimenticia.

En la industria alimenticia se debe tener un extremo cuidado de la calidad del agua que se va a utilizar durante el proceso de elaboración del alimento y en especial aquella agua que va a entrar en contacto directo o va a formar parte del alimento. **(Admin, 2019b)**

El agua cuando va a estar en contacto directo con los alimentos primeramente debe tener una excelente calidad microbiológica que va a ver reflejada en una cuenta total microbiana, el valor depende de las normas sanitarias vigentes en cada país. **(Admin, 2019b)**

Cuando el agua no tiene las características apropiadas desde el punto de vista químico y microbiológico, puede traer graves consecuencias como: reducir las propiedades organolépticas del alimento, reducir el valor nutritivo, causar reacciones químicas no deseadas o transmitir alguna infección gastrointestinal. **(Admin, 2019b)**

Existen algunos tipos de microorganismos que aunque no tienen gran importancia desde el punto de vista sanitario, sí debemos tener en cuenta su número ya que pueden resultar muy perjudiciales en las características organolépticas en la vida de anaquel de varios productos alimenticios, como ejemplo de este tipo de microorganismos podemos mencionar a los proteolíticos y políficos, su presencia es muy importante en alimentos con alto contenido graso y proteico como la leche y sus derivados que son medios de cultivo excelentes para este tipo de microorganismos.

Desde el punto de vista químico la presencia de iones en el agua que está en contacto directo con los alimentos puede traer reacciones químicas indeseadas durante la tecnología de elaboración de estos, así podemos mencionar los siguientes ejemplos:

- La presencia del hierro en el agua puede provocar una decoloración de los pigmentos naturales de los alimentos, el cobre favorece reacciones de oxidación y destrucción de algunas vitaminas, principalmente la vitamina C.
- La presencia de calcio y magnesio en el agua favorece la reactivación de enzimas y aceleración de las reacciones al actuar como cofactores.
- La presencia de cationes es muy importante, sobre todo en el procesamiento de frutas, pues cuando estas son tratadas con aguas que contienen una concentración de cationes, se presentan cambios en la textura, haciendo que estas queden más duras, estas características también las podemos utilizar a nuestro favor colocando las frutas con tejidos suaves y frágiles en agua con un contenido alto de cationes.

- La dureza del agua es otro factor a cuidar cuando se utiliza para la elaboración de alimentos, pues un agua con una dureza de 45 ppm, expresada como carbonato de calcio en el escaldado de vegetales como vainitas, arvejas, etc., es capaz de reducir la absorción de agua y por lo tanto modificar las características organolépticas, en especial la textura de los vegetales. Las aguas que provienen de pozos muy profundos suele contener una alta concentración de bicarbonatos, especialmente de manganeso y hierro.
- Un aspecto muy importantes son los diferentes olores y aromas que el agua puede impartir a los alimentos, algunos de ellos pueden llegar a ser muy desagradable, estos aromas van desde el clásico olor o sabor a cloro que el agua puede adquirir durante su proceso de purificación, o incluso aromas a diferentes compuestos químicos por contaminación como olor a compuestos fenólicos o hidrocarburos que le hacen no apta para utilizarse durante la elaboración de alimentos , por esto se debe tener especial cuidado en su proceso de purificación y manejo.

1.1.2 Desafíos para la industria de alimentos.

La disponibilidad del agua en la industria de alimentos es uno de los factores centrales para asegurar la viabilidad de la industria de alimentos, por su importancia económica al ser uno de los principales insumos en el sector.

La instalación de plantas de tratamiento, para satisfacer los diversos requerimientos se presenta como una de las opciones centrales para esta industria. Para ello se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- La falta de disponibilidad de agua sube el costo de los productos: La importancia del factor económico, ante los crecientes costos de suministro de agua en la calidad requerida. Por ello, la posibilidad de las industrias de contar con procesos internos de ahorro, reciclaje y tratamiento son centrales para su viabilidad financiera.
- Necesidad de purificadoras o tratamientos que hagan más eficiente uso del agua: La industria de alimentos emplea agua en procesos diferenciados. Por ello es preciso que una planta de tratamiento de aguas establezca diferentes procesos de purificación o reciclaje sin mezclar las diferentes aguas residuales.
- Gran parte del agua en producción de alimentos es para lavado de equipo y productos: El agua empleada en la limpieza, generalmente con mangueras a presión, puede ser sometida a un tratamiento de separación de sólidos o de grasas, para su reutilización eficiente.
- Uso para congelamiento y conservación, lo cual permite el reciclaje: El agua se emplea como insumo para la conservación de productos, ya sea por la producción de hielo o para tratamientos como hervor o pasteurización. En todos estos procesos se emplea el agua, lo cual

ofrece la posibilidad de reciclaje por tratamiento con sistemas de filtros u ozono, a un costo relativamente bajo.

- Uso del agua en procesos, cultivos, levaduras y microorganismos: Los alimentos procesados requieren de altas cantidades de agua en procesos dirigidos al consumo humano, tales como licuado, mezcla, cultivos, levaduras o uso de microorganismos. El agua debe asegurar su calidad a las temperaturas y en cantidades adecuadas. La posibilidad de contar con agua potable de pureza y composición óptimas es central, para lo cual contar una planta purificadora propia es una necesidad indispensable.

El agua es de vital importancia en toda la industria alimenticia. Estará presente en cualquier lugar en que se preparen alimentos, desde el cuidado de materias primas hasta la elaboración del producto final. **(Martinez, 2018)**

1.1.3 Importancia del agua en la producción de cerveza.

La cerveza está compuesta en un 90-95% por agua, por lo que se trata del ingrediente más importante, ya que además de ser esencial para la producción de la bebida, facilita su proceso. Muchos ignoran la importancia del agua en el sabor y aroma de la bebida, pero la elección de esta tiene que ser minuciosa. **(México, 2017)**

Para empezar, el agua se utiliza para remojar la malta, lo que puede afectar el resultado final de la cerveza; por otro lado, también ayuda a limpiar y enjuagar en varios otros procesos, por ejemplo, el de la pasteurización, el de la generación de vapor y el manejo del CO₂, por eso mismo, la composición y la calidad del agua son de vital importancia. **(México, 2017)**

Hay dos características químicas en el agua que se toman en cuenta para la producción de cerveza: la alcalinidad, es decir su capacidad para neutralizar ácidos, y su dureza, es decir, sus niveles de salinidad. Para lograr balancear estas dos cualidades, el agua pasa por un proceso de balance previo al remojo de la malta, que asegura que tenga las condiciones correctas para que ésta pueda extraer los componentes correctos de la malta, como los polifenoles. **(México, 2017)**

Características óptimas del agua para la producción de cerveza artesanal.

De todos los elementos que forman la cerveza, probablemente el agua sea el más importante y el menos atendido de todos. Hay que saber prepararla y calcular la cantidad necesaria para la elaboración para no quedarse sin agua a la mitad del proceso. También hay que saber cómo modificarla para poder recrear un estilo auténtico o mejorar el sabor de la cerveza y saber corregirla para alcanzar el pH óptimo. **(ArcticWater, 2019)**

Un aspecto fundamental del agua es el pH. Existen sólo tres compuestos hallados comúnmente en el agua que modifican el pH de la maceración. El primero es el bicarbonato (HCO_3^-), comúnmente mencionado como dureza temporal o alcalinidad. Éste aumenta el pH del agua. Los otros dos iones son el calcio (Ca^{++}) y el magnesio (Mg^{++}) y sirven para bajar el pH. Aunque existen muchos otros compuestos presentes normalmente en el agua, no tienen un efecto apreciable en el pH de la maceración. **(ArcticWater, 2019)**

Para lograr el pH adecuado en la maceración de las cervezas pálidas o claras el agua debe estar en un rango de dureza total de 116 a 207 ppm, en el caso de las cervezas oscuras y la malta usualmente no necesita reducción. Esto se debe a que las maltas oscuras ayudan a disminuir el pH del agua y facilitan la reducción de su alcalinidad. **(Salm, 2018)**

A continuación, se muestra en tabla 1.1 las características de las aguas de famosos lugares cerveceros (la concentración está expresada en ppm).

Tabla 1.1. Características del agua en famosos lugares cerveceros.

Lugar	CO 3	Na	Cl	SO4	Ca	Mg
Burton-on-Trent	200	40	35	660	295	55
Dortmund	180	69	106	260	261	23
Dublin	319	12	19	54	117	4
London	156	99	60	77	52	16
Munich	152	10	2	8	75	18
Pilsen	14	2	5	5	7	2
Buenos Aires	60	18 / 30	20 / 30	30 / 35	12 / 16	2 / 3

Leyenda: CO3: Carbonato Na: Sodio Cl: Cloruro SO4: Sulfato Ca: Calcio Mg: Magnesio

Fuente: **(ArcticWater, 2019)**

1.1.5. Principales variables de calidad del agua en equipos de servicio.

Esencialmente, el parámetro que más afecta la calidad de agua, en usos que no sean como materia prima en la industria de la cerveza, es la dureza. El agua tiene múltiples usos; ya sea para generar vapor en las calderas, sistemas de lavado de las líneas y tuberías y en los enfriadores o intercambiadores de calor, etc. y en estos usos se requiere que la dureza sea muy baja o inexistente. **(Salm, 2018)**

1.2. La cerveza artesanal.

1.2.1. Características de la Cerveza Artesanal

Como su nombre lo indica, la cerveza artesanal es aquella que está elaborada siguiendo una “receta” propia, por maestros cerveceros que le dan un sabor distinto y personal; por lógica su producción es limitada, ya que se pone especial atención en sabores y texturas distintas a las marcas industriales. Una cerveza artesanal tiene las siguientes ventajas sobre las industriales:

- No contiene elementos artificiales, ni en el proceso ni en los ingredientes, el fermentado es natural y los sabores son el resultado de la mezcla de agua, malta, lúpulo y levadura; adicionalmente contiene frutas, especias y hierbas que, unidas a la técnica del maestro cervecero, darán un sabor y un aroma único y especial a esa cerveza.
- Es innovadora, ya que podemos crear combinaciones de sabores a gusto de nuestros clientes.
- Es independiente y social, ya que al no pertenecer a los grandes corporativos, las ganancias se quedan en la localidad ayudando a su economía.

La cerveza artesanal ofrece calidad, diversidad y atención personal; en lugar de precios bajos, mala calidad, restricción en sabores y publicidad. **(Tovar, 2018)**

1.2.2. Beneficios saludables de la cerveza artesanal.

El exclusivo sistema de elaboración preserva las cualidades de las materias primas, que pasan íntegras a la cerveza, por lo que son una fuente natural de vitaminas, minerales y antioxidantes, beneficiosos para la salud, cuando son consumidas responsablemente. A continuación, se detallan algunos de los beneficios saludables de dichas cervezas: Su contenido en polifenoles ejerce un efecto protector sobre el sistema cardiovascular. También contribuyen a esta protección su alto contenido en magnesio y potasio y sus bajos niveles de sodio y calcio. Contienen más de 30 minerales, la mayoría de éstos provenientes de la cebada malteada usada en su elaboración. Un litro de estas cervezas satisface más de la mitad de las necesidades diarias de magnesio de un adulto y alrededor del 40% y 20% respectivamente, de las necesidades diarias de fósforo y potasio. El silicio que contienen protege al organismo del efecto neurotóxico del aluminio y puede prevenir por esta razón enfermedades como el Alzheimer, además, este mineral también favorece el aumento de la masa ósea. **(Enigma, 2019)**

1.2.3. Proceso de producción de la cerveza artesanal.

Las cervezas además de artesanales son naturales, esto significa que no se usan conservantes, colorantes ni ningún otro compuesto químico durante su elaboración, siendo sus ingredientes solamente la malta de cebada y trigo, el lúpulo, la levadura y el agua. Con estos 4 ingredientes se comienza el proceso de elaboración de la cerveza, el cual además es 100% natural y respetuoso con el Medio Ambiente. **(Enigma, 2019)**

✓ Molienda de la malta.

La molienda consiste en desmenuzar el grano de malta, respetando al máximo posible la cáscara o envoltura y provocando la pulverización de la harina. La malta es comprimida entre los cilindros del molino de grano, pero evitando destruir la cáscara, ya que ésta servirá de lecho filtrante en la operación de clarificación del mosto, a la vez que se transforma el interior del grano en una harina lo más fina posible.

✓ Maceración

Es una de las fases más importantes del proceso de elaboración de cerveza y es donde se extrae de la malta, la mayor cantidad de extracto y de la mejor calidad posible, en función del tipo de cerveza que se quiere elaborar y es donde será transformado el almidón contenido en la malta, en azúcares, mediante procesos enzimáticos y bioquímicos naturales. Esta fase de la producción de cerveza se lleva a cabo en el macerador-hervidor, donde se mezcla la malta molida con agua a una temperatura entre 60 y 70° C, dependiendo del tipo de cerveza que se quiera elaborar, para favorecer los procesos de extracción e hidrólisis enzimática. La maceración suele durar entre una y dos horas y el resultado al finalizar este proceso es un mosto azucarado. El agua se calienta y mantiene su temperatura a través del vapor aportado por la caldera de vapor de alta eficiencia. En esta fase se decide el grado alcohólico y el cuerpo de la futura cerveza, en función de la concentración de azúcares del mosto. Éstos dependerán de la cantidad de malta empleada y de la temperatura y tiempo de maceración, que darán más o menos azúcares fermentables para ser transformados en alcohol durante la fermentación y más o menos azúcares no fermentables, que contribuirán al cuerpo y carácter de la cerveza. Para desdoblar el almidón contenido en la malta en azúcares, se necesitan varias enzimas que son producidas de manera natural durante el proceso de malteado.

