

**RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO COMO ALTERNATIVA PARA LA  
REMOCION DE METALES TIPICOS EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES.**

Autor  
NELCY ALEJANDRA CAÑAS MENDOZA  
COD: 1.094.273.763

DIPLOMADO EN TRATAMIENTO AVANZADOS DEL AGUA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL CIVIL Y QUIMICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
PAMPLONA-NORTE DE SANTANDER  
2019

**RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO COMO ALTERNATIVA PARA LA  
REMOCION DE METALES TIPICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES.**

Autor  
NELCY ALEJANDRA CAÑAS MENDOZA  
COD: 1.094.273.763

TRABAJO DE MONOGRAFIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO  
AMBIENTAL

DIRECTOR

Ph.D. JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA

DIPLOMADO EN TRATAMIENTO AVANZADOS DEL AGUA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL CIVIL Y QUIMICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
PAMPLONA-NORTE DE SANTANDER  
2019

## DEDICATORIA

*En primer lugar, a Dios por ser mi guía cada día, por ser mi apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.*

*A quienes le debo mi vida y el poder culminar con éxito esta etapa, mis padres, sin ellos este gran logro no hubiese sido posible, por ellos y para ellos.*

*Mis hermanos que sin lugar a duda siempre han estado para mí en cualquier momento, recordándome que todo es posible de la mano de nuestra familia y de Dios.*

## AGRADECIMIENTOS

Al PH.D. Jacipt Alexander Ramón Valencia, tutor de esta monografía, por su tiempo, dedicación, apoyo, confianza y aprendizaje a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Sin lugar a duda a mis padres Ana Nelly Mendoza y Marco Antonio Cañas ellos son la base de mi vida. Gracias por tanta ayuda y apoyo emocional en este proceso.

A aquellos docentes que hicieron parte de mi formación como profesional, gracias por todas las enseñanzas y aportes que le dieron a mi vida durante tantos años.

A mi gran amiga Manuela Rodríguez quien fue parte fundamental en estos años, y a mis futuros colegas quienes me ayudaron y aconsejaron de manera desinteresada. Gracias infinitas por todo lo que logramos vivir.

Finalmente le agradezco a mi compañero de batallas, por estar ahí siempre que pensé que no podría sacar adelante mi carrera.

## CONTENIDO

### INTRODUCCION

1. Antecedentes De Los Intercambiadores Ionicos .....	11
2. Intercambio Iónico .....	14
2.1. Principales tipos de intercambiadores Iónicos .....	17
2.2. Condiciones que afectan el Intercambio Iónico .....	17
2.3. Aplicaciones del Intercambio Iónico .....	18
2.3.1. Desmineralización y ablandamiento del agua .....	18
2.3.2. Desmineralización de otros productos .....	19
2.3.3. Aplicaciones farmacéuticas y biológicas .....	19
2.4. Fundamento de los procesos de intercambio iónico .....	20
3. Resinas de Intercambio Iónico .....	21
3.1. Alternativas de manejo de resinas de Intercambio Iónico .....	25
3.2. Escala de producción y consumo de las resinas de Intercambio Iónico .....	26
3.3. Aplicaciones de las resinas intercambiadoras de iones en el tratamiento de aguas	
27	
3.3.1. Ablandamiento .....	27
3.3.2. Descarbonatacion.....	27
3.3.3. Desmineralizacion .....	28
3.3.4. Lechos mezclados.....	28
3.4. Eficiencia del proceso .....	28
3.5. Vida Útil de las resinas de intercambio iónico .....	29
3.6. Capacidad total de la resina.....	29
3.7. Formas de obtener una resina.....	30

4.	Tipos de resinas de Intercambio Iónico .....	30
4.1.	Tipos según su grupo funcional.....	30
4.1.1.	Resinas catiónicas de ácido fuerte.....	30
4.1.2.	Resinas cationicas de ácido débil .....	31
4.1.3.	Resinas anionicas de base fuerte .....	32
4.1.4.	Resinas anionicas de base débil.....	34
4.1.5.	Resinas Quelatantes .....	35
4.2.	Tipos según su estructura de red.....	35
4.2.1.	Microporosas o Tipo Gel .....	35
4.2.2.	Macroporosas o Macroreticulares .....	36
4.2.3.	Isoporosas.....	37
4.2.4.	Peliculares .....	37
4.3.	Estructura de las resinas de intercambio iónico .....	39
4.4.	Características de las resinas de intercambio iónico.....	40
4.4.1.	Forma .....	40
4.4.2.	Estabilidad.....	40
4.4.3.	Tamaño de la partícula.....	42
4.4.4.	Humedad .....	42
4.4.5.	Resistencia a la fractura ( <i>Esquema 3</i> ).....	43
4.4.6.	Densidad.....	43
4.4.7.	Solubilidad .....	44
4.4.8.	Caída de presión .....	44
4.5.	Reacciones de intercambio que efectúan las resinas .....	44
4.5.1.	Ciclo catiónico.....	44
4.5.2.	Ciclo anionico.....	46

5.	Tratamiento de efluentes por intercambio iónico .....	47
6.	Metales Pesados.....	48
6.1.	Actividades industriales generadoras de metales pesados ( <i>Tabla 5</i> ).....	51
6.2.	Toxicidad de metales pesados .....	57
7.	Tecnologías para la remoción de metales pesados en aguas residuales.....	58
7.1.	Técnicas Convencionales .....	58
7.1.1.	Filtración por membrana .....	58
7.1.2.	Intercambio Iónico.....	59
7.1.3.	Adsorción .....	59
7.1.4.	Precipitación química.....	60
7.2.	Técnicas no convencionales .....	61
7.2.1.	Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes.....	61
8.	Etapas del proceso (Intercambio Iónico en Columna).....	61
8.1.	Empaquetamiento .....	62
8.2.	Acondicionamiento del Intercambiador.....	62
8.3.	Etapa de carga.....	63
8.4.	Etapa de Regeneración.....	63
8.5.	Modo de Operación ( <i>Figura 13</i> ).....	64
9.	Tratamiento de aguas .....	66
9.1.	Eliminación de la dureza del agua .....	66
9.2.	Alcalinidad del agua .....	67
9.3.	Eliminación de Materia Orgánica.....	68
9.4.	Eliminación de Nitratos .....	68
9.5.	Eliminación del ion amonio .....	69
9.6.	Desionización del agua .....	69

10.	Pasos para el diseño de un equipo de intercambio iónico .....	69
11.	Revisión de evaluaciones de resinas de intercambio iónico a nivel de laboratorio ..	71
11.1.	Eliminación de arsénico en agua utilizando resinas de intercambio iónico modificadas con hierro .....	71
11.2.	Eliminación de amoníaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas.....	73
11.3.	Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapan, Estado de Hidalgo, México .....	75
11.4.	La eliminación de metales tóxicos de los efluentes líquidos mediante resinas de intercambio iónico. Parte VII: Manganeso (VII) / H + / Amberlite 958 .....	76
11.5.	Remoción de plomo en agua a partir de material nano estructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolita natural.....	78
11.6.	Elaboración de una biorresina intercambiadora de cationes a partir de cascara de plátano o guineo para eliminar metales pesados en agua contaminada.....	79
11.7.	Evaluación de la eficiencia de la resina convencional ( Anionica de base fuerte) en la remoción de nitratos, en las aguas para consumo humano.....	81
11.8.	Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial .....	82
12.	Análisis Económico.....	83
12.1.	Costos de Tratamiento.....	83
12.2.	Costos de construcción.....	84
12.3.	Requerimiento de Operación y Mantenimiento .....	86
	BIBLIOGRAFÍA .....	88



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Utilización de las Resinas .....	26
Tabla 2: Formas de Stress de una resina .....	41
Tabla 3: Deterioro de la resina .....	41
Tabla 4: Características, Propiedades y Ventajas del proceso de intercambio iónico .....	48
Tabla 5: Principales actividades industriales.....	52
Tabla 6: Sintomas de Intoxicacion y niveles de contaminacion maximos.....	54
Tabla 7: Valores maximos permisibles. Colombia.....	56
Tabla 8: Datos de costos de construcción para resinas de intercambio iónico.....	85

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zeolitas de origen natural.....	16
Figura 2: Estructura de una resina de intercambio .....	22
Figura 3: Resina de Intercambio Cationico .....	22
Figura 4: Detalles de las esferas de una resina de intercambio ionico.....	23
Figura 5: Caracteristicas de una resina cationica y una resina anionica .....	32
Figura 6: Resina Monoesfera.....	33
Figura 7: Resina no Monoesferica .....	33
Figura 8: Perlas de resinas utilizadas en el tratamiento de aguas mediante intercambio ionico .....	35
Figura 9: Resina Geliforme .....	37
Figura 10: Resina Macroporosa.....	38
Figura 11: Modelos estructurales de resinas .....	38
Figura 12: Estructura de la Resina .....	40
Figura 13: Modos de Operación .....	65
Figura 14: Proceso de intercambio ionico en columna: cara y regeneracion por la parte superior de la columna .....	65
Figura 15: Proceso de intercambio ionico en columna: regeneracion por la parte inferior de la columna .....	66
Figura 16: Costos de construcción vs Volumen para resinas de intercambio ionico .....	85

## INDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1: Características ideales para una resina de intercambio ionico .....	39
Esquema 2: Influencia de la porosidad en las prestaciones de una resina .....	42
Esquema 3: Resistencia a la fractura .....	43
Esquema 4: Clasificación de los metales .....	57
Esquema 5: Proceso de intercambio ionico en columna .....	62
Esquema 6: Diseño de un equipo de intercambio ionico .....	71
Esquema 7: Metodología empleada en el estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapan, Estado de Hidalgo, México .....	76
Esquema 8: Fases del laboratorio .....	80
Esquema 9: Factores que determinan el costo de tratamiento.....	84
Esquema 10: Materiales de mantenimiento requeridos .....	86

## INTRODUCCION

Recientemente a nivel mundial se presenta un gran preocupación a causa del notable incremento en los índices de contaminación de efluentes por parte de metales pesados (Cartaya, Reynaldo, & Peniche., 2008) (Akar, Tosun, Kaynak, Kavas, & Incirkus., 2009). Por tal motivo se han desarrollado una cantidad de métodos para el tratamiento de efluentes contaminados por dichas sustancias; entre ellas podemos mencionar: precipitación, oxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por vaporación (Sala, y otros, 2010) (Duarte, Oliver, & Jaramillo., 2009).

Metales como el hierro, calcio, magnesio o manganeso se encuentran presentes en aguas residuales industriales provenientes de metalurgia, fabricación de cemento, cerámicas y bombeos de gasolina. Los efectos que estos producen son menos peligrosos que los que generan metales como cromo, cadmio, mercurio, plomo y zinc; por lo general son cambios en las características del agua como color, dureza, salinidad e incrustaciones. Debido a la naturaleza toxica de algunos metales pesados, causan impactos negativos sobre los tratamientos biológicos convencionales, así como también sobre los ecosistemas receptores. Es por esto que muy seguido resulta conveniente medir y controlar las concentraciones de estas sustancias (Ernesto Simon., 2008).

Los intercambiadores de iones son por lo general del tipo columna con flujo descendente; el agua entra por la parte superior de la columna que es sometida a una cierta presión, transita de forma descendente por el lecho de resina, y es extraído por la parte inferior. Al momento de agotarse la capacidad de la resina, la columna es sometida a un ciclo de lavado o contracorriente de modo que se eliminen los sólidos atrapados y proceder a una regeneración. El ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico son regenerantes que ayudan en el proceso a la resina de intercambio catiónico. En las resinas anionicas es común emplear el hidróxido de sodio como regenerados (Dominguez & Guaman Perez., 2006). Las concentraciones elevadas de sólidos en suspensión que se encuentran en el agua y que entran en las unidades de proceso pueden taponar los lechos de intercambio iónico, generando pérdidas de carga y rendimientos menos eficaces.

El tratamiento que recibe el agua de uso industrial en Colombia que remueve tanto dureza como metales pesados está asociado generalmente a el empleo de resinas de intercambio iónico; y aun así existiendo otras alternativas que presentan gran potencial en la remoción de dichos iones, no se han logrado implementar debido al poco conocimiento en cuanto a su eficiencia y parámetros de diseño (Valencia & Sánchez, 2015).

La presente recopilación investigativa proporciona las propiedades, características, usos y ventajas que generan las resinas de intercambio iónico. así como las alternativas para la aplicación a través de materiales orgánicos, esto con el fin de suministra mayor información al respecto de las posibles opciones que se presentan para la remoción o eliminación de metales pesados en aguas.