✓ Separación y agotamiento del bagazo.

Habiendo ya disuelto las materias solubles de la malta y transformado el almidón en azúcares durante el paso anterior, es necesario separar el mosto de la parte insoluble de la malta llamada bagazo. La operación se realiza en dos fases en el lauter, al que es enviado el mosto y bagazo, tras su maceración en el macerador-hervidor. Primero se separa y clarifica el mosto del bagazo, mediante el

recirculado de éste a través de la cama de bagazo, que se depositará sobre el fondo ranurado del lauter. Una vez este mosto está clarificado, se envía de nuevo al macerador-hervidor, después, se realiza la operación de lavado del extracto, que continúa retenido en el bagazo (agotamiento), mediante una ducha de agua caliente. Esta agua, junto con el extracto que quedaba en el bagazo y una vez clarificado de la misma manera que el mosto, es enviado al macerador-hervidor, donde se mezcla con éste a la espera de que dé comienzo la siguiente fase. El bagazo agotado de nuestra microcervecera es un producto rico en fibra, proteína y minerales, por lo que es usado como alimento animal. De esta manera se reduce la generación de residuos sólidos y se convierte en un producto de desecho, en un producto de alimentación animal altamente nutritivo.

✓ Ebullición/Lupulización

El mosto obtenido se hierve enérgicamente en el macerador-hervidor. La finalidad de la ebullición es estabilizar enzimática y microbiológicamente el mosto y coagular las proteínas. La esterilización del mosto es obtenida por simple ebullición. Por último, a lo largo de la ebullición se forman productos reductores, que contribuyen a la calidad y estabilidad de cerveza. El lupulado del mosto se realiza durante esta operación. Consiste en añadir el lúpulo al mosto en ebullición. Dependiendo de la cantidad y de la variedad de lúpulo que se utilice, la cerveza tendrá un mayor o menor amargor, sabor y aroma a éste. Nunca se incorpora todo el lúpulo al principio de la ebullición, sino que añadimos distintas variedades de lúpulo, en diferentes momentos de la ebullición, en función del amargor, sabor y aroma que se quiera transferir a la cerveza. Este proceso normalmente dura entre una hora y media y dos horas.

5-Clarificación y enfriamiento del mosto.

Para el siguiente proceso, es necesario separar los restos de lúpulo y las partículas sólidas generadas durante la ebullición (turbios calientes), del resto del mosto. Este proceso, llamado clarificación, se realiza impartiendo un movimiento centrífugo al mosto contenido dentro del macerador-hervidor. Este movimiento crea un remolino o torbellino que arrastra las partículas sólidas hacia el centro y hacia el fondo del macerador-hervidor, que en este paso es usado también como whirlpool. Tras dejar que decanten estas partículas en el fondo del equipo, son extraídas por medio de la válvula situada en el centro del fondo del mismo. Después de haber hervido el mosto y realizada la separación de las partículas sólidas, éste está caliente (a unos 95°C), por lo que antes de pasar a la fermentación, hay que enfriarlo y prepararlo para que tenga la temperatura adecuada para que las levaduras trabajen bien. Este enfriamiento se realiza en un intercambiador de calor de doble efecto. El mosto caliente es enviado al intercambiador de calor, donde el mosto es enfriado en una primera fase, desde los 95°C iniciales, hasta los 25-30°C, por medio de agua que circula a contracorriente, mientras se calienta por

el efecto de intercambio de calor entre el mosto y el agua. Esta agua caliente se recuperará en el tanque de agua caliente para su uso durante el agotamiento del bagazo, o para la limpieza de los equipos, reduciendo así el consumo energético y de agua de la planta. En una segunda fase, se enfriará el mosto desde los 25-30°C de la primera fase, hasta los 10-22°C necesarios para que las levaduras trabajen de manera óptima durante la fermentación de los diferentes tipos de cerveza.

6- Primera fermentación.

Esta fase, junto con la maceración, son las más importantes en nuestro proceso de elaboración de cerveza. El mosto, enfriado en el intercambiador de calor, se envía a alguno de los tanques de fermentación, a la vez que se oxigena este mosto para permitir el crecimiento de la levadura, que es añadida al fermentador para iniciar el proceso de fermentación, que consiste en la transformación de los azúcares del mosto en alcohol y anhídrido carbónico. Para que la levadura trabaje en condiciones óptimas necesita una temperatura adecuada que varía entre los 10 y 22°C, dependiendo del tipo de cerveza. Esta temperatura se mantendrá constante por medio de la circulación de agua glicolada a través de la cámara de refrigeración que disponen los fermentadores para este cometido, ya que, durante el proceso de fermentación, se emite calor que debe ser eliminado para no alterar los sabores y características de la cerveza que se quiere elaborar. Al finalizar la fermentación, las levaduras se depositan en el fondo del fermentador y son retiradas de éste por medio de la válvula de fondo que poseen estos equipos, para que su descomposición no altere el sabor de la cerveza. El proceso de fermentación dura entre 5 y 20 días, dependiendo del tipo de cerveza.

7-Segunda fermentación y maduración en frío.

A continuación, se realiza una segunda fermentación y maduración en frío a una temperatura de entre -5 y -1°C, en el mismo fermentador donde se ha producido la primera fermentación. Ésta durará de 7 a 30 días, dependiendo del tipo de cerveza y en este tiempo, las levaduras que quedaron en suspensión en la cerveza durante el paso anterior, procesarán algunos compuestos indeseados por sus sabores y aromas que se han generado en la primera fermentación, afinando así las características de la cerveza y eliminando sabores y aromas indeseados. Además, en este paso se eliminan las proteínas y otros compuestos que precipitan en frío, por lo que la cerveza es también clarificada de manera natural. Al finalizar este proceso, se eliminan los sólidos que han precipitado en el fondo (turbios fríos), mediante la misma válvula que se usó para extraer la levadura tras la primera fermentación. Una vez eliminados los turbios fríos, se añade a la cerveza “verde”, mosto frío, procedente del proceso de clarificación y enfriado del mosto explicado anteriormente. En esta fase, algunas de nuestras cervezas son sometidas a un lupulado en frío (dry hopping), con el fin de aumentar los frescos aromas a lúpulo.

1.3. Tipos de tratamientos de aguas.

1.3.1. Antecedentes Históricos.

Una de las mayores preocupaciones en la historia de la humanidad ha sido el procurarse agua lo más pura y limpia posible. El tratamiento del agua originalmente se centraba en mejorar las cualidades estéticas. La historia del agua potable es muy remota. En Siria y Babilonia se construyeron conducciones de albañilería y acueductos para acercar el agua desde sus fuentes a lugares próximos a las viviendas. Los antiguos pueblos orientales usaban arena y barro poroso para filtrar el agua, también en Europa los romanos construyeron una red de acueductos y estanques, podían traer agua desde distancias próximas a los 90 km., instalaron filtros para obtener agua de mayor calidad, llegaban a separar el agua de buena calidad que usaban para beber y cocinar del agua de peor calidad, obtenida de otras fuentes, que utilizaban para riego y limpiezas, hecho que hoy día en la mayor parte de las ciudades aún no se separa y la misma agua que se emplea para beber se emplea para usos tales como la limpieza de inodoros. Hay registrados métodos para mejorar el sabor y el olor del agua 4.000 años antes de Cristo. Escritos griegos recomendaban métodos de tratamiento tales como filtración a través de carbón, exposición a los rayos solares y ebullición. En el antiguo Egipto dejaban reposar el agua en vasijas de barro durante varios meses para dejar precipitar las partículas e impurezas, y mediante un sifón extraían el agua de la parte superior (decantación), en otras ocasiones incorporaban ciertas sustancias minerales y vegetales para facilitar la precipitación de partículas y clarificar el agua (coagulación). En los comienzos del 1500 antes de Cristo, se tiene referencias de que los egipcios usaban ya un producto, que hoy se emplea para el mismo fin, el alumbre para lograr precipitar partículas suspendidas en el agua. **(Admin, 2019a)**

El primer sistema de suministro de agua potable a toda una ciudad, fue llevado a cabo por John Gibb, en 1804, quien logró abastecer de agua filtrada a la ciudad de Glasgow, Escocia. En 1806 se pone en funcionamiento en París una gran planta de tratamiento de agua, en esta planta se dejaba sedimentar el agua durante 12 horas y a continuación se procedía a su filtración mediante filtros de arena y carbón y en 1827 James Simplón construye en Inglaterra un filtro de arena para tratar y el agua potable. En 1829, en Londres (Chelsea), se construyó la primera planta de filtros lentos de arena hecha por “The Chelsea Water Work Corporation”. **(Admin, 2019a)**

El mayor empleo del proceso de filtración del agua en la época, llevó al conocimiento de que la filtración no solo conseguía una retención física de partículas, sino que también se degradaba la materia orgánica y posteriormente a partir de mediados del siglo XIX se fue conociendo más ampliamente el efecto de la filtración en el aspecto bacteriológico del agua. **(Admin, 2019a)**

Ya en el siglo XX de nuestra época se estableció la filtración como un efectivo medio para eliminar partículas del agua, aunque el grado de claridad conseguido no era medible en esta época. Al

comienzo del siglo XX en Europa se estableció de forma más regular la filtración lenta sobre arena. Durante la segunda mitad de este siglo XX los científicos alcanzaron grandes conocimientos sobre las fuentes y efectos de los contaminantes del agua potable (en 1855 se probó que el cólera era una enfermedad de transmisión hídrica al relacionarse con un brote surgido en Londres a consecuencia de la contaminación de un pozo público por aguas residuales). En 1880 Pasteur explicó cómo organismos microscópicos podían transmitir enfermedades a través del agua. En el siglo XX se descubrió que la turbiedad del agua no era solo un problema estético; las partículas en las fuentes del agua tales como la materia fecal, podría servir de refugio a los patógenos. Así como la filtración se mostró como un método de tratamiento efectivo para reducir la turbiedad, desinfectantes como el cloro jugaron un gran papel en la reducción del número de brotes epidémicos en los comienzos del siglo XX. En 1908 se empleó el cloro por primera vez como un desinfectante primario del agua potable de New Jersey (Doctor John L. Leal). Otro desinfectante como el ozono, también empezó a emplearse por estas fechas en Europa. A continuación aparecieron otras sustancias químicas procedentes de vertidos, generalmente industriales, contaminando las aguas objeto de abastecimiento público (mayoritariamente aguas superficiales) causando un gran impacto negativo y obligando a la implantación de técnicas de tratamiento del agua cada vez más efectivas y complejas (coagulación, floculación, adsorción con carbón activo, etc.) y a veces no han sido lo efectivas que se esperaban para eliminar algunos de los nuevos y emergentes contaminantes.

En 1972 un estudio encontró 36 sustancias químicas en el agua tratada en Louisiana (U.S) que fue tomada del río Misisipi. Como consecuencia de estas nuevas y mayores contaminaciones, hubo necesidad de aplicar nuevas legislaciones y requerimientos técnicos para salvaguardar la salud de los consumidores. Posteriores avances en la desinfección han puesto a punto nuevas técnicas y sustancias en el proceso de desinfección del agua como son principalmente el empleo de ozono, dióxido de cloro, cloraminas y radiación ultravioleta. **(Admin, 2019a)**

La filtración y la desinfección con cloro del agua potable han sido responsables de gran parte del 50% de aumento de la expectativa de vida en los países desarrollados durante el siglo XX. Este hecho motivó a la revista Life a citar recientemente a la filtración y la cloración del agua potable como probablemente el más significativo avance en salud pública del milenio. Antes de la llegada de la cloración para el tratamiento de agua potable, aproximadamente 25 de cada 100.000 personas morían anualmente los Estados Unidos a causa de la fiebre tifoidea. **(Admin, 2019a)**

Los sistemas de abastecimiento de agua potable sin tratar, o con un tratamiento inadecuado, siguen siendo la mayor amenaza para la salud pública, especialmente en los países en desarrollo, donde casi la mitad de la población consume agua contaminada. En estos países, enfermedades como el cólera, la tifoidea y la disentería crónica son endémicas y matan a niños y a adultos. En 1990 más de tres millones de niños menores de cinco años murieron por enfermedades diarreicas. Los más

recientes avances en el tratamiento del agua han sido las mejoras alcanzadas en el desarrollo de membranas para osmosis inversa y otras técnicas como la ozonización y otras relativas a la eliminación de los cada vez mayor número y cantidad de contaminantes encontrados en el agua potable. **(Admin, 2019a)**

Se denomina agua pre potable, al agua antes de ser sometida a los correspondientes tratamientos potabilizadores, agua potable al agua apta para el consumo humano, una vez que ha pasado por el correspondiente tratamiento potabilizador. El agua que es un compuesto natural, para ser consumida requiere hoy día una serie de operaciones que nos aseguren su vuelta a una calidad aceptable desde el punto de vista sanitario. No llega de forma casual y simple al domicilio de los usuarios.

El desarrollo de la sociedad reclama cada vez más agua, pero no solo a veces escasea el agua, sino que su calidad en los puntos donde se encuentra y capta, desgraciadamente se ha ido deteriorando día a día con el propio desarrollo, esto obliga a un tratamiento cada vez amplio y complejo técnicamente. La eliminación de materias en suspensión y en disolución que deterioran las características físico- químicas y organolépticas, así como la eliminación de bacterias y otros microorganismos que pueden alterar gravemente nuestra salud son los objetivos perseguidos y conseguidos en las estaciones de tratamiento a lo largo de todo un proceso que al final logra suministrar un agua transparente y de una calidad sanitaria garantizada. El tratamiento del agua es el proceso de naturaleza físico-química y biológica, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para el consumo o le comunican un aspecto o cualidad organoléptica indeseable y la transforma en un agua apta para consumir. Todo sistema de abastecimiento de aguas que no esté provisto de medios de potabilización, no merece el calificativo sanitario de abastecimiento de aguas. En la potabilización del agua se debe recurrir a métodos adecuados a la calidad del agua origen a tratar. Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) es la instalación donde se lleva a cabo el conjunto de procesos de tratamiento de potabilización situados antes de la red de distribución y/o depósito, que contenga más unidades de tratamiento. **(Admin, 2019a)**

1.3.2. Tipos de tratamientos.

Los tratamientos para potabilizar el agua, se pueden clasificar de acuerdo con: los componentes o impurezas a eliminar, los parámetros de calidad y lo grados de tratamientos de agua. Según estos aspectos, los procesos unitarios necesarios para la potabilización del agua en función de sus componentes serían los siguientes:

Tabla1.2: Procesos a llevar a cabo en función de los contaminantes presentes.

Contaminante	Tipo de operación unitaria
--------------	----------------------------

Sólidos gruesos	Desbaste
Partículas coloidales	Coagulación + Floculación + Decantación
Sólidos en suspensión	Filtración
Materia Orgánica	Afino con Carbón Activo
Amoniaco	Cloración al Breakpoint
Gérmenes Patógenos	Desinfección
Metales no deseados (Fe, Mn)	Precipitación por Oxidación
Sólidos disueltos (Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺)	Osmosis Inversa

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3. Parámetros de calidad.

Las aguas superficiales destinadas al consumo humano se clasifican según el grado de tratamiento al que se deben someter para su potabilización, en los grupos siguientes:

Tipo A1: Tratamiento físico simple y desinfección

Tipo A2: Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección

Tipo A3: Tratamiento físico y químico intensivo, afino y desinfección

Considerando un agua superficial, de río, embalse, o subterránea, con unos problemas de calidad que estimamos como convencionales, el proceso o línea de tratamiento, considerado también convencional, consta de una serie de etapas más o menos complejas en función de la calidad del agua bruta objeto del tratamiento y se recogen en las siguientes secuencias:

- Preoxidación y desinfección inicial con cloro, dióxido de cloro u ozono, o permanganato potásico.
- Coagulación-Floculación, con sales de aluminio o de hierro y coadyuvantes de la floculación (polielectrolitos, polidaddmas) coagulación con cal, sosa, o carbonato sódico.
- Decantación, en diversos tipos de decantadores.
- Filtración sobre arena, o sobre lecho mixto (arena y antracita) y en determinados casos sobre lecho de carbón en grano.
- Acondicionamiento, corrección del pH por simple neutralización o por remineralización con cal y gas carbónico.
- Desinfección final con cloro, cloraminas, dióxido de cloro u ozono.

Las instalaciones de tratamiento se completan, a veces, con la adición de carbón activo en polvo, para la eliminación de sustancias que provocan la aparición de olores y sabores, la adición de permanganato potásico para la eliminación de hierro y manganeso y en casos más conflictivos y constantes de presencia de sustancias orgánicas, así como otras que pueden originar olores y sabores, se llega a la instalación de filtros de carbón activo en grano tras los filtros de arena. Hoy en día el tratamiento no solo tiene que seguir y mejorar el tratamiento convencional, sino que deberá abordar las nuevas causas de contaminación que no puedan eliminarse con los métodos convencionales, recurriendo a otros métodos e incluso empleando otros reactivos complementarios. El tratamiento del agua y en especial la desinfección (hasta ahora generalmente con cloro) ha sido responsable en gran medida del 50% de aumento de las expectativas de vida en los países desarrollados a lo largo del siglo XX. La eficacia del tratamiento del agua en la reducción de las enfermedades que esta transmite depende de la calidad del agua en origen y del proceso seguido en el sistema de tratamiento. Los agentes patógenos transmitidos por el agua, que pueden causar enfermedades, provienen generalmente de sistemas hídricos con inadecuado tratamiento, especialmente desinfección y filtración. En el esquema siguiente se representan las fases del proceso de tratamiento convencional. **(Admin, 2019a)**

Tabla 1.3. Reducción de microorganismos patógenos en los distintos procesos de tratamiento

Sedimentación	0 - 99 %
Coagulación	Significativo
Filtración	0 - 99 %
Coagulación, sedimentación y filtración rápida	60 - 100 %
Coagulación, filtración en 2 medios (arena y C.A)	> 99%
Filtros lentos de arena	40 - 100 %
Filtros de carbón activado granular	0 - 60 %
Ósmosis Inversa	90 - 100 %
Ultrafiltración	90 - 100%
Cloración	99 %

Fuente: **(Admin, 2019a)**

1.4. Conceptos teóricos de desmineralización e intercambio iónico.

La desmineralización consiste en la conversión de sales presentes en el agua a sus respectivos ácidos por intercambio de cationes de hidrógeno y la eliminación de estos ácidos por medio de intercambiadores aniónicos dando como producto final, un agua desmineralizada la cual es el resultado de la neutralización de los cationes de hidrógeno y aniones hidroxilo. Los principios de

desmineralización del agua son idénticos a los de ablandamiento, esta operación fue una de las primeras aplicaciones del intercambio iónico y actualmente es una de las principales aplicaciones.

Los principios básicos del intercambio iónico no han cambiado, pero, los materiales usados han mejorado mucho. Las resinas de mayor aplicación son las de poli estireno con grupos sulfónicos, esta resina tiene elevada capacidad, excelente estabilidad y mediana selectividad para iones distintos del Ca^{++} y Mg^{++} que normalmente están presentes en las aguas naturales. **(Dominguez, 2006)**

Las únicas diferencias son: se utilizan resinas catiónicas y aniónicas simultáneamente y las resinas están en las formas ácidas y básicas respectivamente. Al utilizar resinas en las formas ácida y básica, los iones liberados son hidrógeno e hidroxilo respectivamente. **(Dominguez, 2006)**

1.4.1. Intercambio Iónico.

1.4.1.1. Fundamento.

Este proceso consiste en aprovechar la capacidad que tiene las resinas de intercambiar iones entre una fase sólida y una fase líquida en forma reversible, es decir que regresa a su estado original y sin cambio permanente en la estructura del sólido. **(Dominguez, 2006)**

Generalmente, la gran utilidad del intercambio iónico descansa en el hecho de usar una y otra vez los materiales de intercambio iónico puesto que el material intercambiador puede ser regenerado ya que el cambio que sufre en la “fase de operación” no es permanente. **(Dominguez, 2006)**

Las resinas de intercambio iónico están constituidas de dos partes principales: una parte estructural (matriz polimérica) y una parte funcional, que comprende el grupo iónico activo que tiene, a su vez un ión fijo y un ión móvil.

La parte de los intercambiadores iónicos comerciales son de material plástico sintético, como polímeros de estireno y divinil benceno. Los intercambiadores iónicos para el tratamiento de agua son: en esencia insoluble y su vida útil esperada es de 5 a 10 años.

Para ser útil un material de intercambio iónico debe reunir cierto número de requerimientos básicos, mucho de los cuales están interrelacionados de tal manera que no es posible cambiar uno sin alterar el otro. **(Dominguez, 2006)**

- El intercambiador debe tener una “alta capacidad total”, es decir que tenga un grado de sustitución iónica bastante elevado.
- La resina debe estar “químicamente estructurada” como para manifestar buenas características de equilibrio al manejar solutos.
- La resina debe estar diseñada para operar en un rango adecuado de pH y tener un grado suficiente de selectividad.

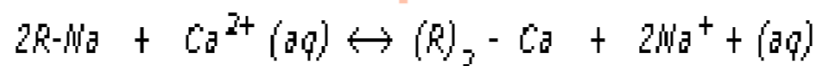
- Sus propiedades cinéticas (determinado por sus grupos funcionales y por su estructura reticular) deben ser tales que la resina mantenga una alta capacidad operativa.
- La resina debe ser extremadamente insoluble ya que de lo contrario el producto sería alterado en calidad.
- Debe tener una buena estabilidad química, esto es resistencia a los ataques de ácidos y bases, oxidación, reducción o radiación.
- Es necesario también una buena estabilidad física, las fuerzas impuestas a una resina provienen de la presión hidráulica, presión osmótica, que resulta de los cambios de volúmenes causados por los cambios electrolíticos y de la concentración de los electrolitos y fuerzas puramente mecánica.
- Es muy importante que la resina debe estar disponible a un precio tal que haga rentable el proceso.

El intercambio iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su estructura, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente regenerante que contiene iones deseables, los mismos que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material en condiciones útiles de operación. **(Villega, 2002)**

Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado regeneración, enjuagado y servicio.

1.4.2. Cómo funcionan los intercambiadores iónicos. Reacción de intercambio iónico.

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ión de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico. Esta reacción se puede ilustrar con la siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ión sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ión calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz. **(Dominguez, 2006)**



A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ión en particular, el pH de la disolución, si

el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura etc. Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa.

Este movimiento se conoce como proceso de difusión. La difusión de un ión está en función de su dimensión, carga electrostática, la temperatura y también está influenciada por la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, de más concentrado a menos, hasta que tengan la misma concentración.

1.4.3. Parámetros característicos de los intercambios iónicos.

Capacidad de intercambio

Se define como la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales. Depende del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz y se expresa en equivalentes por litro de resina, o por gramo. (Un equivalente es el peso molecular en gramos del compuesto dividido por su carga eléctrica).

- Capacidad específica teórica

Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución

- Selectividad

Propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ión que por otro. La selectividad de una resina por un ión determinado se mide con el coeficiente de la selectividad K , depende de las interacciones electrostáticas que se establezcan entre el ion y el intercambiador y de la formación de enlaces con el grupo ionogénico.

La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme los enlaces más fuertes. La estructura de poro y la elasticidad del intercambiador también influye en su selectividad, como ocurre con las zeolitas. Su estructura de poro rígida les permite actuar como tamices moleculares, impidiendo la entrada de ciertos iones sencillamente por su tamaño.

(Dominguez, 2006)

1.4.4. ¿Cómo se trabaja con los intercambiadores iónicos?

1.4.4.1. Técnicas generales

El tratamiento de una disolución con un intercambiador iónico se puede llevar a cabo mediante dos configuraciones distintas, en discontinuo o en columna.

- Intercambio iónico en discontinuo

En las operaciones en discontinuo, se mezcla el intercambiador y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcanza el equilibrio. Esta configuración no puede aplicarse para devolver el intercambiador a su forma iónica original, ya que el proceso de regeneración en discontinuo no es químicamente eficiente. Es necesario recuperar el intercambiador por decantación y transferirlo a una columna para proceder a su regeneración. Este método, a pesar de ser muy eficiente, tiene pocas aplicaciones industrial

- Intercambio iónico en columna

El intercambio en columnas es la que se emplea más a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar.

1.4.4.2. Etapas del proceso de intercambio iónico en columna.

- Empaquetamiento de la columna

Consiste en introducir el intercambiador en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para así obtener un lecho uniforme. Esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada, que además resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de swelling. El swelling puede causar graves problemas si tiene lugar una vez que el intercambiador se encuentra confinado en la columna y no se ha dejado espacio suficiente para alojarlo una vez que ha incrementado su volumen.

- Acondicionamiento del intercambiador

Muchas resinas comerciales se venden en una forma iónica que puede no ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por ejemplo, una resina básica fuerte que tenga como contraión un grupo OH_- y que, por necesidades del proceso, sea deseable tener un ión Cl^- . En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una

disolución concentrada del ión que se desea tener. Una vez que se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada.

- Etapa de carga

En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y el intercambiador. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través del intercambiador.

Las condiciones de operación (velocidad de flujo, pH de la disolución etc.) dependerán del tipo de intercambiador utilizado, y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento en cuanto a capacidad y selectividad. Cuando el intercambiador comienza a estar saturado con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna.

Esta descarga de iones se conoce como breakthrough, e indica que el tratamiento de la disolución por el intercambiador ya no está siendo efectivo. Una vez que la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la concentración de entrada, el intercambiador ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación.

- Etapa de regeneración

La etapa de regeneración consiste en devolver el intercambiador saturado a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ión originalmente asociado al intercambiador (por ejemplo, un ácido mineral para una resina ácida fuerte). Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento del intercambiador en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente. Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como la concentración y volumen de disolución regenerante así como la velocidad de flujo.

La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

El gasto económico en regenerante: Puede reducirse reutilizándolo hasta que pierda su eficiencia aunque esta opción tampoco es del todo económica ya que implica establecer unas condiciones para su almacenaje.

La generación de residuos: después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas. (Salán, 2013)

1.4.4.3. Modos de operación en el intercambio iónico en columna.

En los procesos de intercambio iónico en columna se puede trabajar de dos modos:

- Las disoluciones de carga y de regeneración se introducen siempre por la parte superior de la columna. Ver figura 1.

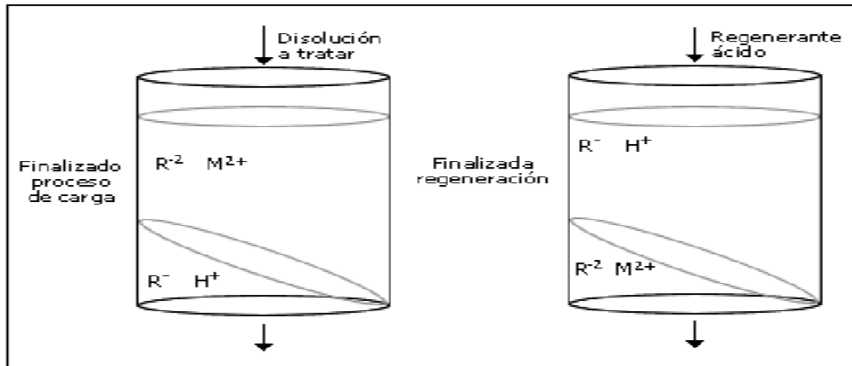


Figura 1.1: Esquemas de las entradas de carga y regenerantes.