De igual forma el documento proporciona las diferentes metodologías aplicadas en estudios nacionales como internacionales en los cuales se ha hecho uso del intercambio iónico para eliminación de metales en afluentes, de igual manera se podrá apreciar las diversas eficiencias de resinas tanto comerciales como naturales.

## 1. Antecedentes De Los Intercambiadores Ionicos

El intercambio iónico hace aproximadamente 40 años estaba limitado en sus aplicaciones fuera del laboratorio, primordialmente a su aplicación en la desmineralización del agua y en el ablandamiento de la misma. En la actualidad se utiliza en una escala incomparablemente más amplia y es una parte integrante de algunas técnicas nuevas y procesos industriales (N.F. (Nuffield Foundation)., 1974).

De acuerdo a lo descrito en la WC&INTERNATIONAL (2017) de Noviembre de este mismo año, el descubrimiento del intercambio iónico ha sido acreditado a los autores Thompson y Way en 1858 los cuales concluyeron que ciertos suelos (conteniendo zeolitas ) llegarían a intercambiar unos iones por otros. Esto sucedería cuando las sales de amonio ( las cuales actúan como fertilizantes) fueran agregados a una maceta conteniendo tierra, aquellos iones de amonio serian capturados por el suelo y sales de amonio y otros salieron por la parte inferior. La revista de igual forma señala que el nacimiento del intercambio de iones moderno data aproximadamente al año 1940, se estimaba que el proceso real había sido la sulfonación; pero según lo realizo cerca de los años 50, el proceso obtenido fue la fabricación de resinas de estireno-divinil benceno que desde entonces ha sido la parte fundamental de las resinas modernas.

Llegando a la década de los 40 se emplearon nuevas resinas y su descubrimiento estuvo en constante desarrollo. Los nuevos intercambiadores de iones podían intercambiar sodio por calcio y podrían funcionar bien en la forma  $H^+$  (esto era algo que las zeolitas naturales no podían hacer bien). La aparición de la resina anionica de base fuerte hizo posible la desmineralización completa por primera vez. En 1959 se estaban incluyendo nuevas aplicaciones y el agua desmineralizada que antes era inalcanzable, gracias a las tecnologías de intercambio iónico ahora estaba al alcance. Diversas investigaciones definieron con precisión la selectividad de la reacción de intercambio iónico que conduce a avances en el refinado de metales a través de la separación y recuperación cromatográfica. Casi cualquier cosa que la naturaleza

hubiera puesto en agua, el intercambio de iones era capaz de eliminar. WC&INTERNATIONAL (2017).

La revista WC&INTERNATIONAL (2017) expone también que las resinas estándar fueron desarrolladas totalmente cerca de la década de 1960. En 1970 se vio la reinención del intercambio iónico, provocada por la escalada de los precios de la energía y las materias primas.

El intercambio iónico es un proceso en el cual los iones se mantienen unidos en grupos funcionales sobre la superficie de la resina por medio de fuerzas electrostáticas que se intercambian por iones de una especie diferente en la disolución (Manahan & Stanley, 1991) (Metcalf, 2003).

Las propiedades como lo son los intercambiadores iónicos de algunas arcillas y minerales de remontan desde el siglo XIX y se atribuye la primera observación del fenómeno a Thompson y Way, cuyos estudios con distintas muestras de suelos agrícolas fueron publicados en 1850. Por sus experimentos pasaron una disolución de sulfato o nitrato amónico a través de distintas muestras de arcilla procedente de suelos agrícolas, observando que el filtrado obtenido contenía iones calcio en lugar de iones amonio. La importancia dada por estos resultados en cuanto al fenómeno de intercambio iónico no se comprendió completamente hasta que Henneberg y Stohman y Eichhorn, demostraron la reversibilidad del proceso en 1858 (Carrillo Aragon., 2007).

De igual forma el autor (Carrillo Aragon., 2007) señala que para el año 1870 los estudios de Lemberg acerca de la capacidad intercambiadora de las zeolitas ampliaron los conocimientos en estos procesos de intercambio. De hecho, las zeolitas son un claro ejemplo de minerales con capacidad intercambiadora y en 1927 fue empleada la primera columna de zeolita mineral en la eliminación de calcio y magnesio que interferían en la determinación del contenido de sulfato en agua.

En la evolución del intercambio iónico surgió una etapa intermedia la cual fue el reconocimiento de las propiedades intercambiadores de varios materiales orgánicos, tal como lo es el carbón sulfonado. Carrillo Aragon (2007) menciona que este material presenta un grupo funcional que es capaz de intercambiar los cationes de modo reversible y además actúa en un rango de pH mayor que los silicatos de aluminio.

El mayor aporte al desarrollo del intercambio iónico fue la síntesis de resinas orgánicas, la cual fue realizada en 1935 por los químicos Basil Adams y Eric Holmes del Departamento de Investigación Científica e Industrial (Reino Unido). Generando polímeros orgánicos que simulaban a las zeolitas mediante reacción de condensación entre el fenol y el formaldehído. Reemplazando el fenol por derivados de este, como fenoles polihídricos o por diaminas aromáticas, seguido a esto se dio paso a las resinas de intercambio catiónicas o aniónicas. Después las primeras resinas Amberlita (Rohm y Hass) y Dowex (Dow Chemical Co) (Carrillo Aragon., 2007).

En su estudio (Carrillo Aragon., 2007) señala también que un paso para el desarrollo de los intercambiadores iónicos fue la búsqueda de especificidad, en 1948, Skogseid genera la primera resina específica para un metal, potasio y a partir de ese momento los investigadores basaron sus esfuerzos en incorporar a la matriz de la resina distintos grupos funcionales que aumentasen su selectividad por un determinado compuesto, generando de esta manera las resinas quelatantes.

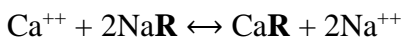
Es así como desde ese entonces se ha seguido investigando y el desarrollo en nuevas estructuras poliméricas (macroporosas, poliacrílicas, tipo gel) dando paso a una serie de modernas resinas de intercambio iónico cuyo empleo en el campo de aplicaciones industriales ha sido enorme (Carrillo Aragon., 2007).



## 2. Intercambio Iónico

La Universidad Autónoma de Madrid (2006) señala que el intercambio iónico es una operación basada en la transferencia de materia líquido-sólido. Esto implica una transferencia de uno o más iones de la fase líquida a la fase sólida por intercambio o desplazamiento de iones con la misma carga, estos se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. Para que el proceso sea eficaz depende del equilibrio existente entre sólido-líquido y también de la velocidad de transferencia de materia. Se considera que los sólidos sean de tipo polimérico, debido a que son los más habituales y están basados en resinas de intercambio iónico sintéticas.

Se puede explicar cómo una reacción reversible con cantidades químicas equivalentes. Como un ejemplo de intercambio catiónico esta la reacción para el ablandamiento del agua presentada a continuación:



En donde **R** representa un sitio estacionario anionico univalente en la malla del polielectrolito de la fase intercambiadora (Universidad autonoma de Madrid, 2006).

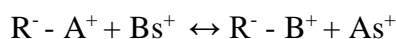
Se define como intercambio iónico es una reacción química en donde los iones libres móviles de un sólido, el intercambiador de iones, se cambian por distintos iones de carga similar de la disolución. Dicho intercambiador debe poseer una estructura de malla abierta, de modo que sea orgánica o inorgánica, que retenga iones sobre si y que permita el paso a través de otros iones (N.F. (Nuffield Fundation)., 1974).

Nevárez (2009) junto a Pérez, Sierra y Fajardo (2006) describen el intercambio iónico como la operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. En este proceso de intercambio iónico Choi (2002) señala que en el ocurre una reacción química en

la cual los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga en un fluido.

Dicho proceso trata en pasar el fluido sobre un intercambiador bien sea catiónico y/o aniónico sólido, de manera que se reemplaza los cationes y/o aniones por el ion hidrogeno ( $H^+$ ) y/o el ion hidroxilo ( $OH^-$ ) respectivamente (Manahan, 2007).

Grágeda (2006) y Manahan (2007) señalan que cuando el intercambiador iónico que por lo general es un sólido poseen dentro de su estructura cargas negativas estaría en la capacidad de intercambiar y al mismo tiempo retener iones cargados positivamente, generando así la reacción de intercambio catiónico expuesta en la siguiente ecuación:



Donde:

$R^-$  = Representa al intercambiador catiónico

$A^+$  = Representa al catión intercambiable del solido

$B^{s+}$  = Representa al catión intercambiable de la disolución que pasa por el solido

Por simplicidad se representa al catión como monovalente, pero este puede tener cualquier tipo de carga (Grágeda, 2006) (Manahan, 2007).

Los intercambiadores de iones generalmente son orgánicos o inorgánicos, naturales o sintéticos. De los más ampliamente reconocidos y utilizados en la actualidad son las resinas sintéticas, las cuales actúan como intercambiadores de iones a causa de que su malla tridimensional orgánica posee grupos cargados o susceptibles de ser cargados. Dichas resinas sintéticas han revolucionado la química e industria moderna, son del linaje de la química de los polímeros que desde 1940 habían también proporcionado sustancias como polietileno, poliuretano, nylon, PCV y otras fibras sintéticas que son ahora usadas como medios cotidianos. Las resinas sintéticas se diferencian de las resinas de las resinas naturales en que

estas son sólidos orgánicos amorfos o semisólidos con un lustre típico de origen animal o vegetal (N.F. (Nuffield Foundation)., 1974).

Los intercambiadores iónicos son sustancias granuladas insolubles, las cuales tienen en su estructura molecular radicales ácidos o básicos que pueden ser intercambiados. Los iones positivos o negativos localizados en estos radicales serán remplazados por iones del mismo signo que se encuentran en la solución. Estas sustancias intercambiadoras de iones son conocidas bajo el nombre de resinas. El agua atraviesa una cama de resina catiónica que atraerá en su superficie los minerales metálicos de carga positiva, después atraviesa una cama de resina aniónica para atraer los minerales no metálicos de carga negativa (Brown, LeMay, & Bursten, 1998).

Pérez, Sierra y Fajardo (2006) mencionan que los primeros productos que fueron empleados en la industria como intercambiadores iónicos fueron las zeolitas inorgánicas de origen natural (*Figura 1*), entre las cuales se encuentran los silicatos de aluminio; seguidamente se introdujeron los intercambiadores iónicos orgánicos, hechos a partir de productos naturales sulfonados como el carbón, la lignita y la turba; por lo tanto en la actualidad se utilizan resinas sintéticas en su mayoría de poliestireno-divinilbenceno conocidas como resinas de intercambio iónico.



Fuente 1: Estoesagricultura.com  
Figura 1: Zeolitas de origen natural

## 2.1. Principales tipos de intercambiadores Iónicos

Martínez Hernández (2003) refiere que los intercambiadores se pueden clasificar así:

- **INTERCAMBIADORES DE CATIONES:** Estos se caracterizan por la presencia en su molécula de radicales de función acida, sulfúrica o carboxílica, tipo  $\text{HSO}_3$  o  $\text{COOH}$ , los cuales son capaces de fijar cationes minerales u orgánicos e intercambiarlos entre sí o por el ion hidrogeno ( $\text{H}^+$ ). Las cargas concedidas a la resina por los grupos iónicos fijos son equilibradas por contraiones de carga opuesta para garantizar la neutralidad eléctrica. El intercambio es continuo hasta que se logra el equilibrio; el cual implica dos fases., la disolución dentro de la matriz de la resina y el volumen de disolución en el cual las partículas resinicas están inmersas.
- **INTERCAMBIADORES DE ANIONES:** Sus moléculas contiene radicales de función básicas. Los cuales son capaces de fijar aniones minerales u orgánicos y de intercambiarlos entre sí o por el ion hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ).

## 2.2. Condiciones que afectan el Intercambio Iónico

La Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (2009) señala que las reacciones de intercambio iónico depende de factores como:

- **TEMPERATURA:** Los cambios bruscos de esta pueden provocar variaciones en las condiciones hidráulicas y en la cinética de las reacciones; si estos se producen, se deben efectuar ajustes de los flujos y a temperaturas bajas se pueden originar caídas de presión.
- **CONCENTRACION DE LA ESPECIE EN SOLUCION:** Debido que a una mayor concentración en la solución de entrada se presentara una saturación más temprana, que a una concentración de solución de entrada menor.

- NATURALEZA DEL ION: Esto en vista a que algunos intercambiadores de iones presentan una mayor selectividad hacia iones específicos.
- pH: Este factor afectará la reacción de intercambio dependiendo del tipo de intercambiador; si es fuerte operará a cualquier pH pero si es débil solo ocurrirá un intercambio con un pH específico.