- El regenerante se introduce en dirección opuesta a la disolución de carga, es decir, por la parte inferior de la columna. Este proceso se denomina, proceso a contracorriente.

Ver figura 1.2.

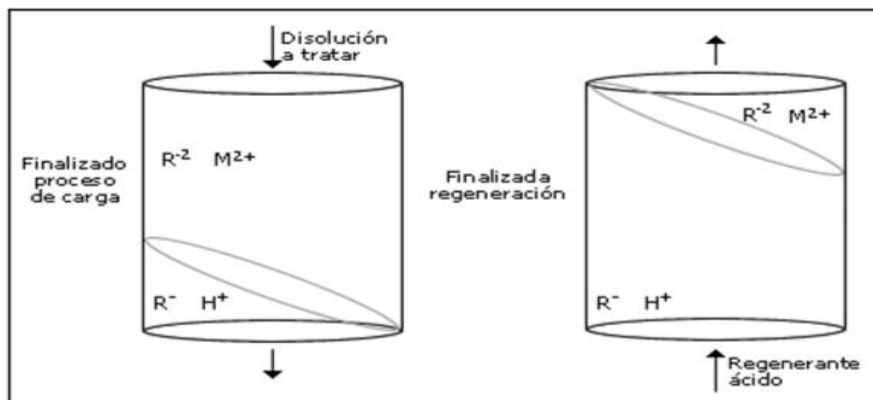


Figura 2: Regeneración a contracorriente.

Fuente: (Dominguez, 2006)

El procedimiento más habitual es el primero, ya que supone un equipamiento más barato que el segundo. No obstante, este modo de operación utiliza el regenerante menos eficientemente que el proceso en contracorriente. En éste, al pasar el regenerante de abajo hacia arriba, se fluidiza el lecho de intercambiador, de manera que se aumenta la superficie de contacto, la regeneración es más rápida y se necesita menos volumen de regenerante. (Dominguez, 2006)

1.4.5. Las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de aguas.

Las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de aguas son las siguientes:

- Se adapta a las necesidades de las aguas en que las concentraciones de las impurezas iónicas son relativamente bajas.
- Las resinas actuales tienen altas capacidades de intercambio que permiten conseguir procesos compactos requiriendo inversiones moderadas.
- Las resinas son estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración.
- Las instalaciones pueden ser automáticas o manuales para adaptarse a las condiciones específicas. La capacidad teórica de intercambio de una resina es la cantidad de grupos ionogénicos por unidad de peso o de volumen.

Dado que las resinas se hinchan y contraen según la forma iónica, la referencia al peso es mucho más constante, pero se suele usar la capacidad volumétrica de la forma completamente hinchada, expresada en meq/litro. La capacidad aparente es un valor práctico que indica cuántos iones de la solución pueden ser captados realmente bajo las condiciones específicas de operación.

La capacidad aparente de una resina catiónica para el Na^+ por ejemplo, depende del pH de la solución, de la concentración de Na^+ en la solución y del nivel de regeneración o volumen de regenerante empleado. Pero, además, situada en el recipiente de intercambio, dependerá de la fuga de ión Na^+ que se considere admisible.

Es importante considerar que los vertidos de la regeneración son corrosivos y en general, aún después de mezclarlos, se precisará una neutralización previa al envío del efluente como vertido. (Dominguez, 2006)

1.5. Conclusiones parciales.

1. El agua para la producción de cervezas artesanales debe tener una dureza total de 116 a 207 mg/l (CaCO_3) y en el caso de las cervezas oscuras no necesita tratamiento.
2. El agua para uso en servicios auxiliares tales como producción de vapor limpieza y enfriamiento requiere una dureza total de 0 mg/l (CaCO_3).
3. La resina adecuada para eliminar la dureza y los iones de calcio y magnesio es la de tipo catiónica y las de lecho mixto.

Capítulo 2:

Desarrollo experimental.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1. Evaluación del agua con que se surte la fábrica.

El agua con que se surte la fábrica de cerveza artesanal proviene del acueducto de la ciudad la cual tiene un tratamiento previo, pero mantiene altos niveles de dureza ya que en su mayoría proviene de aguas subterráneas. De esta agua se tomó una muestra y se le determinaron los principales parámetros de calidad.

En la tabla 2.1 se comparan los parámetros de calidad de dicha agua con los parámetros internos de calidad para la producción de cerveza artesanal.

Tabla 2.1: Comparación de los parámetros de calidad del agua cruda con los parámetros internos de calidad.

Parámetro	Agua cruda	Norma interna de elaboracion de cervezas	Norma interna para servicios
pH	7.56	6.5-8.5	6.5-8.5
Conductividad (µs)	968	*200-625	-
Dt mg/L de CaCO ₃	472	*116-207	0
Concentración de Ca 100 (mg/L)		*30-50	0
Concentración de Mg 54 (mg/L)		*10-20	0
STD (mg/L)	619.72	250-400	-
Concentración de 30.10 Cloruros (mg/L)		0-35	-

Fuente: Elaboración propia.

*En el caso del agua para la producción de cervezas oscuras y malta la dureza total dada por la concentración de Ca y Mg no requiere reducción.

Como se puede apreciar en la tabla anterior el agua cruda no cumple con ningún parámetro de la norma interna de calidad para la producción de cervezas artesanales ni para servicios excepto la concentración de cloruros y el pH. Por lo que los esfuerzos estarán encaminados a reducir y eliminar la presencia de estos contaminantes en el agua para llevarla a los parámetros correctos para su utilización en el proceso, principal objetivo de este estudio.

2.2. Evaluación del intercambiador iónico.

Luego de instalar el intercambiador iónico, se trató un flujo de agua de la cual se tomaron muestras y se le determinaron los principales parámetros de calidad. Los resultados se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros de calidad medidos al agua antes y después de tratada.

Parámetro	Agua cruda	Agua tratada
pH	7.56	7.79
Conductividad (μS)	968	943
Dt (mg/l) de CaCO_3	472	472
Concentración de Ca (mg/L)	100	100
Concentración de Mg (mg/L)	54	54
STD (mg/L)	619.72	603.52
Concentración de Cloruros	30.10	28.3

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla el agua tratada aumento su pH y disminuyó en pequeñas cantidades la concentración de cloruros, lo cual se debe a que es una resina anionica, sin embargo, se logró remover pocos iones cloruros lo que da señales de que la resina esta agotada o vencida, la concentración de calcio y magnesio así como la dureza total no fueron removidas debido a que estos cationes solo pueden ser removidos con una resina de tipo catiónicos, por lo que podemos afirmar que se necesita cambiar la resina por otra de tipo catiónica o de lecho mixto.

2.2.1. Análisis de la resina del intercambiador iónico de la fábrica.

Luego de confirmar que la resina es de tipo aniónica y no sirve para lograr el objetivo propuesto, para comprobar el estado de la resina de aniónica se le hicieron pruebas en el laboratorio. Para esto se utilizarón los siguientes materiales y métodos:

- Procedimiento para evaluar la calidad de la resina de intercambio aniónico.

Para evaluar la calidad de la resina se tomó una muestra del intercambiador y utilizando una columna (bureta) de 1.5 cm de diámetro y 40 cm de altura, se le colocó una cama de resina de 30 cm de altura con lana de vidrio en el fondo para impedir que se escapen los granos de resina (ver anexo 4). Luego se le hizo pasar un solución de 10 % de NaOH a un flujo de 3 mL/min (4 veces volumen de resina/hora) durante 30 minutos y se tomaron muestras cada 2 minutos a las cuales se les midió la conductividad con un conductímetro marca HANNA y modelo EC 215. Los valores de conductividad

en mS/cm fueron convertidos a ppm SDT (sólidos disueltos totales) equivalente (mg/L) empleando el conversor de unidades (**LENNTECH, 2017**)

Nota: Para los experimentos de intercambio iónico en continuo a escala de laboratorio, se utilizó una columna con un diámetro interior (D) 0,015 m y una altura 0,40 m, la altura de la cama de resina 0,3 m y el diámetro de partícula va de 0.1 a 0.5 mm en estos tipos de resina. (**Treybal, 1985**), reporta que en columnas modelo, se deben cumplir dos condiciones de diseño: que la relación diámetro interior de la columna/diámetro de partícula, sea igual o mayor a 25 (evita efectos de canalizaciones y reduce el mezclado axial) y que la relación altura/diámetro interior de la columna sea superior a 4. Lo anterior se cumple en las columnas usadas para desarrollar los experimentos a escala de laboratorio ya que:

$$25 \leq \frac{D}{dp} \leq 150 \quad y \quad \frac{h}{D} = 20$$

Los resultados obtenidos se muestran en la siguientes figuras.

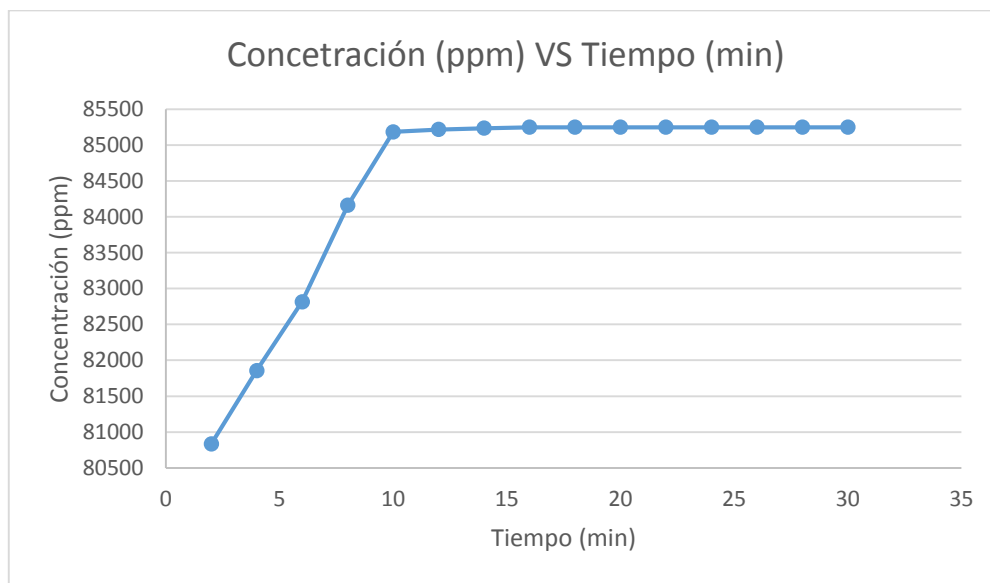


Figura 2.1: Relación de la concentración vs tiempo transcurrido.

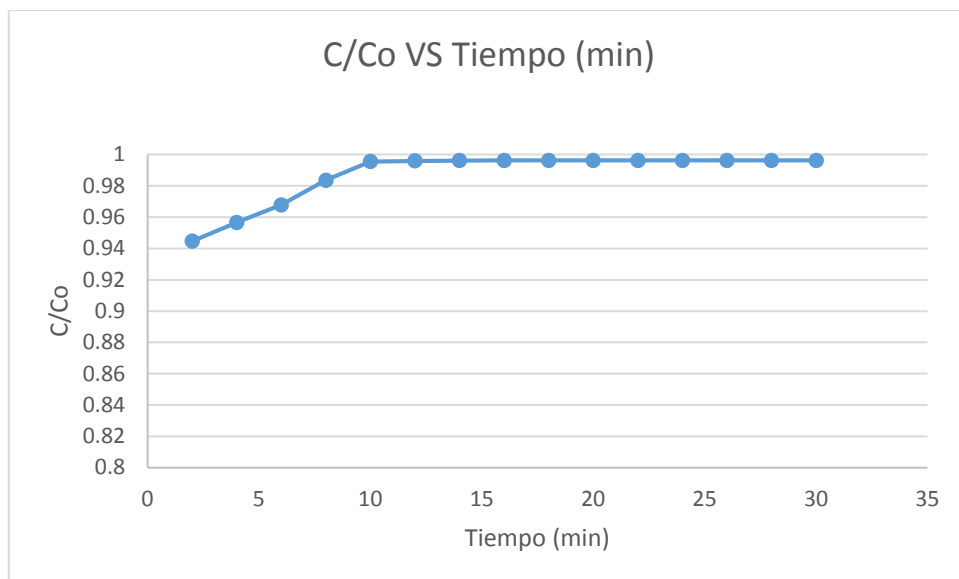


Figura 2.2: Relación de la C/Co vs tiempo transcurrido.

Como se puede observar en la figura 2.1 la concentración de la disolución disminuye con respecto a la de la entrada pero en pequeñas cantidades y rápidamente empieza a aumentar hasta que se acerca a los valores iniciales de concentración además en la figura 2.2 se observa como la relación C/Co (concentración/concentración inicial) tiene como punto mínimo 0.94 lo cual es un valor muy alto, lo que significa que la resina perdió sus propiedades regenerantes, además luego de regenerarla se trató el agua y al medir su concentración se observó que no se vió disminuida por lo que se puede decir que esta resina está vencida, y además este modelo no sirve ya que es de tipo aniónico y se necesita una resina que elimine los cationes del agua para eliminar su dureza.