### 2.3. Aplicaciones del Intercambio Iónico

El intercambio iónico se utiliza ampliamente en las industrias de alimentos y bebidas, hidrometalurgia, acabado de metales, química y petroquímica, farmacéutica, azúcar y edulcorantes, agua subterránea y potable, nuclear, ablandamiento industrial del agua, semiconductores, energía y muchas otras industrias (D'angelo Mariano., 2014).

#### 2.3.1. Desmineralización y ablandamiento del agua

La aplicación más amplia del intercambio de iones se realiza hoy en día en el tratamiento de aguas. El método menos complicado es el ablandar el agua, por conversión de las sales de calcio y magnesio en el agua dura las cuales forman incrustaciones y depósitos perjudiciales, a las sales sódicas; el agua se pasa a través de la forma sódica de un intercambiador catiónico. Es un tratamiento adecuado para usos domésticos y para calderas antiguas que todavía estén en la industria; las calderas industriales modernas requieren la eliminación completa de cationes y aniones del agua. Esto se lleva a cabo por tratamiento con la forma ácida de un intercambiador catiónico, que sustituye a todos los cationes en solución por el ion hidrógeno, y con intercambiadores aniónicos básicos, que sustituyen a todos los aniones por iones  $\text{OH}^-$ . Al recombinarse los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  para la formación de agua lleva a la producción de agua desmineralizada, cuya conductividad iguala a la del agua que se ha destilado repetidamente bajo condiciones muy cuidadosas; los equipos comerciales sencillos se disponen de tal modo

que producen agua de alta calidad con las características indicadas para uso en el laboratorio (N.F. (Nuffield Fundation)., 1974).

El agua desmineralizada es aquella desprovista de minerales comunes presentes en el agua, tales como: calcio, magnesio, hierro, sodio, entre otros (Chang, 1999); según lo expuesto en GEA Filtración (2005) y por los autores Silva y Barbosa (2002) el agua desmineralizada puede ser obtenida mediante procesos de intercambio iónico, procesos con membranas o procesos con evaporación.

### 2.3.2. Desmineralización de otros productos

Se conoce al intercambio iónico como un procedimiento adecuado y mejor que la evaporación para fines como la eliminación de sales de un gran número de no electrolitos solubles en agua tales como el azúcar, formaldehído, glicerol, glicoles, etc. El uso comercial de las resinas de intercambio iónico es utilizada ampliamente para la desmineralización de soluciones de azúcar (sacarosa) y de otros azúcares; de igual manera se utiliza para eliminar impurezas metálicas de un gran número de preparados farmacéuticos mediante intercambio del anterior sobre una resina de intercambio catiónico (N.F. (Nuffield Fundation)., 1974).

### 2.3.3. Aplicaciones farmacéuticas y biológicas

La fundación Nuffield en su libro acerca del intercambio iónico (1974) señala que el intercambio iónico es utilizado en algunos procesos para la separación y purificación de productos. Así es el caso de los antibióticos estreptomina y neomicina que se extraen del filtrado del caldo de fermentación, en el que se forman por cultivo de los adecuados microorganismos, por concentración sobre una resina de intercambio catiónico débilmente ácida; seguidamente se extraen con ácido diluido para un posterior tratamiento.

## 2.4. Fundamento de los procesos de intercambio iónico

Un sistema de intercambio iónico se basa de una fase sólida, insoluble rodeada por una fase líquida en donde se encuentra el soluto de interés que se pretende separar. El proceso de intercambio iónico se establece cuando la fase sólida es incorporada con dicho soluto a su estructura sin que se produzca una modificación permanente de la misma (Index., 2015).

El intercambio iónico se establece siempre entre equivalentes químicos de especies iónicas del mismo signo eléctrico. La fase sólida puede ser una red cristalina o un gel. Si los iones intercambiados son positivos, el material de intercambio se denomina catiónico, y aniónico si las especies iónicas tienen carga negativa. Cationes tales como calcio, magnesio, bario, estroncio y radio pueden ser separados de una disolución acuosa mediante el empleo de una resina catiónica. Análogamente, aniones tales como fluoruro, nitrato, arseniato, seleniato, cromato, ácidos húmicos y fúlvicos pueden ser separados mediante una resina aniónica (Index., 2015).

Index (2015) menciona que los materiales de intercambio iónico más aplicados para el tratamiento de aguas son las resinas sintéticas. Ya que son materiales duraderos, en los cuales los grupos estructurales y funcionales son diseñados según las aplicaciones específicas que se pretenden obtener mediante el intercambio iónico. De manera habitual se encuentran en forma de esferas que optimicen las propiedades mecánicas e hidráulicas del lecho.

El proceso de intercambio entre la resina y la solución acuosa comprende etapas de difusión, adsorción, atracción electrostática y equilibrio ácido-base. El proceso es totalmente reversible, y bajo las condiciones de acidez o basicidad adecuadas, el equilibrio puede ser desplazado en sentido contrario, dando lugar a la forma química original de la resina (ácida, básica, sal). Esta propiedad permite que las resinas de intercambio iónico puedan ser utilizadas a lo largo de muchos ciclos de carga y regeneración. La economía de los procesos de tratamiento basados en intercambio iónico reside, precisamente, en el número de ciclos de regeneración que puedan conseguirse con una resina específica en unas condiciones de operación determinadas, y constituye un importante factor de diseño (Index., 2015).

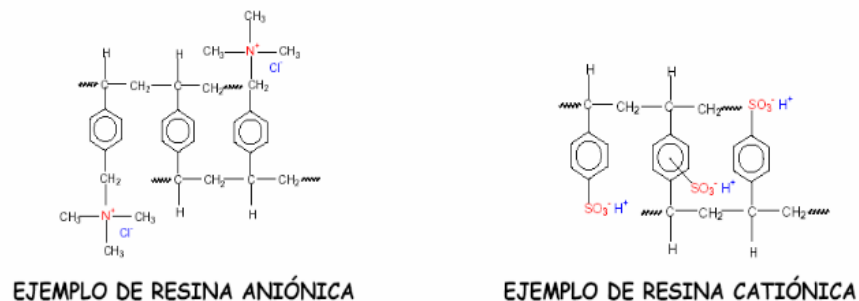
### 3. Resinas de Intercambio Iónico

Brown y Salle (1997) definen las resinas de intercambio iónico como aquellos materiales insolubles macromoleculares las cuales poseen una estructura tridimensional que contiene grupos iónicos (*Figura 2*). Tienen la capacidad de eliminar de manera selectiva los iones disueltos, mantenerlos temporalmente unidos en combinación química y cederlos de nuevo frente a una solución regenerante. Su compromiso es muy similar al de un electrolito cualquiera, con la particularidad que los grupos reactivos todos están unidos a un polímero insoluble que forma la matriz de la resina de intercambio iónico (Rigola, 1990).

Grágeda (2006) define las resinas de intercambio iónico como pequeñas esferas granuladas o esféricas insolubles en agua, las cuales están compuestas por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante. Nevárez (2009) señala que reaccionan como ácidos, bases o sales, pero se caracterizan por tener solo cationes o aniones con la habilidad de tomar parte de la reacción química por su capacidad de migración.

Por otro lado, una resina de intercambio iónico puede considerarse como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida grupos iónicos libres. Estas cadenas están unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, mediante una selección adecuada del grado de reticulación, puede limitarse la movilidad de los iones participantes en el mismo (Martínez & Monteagudo Segovia, S.F.)





Fuente 2: Martínez & Monteagudo  
 Figura 2: Estructura de una resina de intercambio

Aunque las resinas de intercambio iónico se conocen desde hace mucho tiempo las zeolitas (aluminosilicatos) naturales y sintéticas, las cuales se han aplicado a la eliminación de la dureza del agua desde el siglo pasado, las aplicaciones analíticas del cambio iónico fueron muy escasas hasta la introducción de las resinas intercambiadoras de iones. Actualmente existen resinas de intercambio iónico catiónicas ( *Figura 3* ) y aniónicas, encargadas de eliminar compuestos con cargas negativas y positivas, respectivamente (Eugene Salle., 1977). El material del cual están hechas las resinas es de tipo polimérico, éstos son copolímero de divinilbenceno o poliestireno. Una posible categorización para los polímeros puede ser la de dividirlos en termoplásticos y termoestables, según su comportamiento con los cambios de temperatura (Residuales, y otros, 2011).



Fuente 3: Aqua Systems (2015)  
 Figura 3: Resina de Intercambio Cationico



Fuente 4: Cosmos.com

Figura 4: Detalles de las esferas de una resina de intercambio ionico

Debido a que la concentración de grupos polares en las resinas es un número finito, tienen una capacidad definida de intercambio. Las resinas de intercambio iónico ( *Figura 4* ) tienen la habilidad para recuperar la capacidad original mediante el tratamiento con una solución que puede ser ácido, base o sal que desplace los iones retenidos por la resina y los reemplace por iones deseados. Este proceso se conoce como regeneración y se realiza cuando la resina agota por completo su capacidad, permitiendo de esta manera utilizar nuevamente la resina una y otra vez (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

Víctor-Ortega, Ochando-Pulido, Airado-Rodríguez y Martínez-Ferez (2016) mencionan que la regeneración de resinas de intercambio iónico es un componente importante en diversas aplicaciones, tales como lo son en el tratamiento de agua industrial, tratamiento de aguas residuales, la recuperación de iones metálicos y separación de metales pesados. Las resinas catiónicas se utilizan por lo general en camas mixtas; aunque los intercambiadores de iones necesitan grandes volúmenes de soluciones de ácido y de base para su regeneración.

Grágeda (2006) señala que el grado de entrecruzamiento el cual confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica así como insolubilidad, es un factor bastante importante de controlar debido a que no solo determina las propiedades mecánicas de la resina, también su capacidad de hincharse (swelling) y de absorber agua. El hinchado del polímero es producido cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, aumentándolos y abriendo la estructura. El proceso de hinchamiento beneficia la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales.

Según lo expuesto por la Real Academia de la lengua Española, una resina es la sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en el alcohol y en los aceites esenciales, y capaz de arder en contacto con el aire, obtenida naturalmente como producto que fluye de varias plantas. Sin embargo, hay que hacer notar que existen en la actualidad resinas naturales (origen orgánico: animal o vegetal) y resinas sintéticas (acrílicos, poliéster, epoxi).

En la actualidad se han realizado investigaciones Pérez, Sierra y Fajardo (2006) resaltan que estas investigaciones las cuales están enfocadas en el desarrollo de nuevas resinas poliméricas de intercambio iónico en un futuro serán de gran utilidad e importancia en el tratamiento de agua para el consumo humano, aplicaciones industriales y medio ambiente.

Valenzuela Marín (2004) menciona el ablandamiento por intercambio iónico, que además de remover dureza también está en la capacidad de eliminar metales como lo son el Radio y el Bario; en el transcurso de este tratamiento, los iones de sodio que se encuentran presente en la resina de intercambio son reemplazados por iones que provocan dureza ( Calcio y Magnesio en especial) .

De igual manera el autor (Valenzuela Marin., 2004) cita que para calcular el volumen que se encuentra presenta en la resina, es necesario tener datos como lo son:

- Tiempo de agotamiento
- Flujo de agua a tratar
- Capacidad de la resina
- Concentración de la solución expresada como normalidad

## DISEÑO DEL EQUIPO

El sistema consta de dos tanques de intercambio iónico a presión, un tanque de salmuera el cual contiene sodio saturado y salmuera de cloruro de sodio, y un sistema de

regeneración. Los tanques de intercambio se diseñan con un 50% de excedente, el sistema de regeneración automática se activa por incremento en la dureza que tenga el agua que está siendo tratada y cuenta con un dispositivo de seguridad que evita que ambos tanques sean regenerados al mismo tiempo, la regeneración automática termina en un tiempo predefinido. El tanque que contiene salmuera está diseñado en polietileno y se llena de manera automática empleando un flotador. Este tanque debe contener una cantidad considerable de cloruro de sodio sin resolver, esto con el fin de tener una solución de salmuera saturada para la regeneración (Gumerman & Robert., 1986).

Gumerman y Robert (1986) mencionan que la regeneración consiste en un retro lavado de flujo ascendente y una regeneración y enjuague con flujo descendente. Se emplea agua cruda para cada etapa de regeneración y en dado caso que exista suficiente presión de agua, únicamente se bombea para las plantas más grandes, en las cuales los tanques de salmuera quedan por debajo del nivel del suelo. Las plantas más grandes emplean tanques de salmuera por debajo del nivel del suelo, en las cuales es necesario bombear la salmuera durante el ciclo de retro lavado de la regeneración.