2.3. Valoración de otros tipos de resina.

Para poner en correcto funcionamiento el intercambiador iónico se valora utilizar otro tipo de resina de tipo catiónica o mixta para esto se evaluaron diferentes modelos de resina utilizadas para el ablandamiento del agua, las cuales se relacionan a en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Relación de las resinas utilizadas.

Marca	Modelo	Tipo
Amberlita	IRC-50	Catiónica Ciclo Hidrógeno
Amberlita	MB-150	Lecho Mixto
Merck	4836	Lecho Mixto

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las fichas técnicas de las resinas seleccionadas se adjuntan en los anexos

Todas la resinas relacionadas en la tabla anterior son resinas tipo gel catiónica fuertemente ácida de elevada pureza y resinas de tipo lecho mixto diseñada especialmente para el ablandamiento o suavización del agua potable para uso en alimentos, bebidas, consumo humano y residencial en general, además, presentan excelente resistencia física y química, rangos de Ph de 2 hasta 14 además de que pueden trabajar hasta temperaturas de 140^oC lo cual no es necesario ya que la columna objeto de estudio trabaja a temperatura ambiente .

2.3.1. Evaluación de la resina Amberlita MB-150.

Para la evaluación de esta resina de intercambio iónico se utilizó una columna de 1.5 cm y y 40 cm, a un flujo de 40 veces el volumen de la cama / hora (35 mL/min) y una altura de 30 cm. Dicha resina tuvo buen por ciento de remoción, pero se hacía necesario mucho volumen de agua para llegar al punto de ruptura y la resina se agotará por lo que se procedió a cambiar la altura de la cama a 7 cm que es la altura mínima permisible para una columna de este diametro ya que cumple lo reportado por (Treybal, 1985) y un flujo de operación de 8 mL/min. Los resultados se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Resultados de cambio de conductividad empleando a la resina Amberlite MB150.

Volumen efluente (ml)	Conductividad (μS)	Concentración (mg/L-ppm)
100	150	96
200	160	102.4
300	346	221.44
400	533	341.12
500	702	449.28
600	830	531.2
700	898	574.72
800	923	590.72
900	925	592
1000	934	597.76
1100	942	602.88
1200	965	617.6

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en esta tabla se construyó la onda de adsorción que se muestra en la figura 2.3.

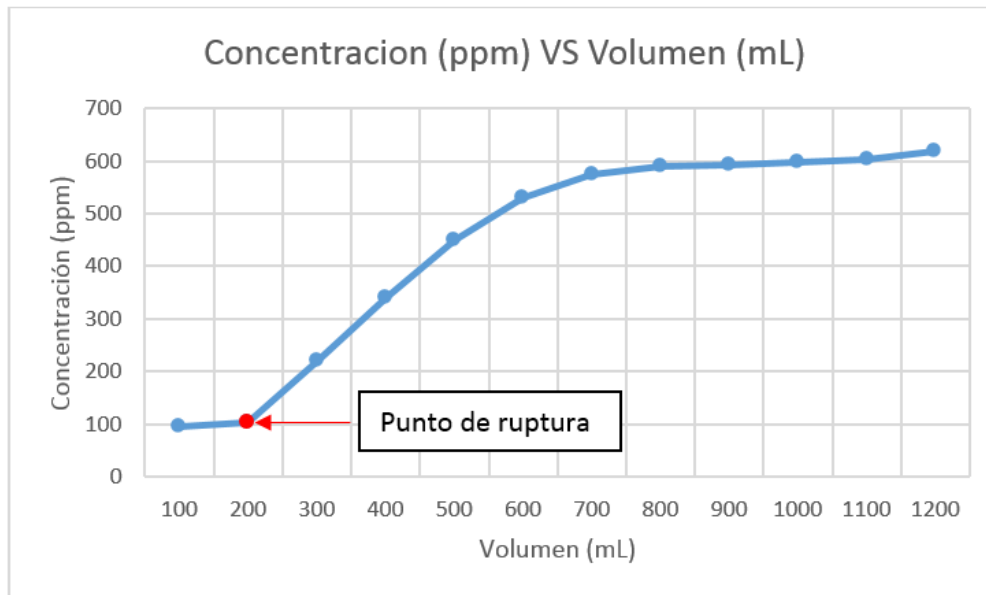


Figura 2.3: Onda de adsorción (Amberlite MB150).

En la figura 2.3 se puede observar la onda de adsorción correspondiente, donde se ve que el punto de ruptura se encuentra en el valor de 102.4 ppm para un volumen de efluente de 200 mL, cuando se llega a este valor se recomienda regenerar la resina o sustituirla por una nueva, se aprecia que la resina empleada llega a agotarse completamente ya que se alcanza el valor inicial de concentración, pero para un volumen muy pequeño de efluente, debido a que la resina había sido empleada en el experimento anterior.

✓ Determinación de la densidad aparente (Prueba en probeta):

Se utilizó una probeta seca y limpia, luego se adicionó una masa de resina hasta un determinado volumen, luego se pesó la probeta con todo su contenido y por diferencia se obtuvo la masa de resina en la probeta. La densidad aparente en g/mL se obtiene según la ecuación 2.1:

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Masa de resina}}{\text{Vol.de resina}} \quad (2.1)$$

El volumen de resina se calculó teniendo la altura de la cama de resina y el diámetro de la probeta según la ecuación 2.2:

$$V_r = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.2)$$

Por lo tanto :

$$\rho_{ap} = 0.688 \frac{g}{mL}$$

✓ Cálculo de la porosidad,

La porosidad (ε) se calcula a partir de la ecuación 2.3:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (2.3)$$

Donde: ρ real es la densidad real tomada como un promedio entre la densidad real de una resina catiónica fuerte y una aniónica fuerte (proporcionadas en ficha técnica por el fabricante) debido a que la usada es una mixta (1,135 g/mL); ρ_{ap} es la densidad aparente calculada anteriormente. **(ROSABAL, 2006)** refieren que la densidad aparente siempre es menor que la densidad real de las partículas, debido a los espacios vacíos existentes entre dichas partículas que forman el conglomerado. La porosidad y la densidad aparente de un material dependen generalmente del grado de compactación del conglomerado, es decir, de la presión externa que se ejerza sobre el mismo. Los valores obtenidos están en correspondencia a lo planteado por esta fuente.

Por tanto:

$$\varepsilon = 0.39$$

✓ Cálculo de la capacidad de adsorción del lecho.

La capacidad de adsorción del lecho puede determinarse empleando la ecuación 2.4:

$$q = \frac{V(C_0 - C_b)}{V_r} \quad (2.4)$$

Donde:

V: volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en L

C_0 : concentración inicial, en mg/L

C: concentración en el punto de ruptura, en mg/L

V_r : volumen de resina, en L

q: capacidad de adsorción del lecho, en mg adsorbido/L de resina.

Como resultado de este cálculo se obtiene que el lecho tiene una capacidad de adsorción de 8354.75 mg/L de resina, valor aceptable considerando que se utilizó la resina previamente utilizada

✓ Porcentaje total de remoción de iones durante la operación de la columna.

El porcentaje total de iones retenidos durante la operación de la columna cuando se alcanza el punto de ruptura se obtiene por la ecuación 2.5:

$$\%_{remoción} = \frac{C_o - C_b}{C_o} * 100 \quad (2.5)$$

Al aplicar la ecuación anterior se obtiene como resultado que se logra un cambio en la conductividad de 83 %.

2.3.2. Evaluación de la resina Merck 4836.

Para la evaluación de esta resina de intercambio iónico se utilizó una columna con las mismas dimensiones que la utilizada en experimentos anteriores, trabajando a un flujo de 40 veces el volumen de la cama / hora (8 mL/min), según especificaciones de la ficha técnica de la resina(anexo #) y la altura de la cama de 7 cm que es la altura mínima permisible para una columna de este diametro ya que cumple lo reportado por (Treybal, 1985). Los resultados se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Resultados de cambio de conductividad empleando a la resina Merck 4836

Volumen efluente (ml)	Conductividad (μS)	Concentración (mg/L-ppm)
100	241	154.24
200	342	218.88
300	352	225.28
400	353	225.92
500	554	354.56
600	791	506.24
700	918	587.52
800	930	595.2
900	943	603.52
1000	967	618.88

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en la tabla se construyó la onda de adsorción que se muestra en la figura 2.4.

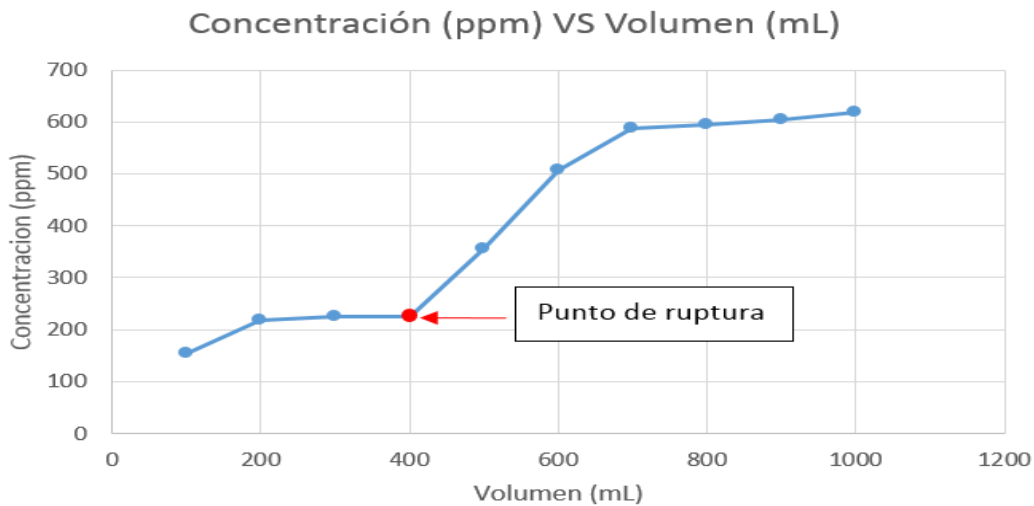


Figura 2.4: Onda de adsorción (Merck 4836)

En la figura 2.4 se puede observar la onda de adsorción correspondiente, donde se ve que el punto de ruptura se encuentra en el valor de 225.92 ppm para un volumen de efluente de 400 mL, cuando se llega a este valor se recomienda regenerar la resina o sustituirla por una nueva, además se aprecia que la resina empleada llega a agotarse completamente ya que se alcanza el valor inicial de conductividad.

✓ Determinación de la densidad aparente (Prueba en probeta):

Se uso una probeta seca y limpia, luego se adiciono una masa de resina hasta un determinado volumen, luego se pesó la probeta con todo su contenido y por diferencia se obtuvo la masa de resina en la probeta. La densidad aparente en g/mL se obtiene según la ecuación 2.1:

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Masa de resina}}{\text{Vol.de resina}} \quad (2.1)$$

El volumen de resina se calculó teniendo la altura de la cama de resina y el diametro de la probeta según la ecuación 2.2:

$$Vr = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (2.2)$$

Por lo tanto :

$$\rho_{ap} = 0.72 \frac{g}{mL}$$

✓ Cálculo de la porosidad.

La porosidad (ϵ) se calcula a partir de la ecuación 2.3:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (2.3)$$

Donde:

ρ_{real} es la densidad real tomada como un promedio entre la densidad real de una resina catiónica fuerte y una aniónica fuerte (proporcionadas en ficha técnica por el fabricante) debido a que la usada es una mixta (1,135 g/mL)

ρ_{ap} es la densidad aparente calculada anteriormente.

(ROSABAL, 2006) refiere que la densidad aparente siempre es menor que la densidad real de las partículas, debido a los espacios vacíos existentes entre dichas partículas que forman el conglomerado. La porosidad y la densidad aparente de un material dependen generalmente del grado de compactación del conglomerado, es decir, de la presión externa que se ejerza sobre el mismo. Los valores obtenidos están en correspondencia a lo planteado por esta fuente.

Por tanto:

$$\varepsilon = 0.365$$

✓ Cálculo de la capacidad de adsorción del lecho.

La capacidad de adsorción del lecho puede determinarse empleando la ecuación 2.4:

$$q = \frac{V \cdot (C_o - C_b)}{V_r} \quad (2.4)$$

Dónde: V: volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en L

C_o : concentración inicial, en mg/L; C: concentración en el punto de ruptura, en ppm

V_r : volumen de resina, en L

q: capacidad de adsorción del lecho, en mg adsorbido/L de resina

Como resultado de este cálculo se obtiene que el lecho tiene una capacidad de adsorción de 12713.3 mg/L de resina

✓ Porcentaje total de remoción de iones durante la operación de la columna:

El porcentaje total de iones retenidos durante la operación de la columna cuando se alcanza el punto de ruptura se obtiene por la ecuación 2.5:

$$\%_{remoción} = \frac{C_o - C_b}{C_o} * 100 \quad (2.5)$$

Al aplicar la ecuación anterior se obtiene como resultado que se logra un cambio en la conductividad de 63%.