En aquellas resinas cuyos volúmenes totales son menores a  $5.3 \text{ m}^3$  ( $188 \text{ ft}^3$ ), no es necesario utilizar energía en el proceso, debido a que el ciclo entero de regeneración emplea agua cruda (sin suavizar).

### 3.1. Alternativas de manejo de resinas de Intercambio Iónico

La preparación que se le da a la resina de intercambio, postconsumo, en algunos casos consiste en la inmovilización empleando la vitrificación y matrices con cemento, bitumen, polímeros, entre otros. En general, las resinas se tratan por centrifugación, filtración al vacío, pulverización y secado como un paso previo a tratamientos térmicos, de oxidación, biodegradación, inmovilización y combustión. La preparación de espumas antecede a los procesos de pirolisis, incineración, degradación por plasma térmico y vitrificación (Residuales, y otros, 2011).

Montes Urrego y Díaz Alarcón (2016) señalan que los tratamientos postconsumo más utilizados para las resinas de intercambio en la actualidad son inmovilización y combustión.

### 3.2. Escala de producción y consumo de las resinas de Intercambio Iónico

Actualmente no se dispone fácilmente de cifras de producción de resinas de intercambio iónico por razones comerciales, pero la escala de operaciones puede juzgarse por los datos mostrados a continuación (*Tabla 1*) que muestran la utilización de las resinas que poseen como base estireno, publicados en 1962 (N.F. (Nuffield Foundation)., 1974).

Tabla 1: *Utilización de las Resinas*

TIPO DE RESINA	APLICACIÓN	CONSUMO EN m <sup>3</sup> POR AÑO
Intercambiadores catiónicos	Tratamiento de aguas industriales	4950
	Tratamiento de aguas domesticas	10600
	Catalizadores de epoxi dación	226
	Extracción de uranio	157
	Resinas de aplicación nuclear	28
	Resinas de aplicación farmacéutica	255
	Tratamiento de azúcar	170
	Otros usos	736
Intercambiadores anionicos		1560

---

Fuente 5: Nuffield Foundation. N.F. (1974)

Se puede observar que cerca al 90% de la producción de resinas de intercambio catiónico obtenidas a partir de estireno se aplican al tratamiento del agua y que aproximadamente el 68% de esta se utiliza para fines domésticos (N.F. (Nuffield Foundation)., 1974).

### 3.3. Aplicaciones de las resinas intercambiadoras de iones en el tratamiento de aguas

#### 3.3.1. Ablandamiento

Se emplea una resina intercambiadora de cationes fuertemente ácida en forma sodio. Los iones que constituyen la dureza de agua, principalmente el calcio y el magnesio, se intercambian con el sodio de la resina (François de Dardel., 2019). El agua ablandada sirve para varios usos entre los cuales podemos mencionar la industria textil, calderas industriales de baja presión, calderas doméstica y lavanderías.

#### 3.3.2. Descarbonatacion

François de Dardel (2019) cita que en muchas regiones del mundo como es el caso de Europa Central y Meridional, las aguas naturales contienen bicarbonatos. Los iones de calcio y magnesio que estan asociados con estos se eliminan con resinas debilmente acidas en forma de hidrogeno. A este proceso tambien se le conoce como eliminacion de la dureza temporal. La salinidad del agua que es tratada es mas baja que la del agua bruta. Entre los servicios que ofrece el agua descarbonatada podemos mencilar el tratamiendo del agua de produccion de cerveza y otras bebidas, ablandamiento de aguas de abastecimiento publico, procesos industriales entre otros.

### 3.3.3. Desmineralizacion

Para lograr la eliminacion de todos los iones, el primer lugar el agua debe pasar a traves de una columna intercambiadora de cationes en forma hidrogeno, seguidamente debe atravesar una columna intercambiadora de aniones en forma de base libre o hidroxilo. Los cationes se cambian por iones  $H^+$  de las resinas cationicas, y los aniones por iones  $OH^-$  de las resinas anionicas. Estos iones se recombinan formando nuevas moleculas de agua (François de Dardel., 2019).

### 3.3.4. Lechos mezclados

#### 3.3.4.1. Lechos mezclados de pulido

Para lograr una calidad de agua desmineralizada aún mejor, similar a la del agua totalmente pura, se puede instalar una columna de resinas mezcladas: una catiónica fuertemente acida en forma de  $H^+$  y una anionica fuertemente básica en forma de  $OH^-$ . Dichas resinas tiene que estar mezcladas en la fase de producción pero hay que separarlas para regenerar (François de Dardel., 2019).

#### 3.3.4.2. Lechos mezclados de trabajo

François de Dardel (2019) menciona en estos casos que cuando el agua bruta de baja salinidad o cuando el volumen de agua necesario es modico, se emplean lechos mezclados alimentados con agua de abastecimiento municipal o con permeado de osmosis inversa. Se les llama “lechos mixtos de trabajo”. Las resinas son iguales que para los lechos mixtos de pulido. Un caso especifico es el servicio de desionizacion con botellas regeneradas externamente.

### 3.4. Eficiencia del proceso

En el proceso la eficiencia depende de diverson factores como lo son (Grágeda, 2006):

- Afinidad de la resina por un ion en particular
- pH del fluido
- Concentracion de iones
- Temperatura
- Difusion

Estando este ultimo factor en funcion de la densidad del ion, carga electrostatica, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina (Grágeda, 2006).

### 3.5.Vida Útil de las resinas de intercambio iónico

Debido a una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas sufren la perdida de sitios de intercambio activo o bien sufren la rotura de los enlaces transversales disminuyendo su capacidad de intercambio. Se estima que la vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico esta entre los 5 y los 10 años (Ricardo Rodriguez., 2011).

Aquellas resinas catiónicas fuertes en primer lugar pierden su capacidad de intercambio para capturar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas anionicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como carbonatos y silicatos (Ricardo Rodriguez., 2011).

### 3.6.Capacidad total de la resina

Se define como aquel valor de la concentracion de iones que puede ser retenidos por unidad de peso de la resina. Por lo general es expresado en miliequivalentes de soluto retenidos/ g de resina seca. Este es un parametro fundamental para la selección del intercambiador ya que por lo general se requieren altas capacidades para la separacion o purificacion a realizar (McCabe, Smith, & Harriot., 1994).