2.3.3. Evaluación de la resina Amberlita IRC-50.

Para la evaluación de esta resina de intercambio iónico se utilizó una columna con las mismas dimensiones que la utilizada en experimentos anteriores, trabajando a un flujo de 40 veces el volumen de la cama / hora (8 mL/min), según especificaciones de la ficha técnica de la resina y la altura de la cama de 7 cm que es la altura mínima permisible para una columna de este diámetro ya que cumple lo reportado por (Treybal, 1985). Los resultados se muestran en la tabla 2.6

Tabla 2.6: Resultados de cambio de conductividad empleando a la resina Amberlita IRC-50

Volumen efluente (ml)	Conductividad (μS)	Concentración (ppm-mg/L)
60	270	172.8
120	275	176
180	275	176
240	280	179.2
300	285	182.4
360	291	186.24
420	302	193.28
480	310	198.4
540	318	203.52
600	322	206.08
660	327	209.28
720	331	211.84
780	335	214.4
840	338	216.32
900	346	221.44
960	346	221.44
1020	349	223.36
1080	350	224
1140	350	224
1200	351	224.64
1260	382	244.48
1320	418	267.52

1380	440	281.6
1440	463	296.32
1500	489	312.96
1560	499	319.36
1620	520	332.8
1680	539	344.96
1740	589	376.96
1800	604	386.56
1860	640	409.6
1920	668	427.52
1980	695	444.8
2040	758	485.12

Fuente: Elaboración Propia.

Con los resultados obtenidos en la tabla se construyó la onda de adsorción que se muestra en la figura 2.5.

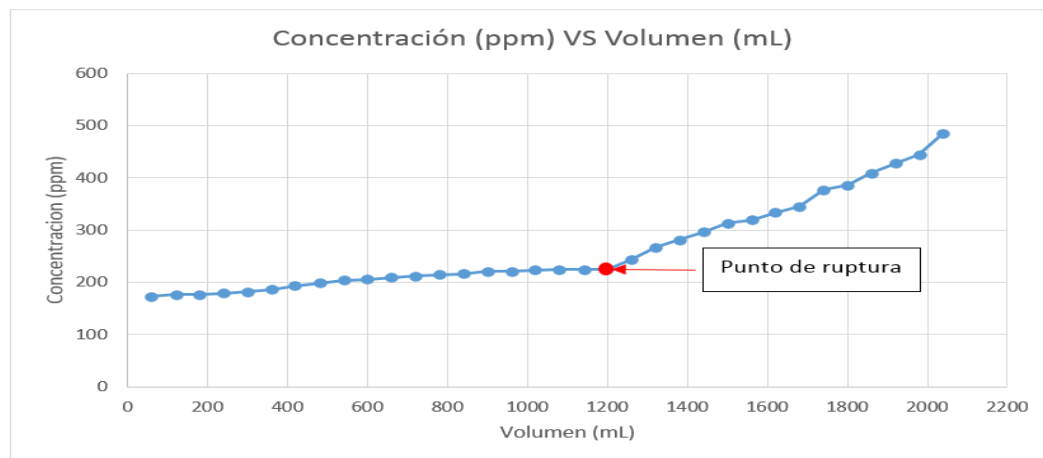


Figura 2.5: Onda de adsorción (Amberlita IRC-50)

En la figura 2.5 se puede observar la onda de adsorción correspondiente, donde se ve que el punto de ruptura se encuentra en el valor de 224.64 ppm para un volumen de efluente de 1200 mL, cuando se llega a este valor se recomienda regenerar la resina o sustituirla por una nueva, además se aprecia que la resina empleada no llega a agotarse completamente ya que no se alcanza el valor inicial de conductividad. Lo cual hubiese sido posible si el volumen de agua tratada hubiese sido mayor.

- ✓ Determinación de la densidad aparente (Prueba en probeta):

Se utilizó una probeta seca y limpia, luego se adicionó una masa de resina hasta un determinado volumen, luego se pesó la probeta con todo su contenido y por diferencia se obtuvo la masa de resina en la probeta. La densidad aparente en g/mL se obtiene según la ecuación 2.1:

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Masa de resina}}{\text{Vol.de resina}} \quad (2.1)$$

El volumen de resina se calculó teniendo la altura de la cama de resina y el diametro de la probeta según la ecuación 2.2:

$$V_r = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (2.2)$$

Por lo tanto :

$$\rho_{ap} = 0.61 \frac{g}{mL}$$

✓ Cálculo de la porosidad.

La porosidad (ε) se calcula a partir de la ecuación 2.3:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (2.3)$$

Donde: ρ real es la densidad real (proporcionadas en ficha técnica por el fabricante) (0.84 g/mL); ρ_{ap} es la densidad aparente calculada anteriormente. **(ROSABAL 2006)** refiere que la densidad aparente siempre es menor que la densidad real de las partículas, debido a los espacios vacíos existentes entre dichas partículas que forman el conglomerado. La porosidad y la densidad aparente de un material dependen generalmente del grado de compactación del conglomerado, es decir, de la presión externa que se ejerza sobre el mismo. Los valores obtenidos están en correspondencia a lo planteado por esta fuente.

Por tanto:

$$\varepsilon = 0.27$$

✓ Cálculo de la capacidad de adsorción del lecho.

La capacidad de adsorción del lecho puede determinarse empleando la ecuación 2.4:

$$q = \frac{V * (C_o - C_b)}{V_r} \quad (2.4)$$

Dónde: V: volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en L

C_o : concentración inicial, en mg/L

C: concentración en el punto de ruptura, en ppm

Vr: volumen de resina, en L

q: capacidad de adsorción del lecho, en mg adsorbido/L de resina

Como resultado de este cálculo se obtiene que el lecho tiene una capacidad de adsorción de 38458.2 mg/L de resina

✓ Porcentaje total de remoción de iones durante la operación de la columna.

El porcentaje total de iones retenidos durante la operación de la columna cuando se alcanza el punto de ruptura se obtiene por la ecuación 2.5:

$$\%_{remoción} = \frac{C_o - C_b}{C_o} * 100 \quad (2.5)$$

Al aplicar la ecuación anterior se obtiene como resultado que se logra un cambio en la conductividad de 63%.

2.4. Análisis de los resultados obtenidos por las tres resinas.

Luego de analizar los resultados obtenidos por los tres tipos de resinas se seleccionó que la resina catiónica Amberlita IRC-50 de ciclo hidrógeno era la más adecuada para tratar el agua ya que tiene una capacidad adsorptiva mayor que las demás y es más fácil de regenerar que las resinas mixtas las cuales necesitan ser separadas para regenerarse por separado, y el intercambiador que posee la fábrica no cuenta con esta tecnología.

2.5. Parámetros de calidad del agua tratada con la resina Amberlita IRC-50.

Luego de recolectar las muestras de agua tratada se seleccionaron dos muestras y se le hicieron pruebas al agua para determinar los principales minerales presentes los resultados se muestran en la tabla 2.7. (Gilles, 2001)

Tabla 2.7: Parámetros medidos a las muestras de agua tomadas.

Parámetros medidos	Muestra de agua antes del punto de ruptura	Muestra de agua después del punto de ruptura
Concentración de Mg (mg/L)	0	1.058
Concentración de Ca (mg/L)	0	2.13
Dureza total (mg/L)	0	9.67
Conductividad (µS)	275	351

Fuente: Elaboración propia

2.6. Determinación de la capacidad de regeneración de la resina Amberlita IRC-50.

Regularmente la eficiencia del proceso se ve afectada por una deficiente regeneración de la resina, esta trae consigo un gasto excesivo de agua y de regenerante con la consiguiente contaminación del medio ambiente, además de las pérdidas de tiempo y energía que esto conlleva. A través de la conductividad eléctrica se puede determinar la concentración de ácido clorhídrico presente en el efluente de la solución regenerante, que debe llegar al mismo valor de la solución de entrada. Lo anterior permite evaluar la regeneración de columnas de intercambio iónico empacadas con resinas fuertemente ácidas de ciclo hidrogeno, que se emplean para la remoción del calcio y el magnesio presentes en el agua.

En la investigación se realizó el seguimiento a la fase de regeneración de la resina Amberlita IRC-50 mediante los valores de conductividad eléctrica del efluente de la columna de intercambio iónico, relacionándolos con el valor de entrada de la solución regenerante (HCl). Para ello se utiliza un conductímetro marca HANNA previamente calibrado. Además, la inyección de la solución de HCl se realiza de forma manual a un flujo 4 veces el volumen de la cama/hora (1mL/min) según lo recomienda la ficha técnica

Se realizan las mediciones de la conductividad eléctrica del efluente cada 5 minutos durante el proceso de regeneración.

Se realizaron dos variantes experimentales donde se ajustó la concentración del HCl en la solución acuosa.

Variante número 1:

- ✓ Regeneración durante una hora con una solución al 5 % de HCl con un flujo de 1 mL/min

Variante número 2:

- ✓ Regeneración durante una hora con una solución al 2% de HCl con un flujo de 1 mL/min hasta que la concentración del efluente está próxima a la conductividad inicial de la solución de 2% y luego se sustituyó por la solución de 5% de HCl.

Los resultados de la variante número 1 se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: Resultados de la variante de regeneración número 1.

Tiempo de regeneración	Conductividad (mS)	C/Co (Conductividad)
5	1.98	0.1

10	2.97	0.15
15	4.356	0.22
20	7.524	0.38
25	10.692	0.54
30	13.365	0.675
35	15.642	0.79
40	16.632	0.84
45	17.82	0.9
50	18.612	0.94
55	19.008	0.96
60	19.2258	0.971

Fuente: Elaboración Propia.

Con los resultados obtenidos en la tabla anterior se construyó la curva de regeneración que se muestra en la figura 2.6.

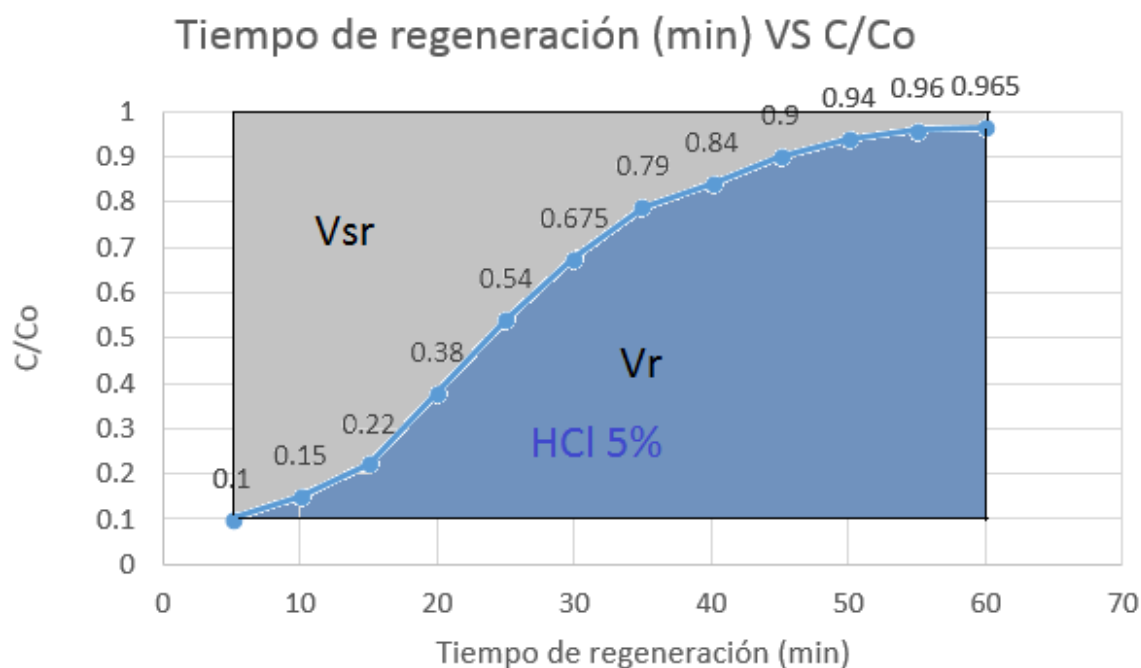


Figura 2.6 Curva de regeneración (Amberlita IRC-50) (variante 1). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.6 se puede observar que el área bajo la curva, correspondiente al volumen resina regenerada, aumentó considerablemente, llegando al 96.5% de regeneración en solamente 60 minutos. Se logró realizar la regeneración de la mayor parte de la resina alrededor de los 40 minutos quedando solo el 16% del volumen de resina sin regenerar evidenciándose con ello que el flujo usado es el adecuado. Además, se puede observar el comportamiento de la regeneración y el movimiento de la zona de transferencia de masa en el tiempo el cual aumentó considerablemente su velocidad de intercambio.

Los resultados de la variante número 2 se muestran en la tabla 2.9.

Tiempo de regeneración	Conductividad (mS)	C/Co (Conductividad)
5	1.9	0.10
10	2.87	0.14
15	4.21	0.21
20	7.49	0.38
25	9.99	0.50

30	13.1	0.66
35	15.43	0.78
40	16.38	0.83
45	17.69	0.89
50	18.4	0.93
55	18.87	0.95
60	18.97	0.96

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en la tabla anterior se construyó la curva de regeneración que se muestra en la figura 2.7.

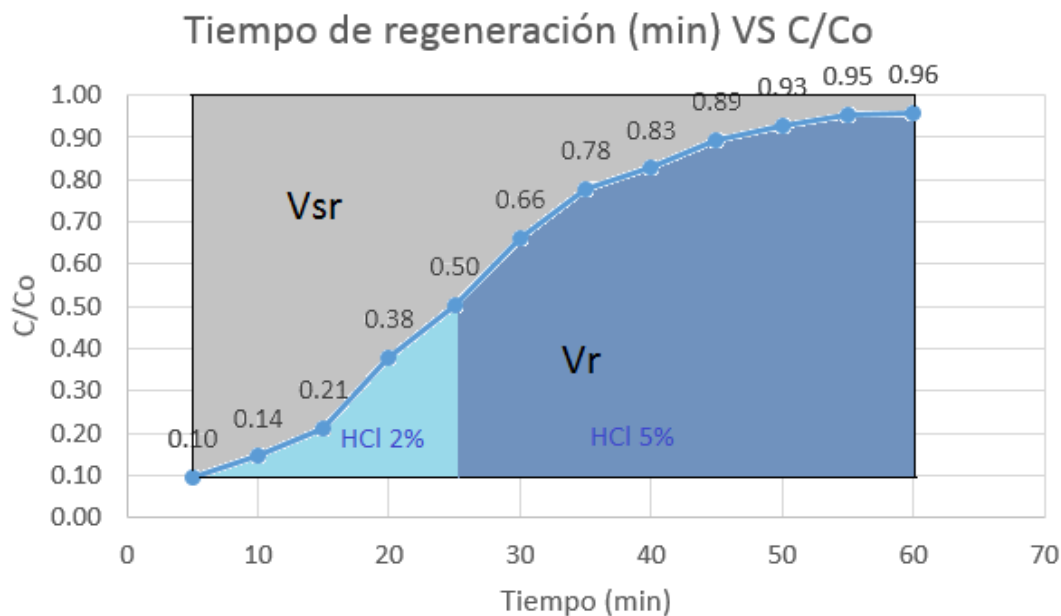


Figura 2.7 Curva de regeneración (Amberlita IRC-50) (variante 2). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.8 se puede observar que al igual que en la variante número 1 el área bajo la curva, correspondiente al volumen de resina regenerada, aumentó considerablemente, llegando al 96% de regeneración en solamente 60 minutos. Se logró realizar la regeneración de la mayor parte de la resina alrededor de los 40 minutos quedando solo el 16% del volumen de resina sin regenerar

evidenciándose con ello que el flujo usado es el adecuado. Además, se puede observar el comportamiento de la regeneración y el movimiento de la zona de transferencia de masa en el tiempo el cual aumentó considerablemente su velocidad de intercambio, por lo que podemos arribar a la conclusión de que esta variable es igual de eficiente y además más económica ya que se emplea un volumen de 125 mL de HCl al 5% m/v y 175 mL de HCl al 2% m/v a diferencia que en la variante uno que se utiliza un volumen de 300 mL de HCl al 5% m/v la cual consume más HCl.

2.7. Conclusiones Parciales.

1. EL agua empleada en la cervecería estudiada no cumple con los parámetros de calidad requeridos excepto en las concentraciones de los iones cloros.
2. El agua tratada en el intercambiador iónico existente en la fábrica no cumple con los parámetros de calidad para la producción de cerveza artesanal.
3. La resina del intercambiador iónico es de tipo aniónica y está agotada además perdió sus propiedades de regeneración.
4. La resina más adecuada para sustituir la anterior es la Amberlita IRC-50 ya que tiene buena capacidad adsorbtiva y es fácil de regenerar.
5. Para regenerar eficientemente la resina se necesita un flujo de solución de HCl a 4 veces el volumen de resina/hora durante 60 minutos.

Capítulo 3:

APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA RESINA AMBERLITA IRC-50 EN LAS COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO DE LA FÁBRICA.

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA RESINA AMBERLITA IRC-50 EN LAS COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO DE LA FÁBRICA.

En el capítulo anterior después de valorar diferentes tipos de resina se seleccionó la resina tipo catiónica Amberlita IRC-50 para ser utilizada en el intercambiador de la fábrica. Este capítulo se basa fundamentalmente en aplicar los resultados obtenidos experimentalmente por dicha resina para ser aplicados en establecer los parámetros de funcionamiento que debe seguir el intercambiador de la fábrica para su trabajo eficiente.

3.1. Características del intercambiador.

El intercambiador iónico es de marca Magnus y consiste en dos columnas de polietileno que trabajan en paralelo con un diametro de 24 pulgadas(60,96 cm) y una altura de 65 pulgadas(165,1 cm) y un volumen de 100 gal (UK) =466,5 L cada uno, consta con un sistema automatizado que pone el equipo a regenerar cada cierta cantidad de agua tratada (Ver figura 3.1).



Figura 3.1: Intercambiador iónico de la fábrica.

3.2. Escalado de la columna de intercambio iónico a nivel de planta piloto.

Se desea escalar la columna de intercambio iónico de laboratorio hasta el nivel industrial, para ello se emplea la metodología propuesta por (Curbelo, 1997) la cual toma en consideración los parámetros de operación del modelo en función de las mejores condiciones. En esta metodología se plantea que para el modelo y el prototipo se deben cumplir los siguientes principios:

- Similitud geométrica.
- Similitud térmica: el rango de temperatura de trabajo no varía.

- Similitud cinemática: las propiedades físicas del fluido se mantienen constantes de una escala a otra, para garantizar el régimen de transferencia de masa.
- Similitud dinámica: dado que el Reynolds es laminar.
- Similitud química: la capacidad adsorptiva de la cama se mantiene de una escala a otra. Este fue el criterio fundamental seleccionado para el escalado de la columna de intercambio iónico.

El volumen a tratar será de 2000L de agua por día de trabajo de la planta. El modelo es la columna a escala de laboratorio y el prototipo es la columna de intercambio de la fábrica.

$$q = \left[\frac{V(C_o - C)}{V_r} \right]_{modelo} = \left[\frac{V(C_o - C)}{V_r} \right]_{real} \quad (3.1)$$

Dónde:

V: volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en L

Co: concentración inicial, en mg/L

C: concentración en el punto de ruptura, en ppm

Vr: volumen de resina, en L

q: capacidad de adsorción del lecho, en mg adsorbido/L de resina

El valor de la capacidad de adsorción del lecho (q) se calculó en el capítulo 2 epígrafe 2.3.3 siendo de 38458.2 mg adsorbido/L de resina, a partir de este resultado y aplicando la ecuación 3.1 se obtuvo que el volumen de resina necesario para la columna a escala industrial es de 24.5 L para una dureza en el punto de ruptura de 472 mg/L. Por lo que podemos afirmar que el intercambiador iónico con que se cuenta en la fábrica sirve para ser utilizada para tratar este flujo e incluso uno superior ya que tiene una capacidad para un volumen de resina mayor al necesitado para este flujo de agua.

3.3. Determinación del volumen de resina catiónica IRC-50 que necesita el intercambiador

Luego de confirmar en el epígrafe anterior que el intercambiador con que se cuenta en la fábrica nos sirve para tratar el flujo de agua requerido se calculó el volumen de resina catiónica que se necesita para dicho intercambiador.

- ✓ Cálculo de la altura de la cama de resina catiónica.

Para calcular la altura de la cama de resina catiónica se tuvo en cuenta el porcentaje de expansión de la resina seleccionada, la cual se calcula utilizando la ecuación 3.2.

$$\%E = \left(\frac{H-h}{h} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

%E = por ciento de expansión

H = Altura de la columna catiónica, cm

h = altura de la cama de resina catiónica

Se recomienda para el modelo de resina seleccionado (Amberlita IRC-50) tomar un % de expansión de 25 %.

Por lo tanto,

$$25\% = \left(\frac{165,1 - h}{h} \right)$$

$$\frac{166}{1,25} = h$$

$$h = 132\text{cm}$$

✓ Cálculo del volumen de resina catiónica.

Para calcular el volumen de resina catiónica se utilizó la ecuación 3.3.

$$Vrc = \pi * r^2 * h \quad (3.3)$$

Donde:

Vrc = volumen de resina cationica

h = altura de la resina cationica, cm

r = radio de la columna, cm

Por lo tanto,

$$Vrc = \pi * 30,48^2 * 132$$

$$Vrc = 385259,8\text{cm}^3 = 385,3\text{L}$$

Por lo tanto el volumen de resina catiónico que necesitamos es de 770,6 L debido a que el intercambiador cuenta con dos columnas.

3.4. Cálculo del Área de intercambio iónico.

El área de intercambio se calculó utilizando la ecuación 3.4.

$$A = \frac{V_{rc}}{h} \quad (3.4)$$

Dónde:

A = área de intercambio

V_{rc} = Volumen de resina catiónica

h = altura de la resina catiónica

Por lo tanto,

$$A = \frac{385259,8}{132}$$

$$A = 2918.63 \text{ cm}^2$$

3.5. Cálculo de la cantidad de agua que se puede tratar antes de que las resinas se agoten.

Como se puede ver la resina seleccionada en el capítulo anterior tiene una capacidad adsorptiva de 38458.2 mg/L de resina, esto nos da una medida de la cantidad de agua que puede tratar por litro de resina antes de agotarse. A continuación se calculó la cantidad de agua que puede tratar dicha resina utilizando la ecuación 3.5.

$$p = \frac{(V_{rc} * C_r)}{D_t - D_r} \quad (3.5)$$

Donde:

p = cantidad de agua tratada, L

V_{rc} = volumen de resina catiónica, L

C_r = Capacidad de la resina, ppm

D_t = dureza total del agua ppm

D_r=dureza requerida

Por tanto, con esta cantidad de resina el intercambiador iónico puede tratar una cantidad de 62788 L de agua por ciclo, luego de esto se recomienda regenerar la resina.

3.6. Cálculo de los parámetros de operación, regeneración y enjuague del intercambiador.

3.6.1. Cálculo de los parámetros de operación.

- ✓ Cálculo del flujo de operación.

El proveedor de la resina seleccionada recomienda que el flujo de operación de la resina debe estar dentro del rango de 5 a 40 veces el volumen de la cama de resina/hora. En el capítulo anterior se operó la columna con esta resina a un flujo de 40 veces el volumen de la cama/hora obteniéndose resultados eficientes. Por lo que se calculó el flujo adecuado de operación teniendo en cuenta estos resultados, para esto se utilizó la ecuación 3.6.

$$q_r = \frac{40 \cdot V_r}{h} \quad (3.6)$$

Donde:

q_r : flujo adecuado de operación de las columnas del intercambiador iónico del intercambiador iónico.

V_r : volumen de resina que tiene una columna del intercambiador iónico

Por tanto, el de flujo de operación adecuado es de 15412 L/h.

3.6.2. Cálculo de los parámetros de regeneración.

- ✓ Cálculo del flujo de regeneración.

Luego de que la resina se agota se hace necesario regenerarla, para esto se requiere un flujo y tiempo de contacto con la solución regenerante adecuado que propicie una regeneración eficiente, en el capítulo anterior epígrafe 2.6 se regeneró la resina a escala de laboratorio con soluciones de HCl de 2% y 5% p/v respectivamente por un tiempo de 60 minutos y a un flujo de 4 veces el volumen de la cama/hora obteniéndose resultados eficientes. Por lo que se calculó el flujo adecuado de regeneración teniendo en cuenta estos resultados, para esto se utilizó la ecuación 3.7.

$$q_r = \frac{4 \cdot V_r}{h} \quad (3.7)$$

Donde;

q_r : flujo adecuado de regeneración para las columnas de intercambio iónico del intercambiador iónico.

V_r : volumen de resina que tiene una columna del intercambiador iónico.

Por tanto, el flujo adecuado para la regeneración de la resina debe ser de 1541.2 L/h durante 60 minutos.

- ✓ Cálculo del consumo de soluciones regenerantes.

En el capítulo anterior epígrafe 2.6 se determinó que la variante 2 propuesta para la regeneración era la más eficiente y económica en cuanto a gasto de regenerantes, la cual propone utilizar una solución

de HCl al 2% p/v durante los primeros 25 minutos de la regeneración y luego una solución de HCl al 5% p/v por el tiempo restante de regeneración. Por lo cual se tuvo en cuenta para calcular los gastos de regenerantes en la etapa de regeneración de las columnas del intercambiador iónico. Para esto fueron utilizados las ecuaciones siguientes:

$$V_{c2\%} = q_r * t_{2\%} \quad (3.8)$$

$$V_{c5\%} = q_r * t_{5\%} \quad (3.9)$$

Donde:

$V_{c2\%}$: volumen consumido de regenerante al 2% de HCl

q_r : flujo de regeneración

$t_{2\%}$: tiempo de regeneración con regenerante al 2% de HCl

$V_{c5\%}$: volumen consumido de regenerante al 5% de HCl

$T_{5\%}$: tiempo de regeneración con regenerante al 5% de HCl

Por tanto, para regenerar la resina se necesitan 1284.4 L de HCl al 2 % y 1798 L de HCl al 5% teniendo en cuenta de que el intercambiador iónico cuenta con dos columnas.

✓ Cálculo de el consumo de HCl para la regeneración.

Generalmente el HCl se vende a escala comercial con un por ciento de pureza máximo de 38% volumen. Para preparar las soluciones regenerantes de HCl al 2% y 5% respectivamente se deben adicionar las cantidades que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Cantidades requeridas para preparar 1 L de solución

Concentraciones de la solución	Cantidad requerida de HCL al 38% (mL)	Cantidad de agua requerida (mL)
Solución al 2%	52.6	947.4
Solución al 5%	131.6	868.4

Fuente elaboración propia

Para preparar 1284.4 L de HCl al 2 % se necesitan 67.56 L de HCl al 38% y 1216.74 L de agua, y para preparar 1798 L de HCl al 5% se necesitan 236.6 L de HCl al 38% y 1561.4 L de agua.

3.6.3. Cálculo de los parámetros de enjuague.

✓ Flujos de enjuague

Luego de que la resina es regenerada completamente se hace necesario enjuagarla con agua para eliminarle las impurezas dejadas por las soluciones regenerantes. El proceso de enjuague generalmente se hace en dos etapas:

Etapas 1

Enjuague lento: este enjuague se hace a el mismo flujo de regeneración (1541.2 L/h) con un volumen de agua de dos veces el volumen de resina de la columna.

Etapas 2

Enjuague rápido : este enjuague se hace a el mismo flujo de operación (15412L/h) con un volumen de cuatro veces el volumen de resina de la columna.

✓ Consumo de agua para enjuague.

A continuación se calculó la cantidad de agua consumida por las columnas del intercambiador iónico para su enjuague utilizando las ecuaciones siguientes:

$$V_{H_2O_c} = V_{cl} + V_{cr} \quad (3.10)$$

$$V_{cl} = 2 * V_r \quad (3.11)$$

$$V_{cr} = 4 * V_r \quad (3.12)$$

Donde:

$V_{H_2O_c}$: volumen de agua consumido en el enjuague

V_{cl} : volumen de agua consumido en el enjuague lento

V_{cr} :volumen de agua consumido en el enjuague rápido

Por tanto, el volumne de agua necesario para el enjuague de las columnas del intercambiador es de 4623 L.

✓ Cálculo del tiempo de duración del enjuague.

A continuación se calculó el tiempo que demoran en enjuagarse las columnas completammente, para esto se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$t_e = t_{el} + t_{er} \quad (3.13)$$

$$t_{el} = \frac{V_{cl}}{q_{el}} \quad (3.14)$$

$$t_{er} = \frac{V_{cr}}{q_{er}} \quad (3.14)$$

Donde:

t_e : tiempo de duración del enjuague

t_{el} : tiempo de duración del enjuague lento

V_{cl} : volumen de agua consumido durante el enjuague lento

q_{el} : flujo de enjuague lento

t_{er} : tiempo de duración del enjuague rápido

V_{cr} : volumen de agua consumido durante el enjuague rápido

q_{er} : flujo de enjuague rápido

Por tanto, el enjuague de las columnas del intercambiador iónico demora 36 minutos.

3.7. Manejo del agua tratada para el proceso de producción de cerveza artesanal.

En el capítulo anterior epígrafe 2.4 se seleccionó la resina Amberlita IRC-por sus eficientes resultados para tratar el agua de la fábrica, en la tabla 3.2 se compara los parámetros de calidad obtenidos de la tabla 2.7 con lo parámetros de calidad requeridos para la producción de cerveza de la tabla 2.2.

Tabla 3.2: Comparación de los parámetros de calidad del agua tratada con los parámetros de calidad requeridos para el proceso de producción de cerveza artesanal.

Parámetros	Muestra del agua tratada antes del punto de ruptura	Norma interna de elaboracion de cervezas	Norma interna para de servicios
Conductividad (μ S)	275	*200-625	-
Dt (mg/L CaCO_3)	0	*116-207	0
Concentración de Ca (mg/L)	0	*30-50	0
Concentración de Mg (mg/L)	0	*10-20	0

Fuente: Elaboración propia.

*En el caso del agua para la producción de cervezas oscuras y malta, la dureza total dada por la concentración de Ca y Mg no requiere reducción.

Como se puede observar en la tabla 3.2 el agua tratada cumple con los parámetros de calidad internos para ser utilizadas en servicios de calderas intercambiador de calor y limpieza de líneas, en el caso para producir cervezas tipo oscura y malta como habíamos visto antes no se necesita tratar el agua por lo que se puede utilizar el agua cruda, en el caso particular de la cerveza clara se necesita hacer un ajuste mezclando agua tratada con agua cruda para llevarla a los parámetros de calidad con que debe cumplir.

En la tabla 3.3 se muestran las cantidades requeridas de cada tipo de agua para preparar un litro de agua para la producción de cerveza clara.

Tabla 3.3: Cantidades requeridas de cada tipo de agua para preparar 1L de agua para la producción de cerveza clara.

	Volumen requerido de Agua cruda (mL)	Volumen requerido de agua tratada (mL)
Agua para la producción de cerveza clara	350	650

Fuente: Elaboración propia.

3.8. Conclusiones parciales.

1. El intercambiador con que se cuenta en la fábrica tiene capacidad para tratar un flujo de 62788 L de agua cruda por ciclo empleando la resina seleccionada.
2. El flujo adecuado de regenerante para las columnas de intercambio ionico con la resina seleccionada es de 1541.2 L/h durante 60 minutos.
3. Para preparar las soluciones regenerantes de HCl al 2% y 5% se necesitan 67.56 L de HCl al 38% y 1216.74 L de agua, y 236.6 L de HCl al 38% y 1561.4 L de agua respectivamente.
4. Para regenerar la resina de las columnas del intercambiador iónico de la fábrica se necesitan 1284.4 L de HCl al 2 % y 1798 L de HCl al 5%.
5. El volumen de agua necesario para el enjuague de las columnas del intercambiador iónico es de 4623 L.
6. El ciclo de regeneración y enjuague de la resina seleccionada en las columnas del intercambiador iónico de la fábrica tarda 96 minutos.
7. El agua tratada en el intercambiador iónico de la fábrica sirve para ser utilizada en servicios auxiliares.

8. El agua tratada en el intercambiador iónico de la fábrica necesita ser mezclada con el agua cruda para la producción de cerveza clara.

Conclusiones

CONCLUSIONES:

1. Se identificaron los parámetros de calidad del agua para la producción de cervezas artesanales y su utilización en servicios auxiliares estos son de 116- 207 mg/l (CaCO_3) de dureza en el caso de las cervezas claras, 0 mg/L (CaCO_3) de dureza para servicios auxiliares y para el caso de las cervezas oscuras y maltas no requiere de tratamientos.
2. El agua con que se cuenta en la cervecería no cumple con los parámetros de calidad necesarios para ser usada en el proceso productivo de cervezas artesanales excepto los niveles de cloruros y el rango de pH.
3. El estudio experimental realizados a los diferentes tipos de resina permitió seleccionar como la más apropiada para el tratamiento del agua para la producción de cervezas artesanales fue la Amberlita IRC-50 por tener la mayor capacidad adsortiva de 38458.2 mg/L de resina y por ser fácil de regenerar.
4. El escalado a nivel industrial de la columna de intercambio iónico permitió determinar la capacidad de tratamiento de agua por ciclo que es de 62788 L, así como los consumos de agua y ácido clorhídrico en el ciclo de regeneración y enjuague son de 7401.14 L y 304.1 L respectivamente.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES:

1. Comprar la resina recomendada en la investigación para ser utilizada en las columnas de intercambio iónico de la Factoría Santa Ana.
2. Diseñar un sistema de pretratamiento para el caso en que el agua este turbia, y así alargar la vida útil de la resina del intercambiador.
3. Presentar los resultados obtenidos en esta investigación en las demás fábricas de cerveza artesanales con que cuenta el país.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA:

- A. SÁNCHEZ RODRÍGUEZA, Y. O. L., I. L. RODRÍGUEZ RICOA*, R. J. CABRERA CARRAZANAA Y B. GUERRA VALDÉSA 2016. Evaluación, modelización y optimización de una columna de intercambio iónico empleada en el tratamiento de aguas de procesos. Santa Clara
- AAPO, S. 2002. "Water Conditioning & Purification". Magazine.
- ADMIN. 2019a. *El agua potable* [Online]. Argentina. Available: http://www.aquamarket.com/noticias/noticias.asp?id_noticia=3849 [Accessed 15/2 2019].
- ADMIN. 2019b. *Importancia de la calidad del agua en la industria alimentaria* [Online]. Available: <http://www.enfoquealimentos.com/blog/> [Accessed 25/2/ 2019].
- ANTHONY WACHINSKI, J. M. 2000. E. Environmental ion exchange. Principles and Desing. CRC Press LLC, 3.
- ARCTICWATER. 2019. "La importancia del agua en la elaboracion de cerveza artesanal" [Online]. Argentina. [Accessed 15/2 2019].
- ASENCIO, P. H. 2019. *El agua en el mundo* [Online]. Instituto Mexicano de tecnología del agua. Available: <http://www.webimta@tlaloc.imta.mx> [Accessed 10/3 2019].
- CALLEJA COLORADO, J. 2013. Diseño de una planta de elaboración de cerveza artesanal para consumo directo, microcervecería.
- CELENZA, J. G. 2000. Industrial Waste Treatment Processes Engineering: Specialized Treatment Systems. USA: Ed Technomic Publishing Company.
- CURBELO, T. 1997. Características de la aplicación del escalado en la Ingeniería Química.
- DÍAZ, R. 2006. *Tratamiento de aguas y aguas residuales*, La Habana, Editorial ISPJAE.
- DOMINGUEZ, F. E. H. 2006. *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DESMINERALIZADOR DE LECHO MULTIPLE* UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
- ENIGMA, M. 2019. *PROCESO DE ELABORACIÓN DE NUESTRAS CERVEZAS* [Online].
- ESKEL, N. 2009. *Tratamiento de Agua para la Industria y otros*
- GEORGE, T. A. 2005. *Manual de Procesos Químicos en la industria* México.
- GILLES, G. 2001. *Water Conditioning & Purification*. Magazine.
- HUNT, J. A. 2001. "Water Condictioning & Purification". Magazine.
- LENNTech. 2017. *Menú de conversor de unidades de conductividad* [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/calculadoras/conductividad/conductividad.htm> [Accessed 15/3 2019].
- MARTINEZ. 2018. *El Agua en Producción de Alimentos y Bebidas*. [Online]. Available: <https://www.domosagua.com/> [Accessed 20/2 2019].
- MÉXICO, C. 2017. *La importancia del agua en la cerveza* [Online].
- MILIAN, Y. P. 2018. "Obtención de jarabes glucosados y su purificación, para su posterior conversión a jarabes fructosados". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, I. L. R. 2014. Modeling of two up-flow fixed-bed columns in series for the biosorption of Cr6+ and Ni2+ by sugarcane bagasse. *Desalination and Water Treatment*.
- ROMIN, I. 2019. *Ósmosis inversa para la fabricación de cerveza artesanal* [Online].
- ROSABAL, J. M. V., M 2006. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*, La Habana, Cuba.
- SALÁN, M. C. P. 2013. *Diseño de la planta de tratamiento para aguas residuales de la lavandería y tintorería JAV-TEX del Cantón Pelileo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- SALM. 2018. *EL CONCEPTO DE LA FABRICACIÓN DE CERVEZA DE SALM* [Online].
- TOVAR, M. 2018
- ¿Qué es la cerveza artesanal? [Online]. México. Available: <https://www.cervezaartesanal mexicana.mx/cultura-cervecera/que-es-la-cerveza-artesanal> [Accessed 20/2 2019].
- TREYBAL 1985. *Operaciones con Transferencia de Masa*, La Habana, Cuba.
- VILLEGA, A. B. 2002. *ACONDICIONAMIENTO Y OPTIMIZACION DEL AGUA UTILIZADA PARA LA ELABORACION DE CERVEZA Y SERVICIOS* UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

Anexos

ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica de la resina Amberlita MB-150

AMBERLITE MB150 is an ionically equilibrated mixed bed resin. Ready for use, as supplied, it is a mixture of a strongly acidic cation resin and a strongly basic, type 1 anion exchange resin.

AMBERLITE MB150 is used for the production of high purity water and other applications requiring totally demineralized water.

PROPERTIES

Physical Form _____	Spherical beads, in a moist, fully hydrated condition
Ionic Form, as shipped _____	Hydrogen/Hydroxide
Cation to Anion equivalent ratio _____	1/1
Volumetric Composition _____	40% Cation/60% Anion
Volumetric Capacity _____	12 kgr/ft ³ (approximate)
Shipping Weight _____	43 lb/ft ³
Particle Size	
Uniformity Coefficient _____	1.7 maximum
Screen Grading _____	16 to 50 mesh (US Std Screen)
Screen Analysis _____	5% maximum on 16 mesh (US standard Screen)
	0.5% (approx.) thru a 50 mesh (US Standard Screen)
Chemical Stability _____	Insoluble in water, dilute solutions of acids or bases and common solvents

SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

pH Range _____	0 to 14
Maximum Operating Temperature _____	140 °F
Minimum Bed Depth _____	24 inches
Service Flow Rate _____	2 to 5 gpm/ft ³
Regenerant	
Cation _____	HCl or H ₂ SO ₄
Anion _____	NaOH

Anexo 2: Etiqueta del envase de la resina Merck

Ionenaustauscher V (Mischbettaustauscher) Ion exchanger V (mixed bed exchanger) Echangeur d'ions V (échangeur mixte d'ions) Scambiatore di ioni V (scambiatore di ioni misto) Intercambiador de iones V (intercambiador mixto) Permutador de iões V (permutador de léito misto)	g 3 1 3 3 9 9 0 3 LAB Art. 4836 Ionenaustauscher V (Mischbettaustauscher) MERCK	Typanalyse Gewichtskapazität an sauren Gruppen etwa 1,5 mVal/g an basischen Gruppen etwa 1,5 mVal/g Wassergehalt 50-60% Rüttelgewicht etwa 0,6 g/ml Die angegebenen Analysendaten sind keine Garantiezahlen. <i>E. Merck</i>
---	--	--

Anexo 3: Ficha técnica de la resina Amberlita IRC-50

Specifications

Moisture Holding Capacity	(H+): 43.0 to 53.0%
Particle Size	Particle size analysis : uniformity coefficient: <2.0, harmonic mean size: 0.280 to 0.700mm, <0.300mm: < 8.0%, >1.180mm: <5.0%
Volume Total Capacity	(H+):>3.0 eq/L
Merck Index	14, 382
Color	White to Beige
Quantity	250g
Physical Form	Beads
Chemical Name or Material	Amberlite(r) IRC-50 ion-exchange resin

Anexo 4: Foto tomada a una de las columnas montadas en el laboratorio