### 3.7. Formas de obtener una resina

Hidalgo Dominguez y Guaman Perez (2006) señalan dos formas de obtener una resina de intercambio iónico funcionalizada las cuales consisten en :

- Incorporar el grupo funcional durante el proceso de polimerización, un ejemplo sería empleando monómeros ya funcionalizados
- En primer lugar se debe llevar a cabo el proceso de polimerización y de manera seguida se introducen los grupos funcionales sobre la matriz polimérica por medio de las reacciones químicas oportunas, como sulfonación o cloración-aminación.

En el primer proceso se obtienen resinas más homogéneas, provocando limitaciones en el entrecruzamiento y esto conlleva a que el proceso más utilizado sea el segundo. Por medio de los polímeros ya funcionalizados se pueden realizar otras reacciones químicas para llevar a cabo su derivatización y obtener resinas con grupos funcionales más específicos que permitan aplicaciones más concretas (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

## 4. Tipos de resinas de Intercambio Iónico

Duarte Valencia y Vizcaíno Sánchez (2015) plantean que en la actualidad se dan a conocer muchos tipos de resinas de intercambio iónico, clasificándose así de acuerdo a su grupo funcional: Resinas catiónicas de ácido fuerte, resinas catiónicas de ácido débil, resinas aniónicas de base fuerte, resinas aniónicas de base débil y resinas quelatantes.

### 4.1. Tipos según su grupo funcional

#### 4.1.1. Resinas catiónicas de ácido fuerte

Las resinas catiónicas de ácido fuerte se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico, su grupo funcional es el ácido sulfónico ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) que es altamente ionizable,

intercambian iones positivos (cationes), estas resinas funcionan a cualquier pH (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009), necesita de grandes cantidades de regenerante y es la resina más empleada (CIDI, 1999).

Por otro lado Ávila J, (1999) define las resinas catiónicas fuertemente ácidas como aquellas cuya funcionalidad derivan de los grupos ácidos sulfónicos. Estos intercambiadores catiónicos de ácido fuerte funcionan a cualquier pH, dividen todas las sales y requieren una gran cantidad de regenerante. Esta es la resina que se escoge para casi todas las aplicaciones de suavizado y como primera unidad en un desmineralizador de dos lechos, o como componente catiónico de un lecho mixto.

#### 4.1.2. Resinas catiónicas de ácido débil

Ávila J. (1999) menciona que las resinas catiónicas de ácido débil contienen grupos carboxílicos como sitios de intercambio. La resina suele ser muy eficiente, debido a que es regenerada con casi 100% de la cantidad estequiométrica de ácido, en comparación al 200% o 300% requerido para los cationes de ácido fuerte. Estas resinas están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo, en temperaturas bajas, y con una relación entre la dureza y la alcalinidad menor de 1.0. Con frecuencia son utilizadas muy efectivamente en combinación con una resina catiónica de ácido fuerte, bien sea en configuración de lecho separado o lecho estratificado. En cualquier caso; el agua de entrada se pone en contacto con la resina catiónica de ácido débil en donde se eliminan aquellos cationes que estén asociados con la alcalinidad. Los cationes sobrantes son eliminados por la resina catiónica de ácido fuerte. La resina catiónica de ácido débil es regenerada con el ácido de desecho de la unidad de ácido fuerte.

Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico. Los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

El grupo funcional es un ácido carboxílico (COOH) presente en uno de los componentes del copolímero principalmente el ácido acrílico o metacrílico. Son resinas altamente eficientes (CIDI, 1999), tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos, elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en la columna cuando no cuentan con suficiente espacio en su interior. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo; a continuación se evidencia las características de una resina catiónica en la parte superior y una resina aniónica en la parte inferior ( *Figura 5*).



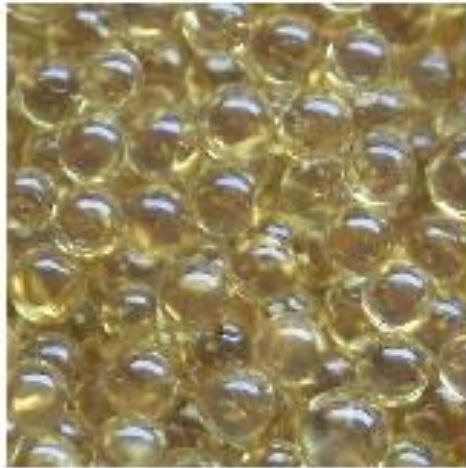
Fuente 6: Desmineralizadores.com

Figura 5: Características de una resina cationica y una resina anionica

#### 4.1.3. Resinas anionicas de base fuerte

Las resinas anionicas de base fuerte se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno clorometilados con aminas terciarias. Su grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, ( $R_4N^+$ ). Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

Las imágenes mostradas demuestran tamaño similar en una de ellas (Resina Monoesfera) (*Figura 6*) y en la otra se evidencia como el tamaño de partículas se torna irregular (Resina no Monoesferica) (*Figura 7*).



Fuente 7: Desmineralizadores.com  
Figura 6: Resina Monoesfera



Fuente 8: Desmineralizadores.com  
Figura 7: Resina no Monoesferica

Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario. Los dos grupos principales de resinas aniónicas de base fuerte son las de Tipo 1 y Tipo 2, dependiendo del tipo de amina que se utiliza durante el proceso de activación química. Químicamente, los dos tipos difieren en el tipo de especie de sitios de

intercambio de amonio cuaternario. Los sitios de Tipo 1 tienen tres grupos de metilo; en los de Tipo 2, un grupo de etanol reemplaza a uno de los grupos de metilo (Ávila J., 1999).

Ávila (1999) define las resinas de Tipo 1 como aquellas adecuadas para la eliminación total de aniones en todas las aguas. Son más difíciles de regenerar y se hinchan más al pasar de la forma de cloruro a la de hidróxido que las de Tipo 2. Son más resistentes a altas temperaturas y deben ser usadas en aguas de alta alcalinidad y alto contenido de silicio.

Por otro lado, las resinas de Tipo 2 presentan la eliminación de todos los aniones, pero pueden ser menos efectivas en eliminar el silicio y dióxido de carbono de las aguas donde estos ácidos débiles constituyen más del 30% del total de aniones. Los aniones de Tipo 2 brindan mejores resultados en aguas que contienen predominantemente ácidos de minerales libres (Ávila J., 1999).

#### 4.1.4. Resinas aniónicas de base débil

Son aquellas resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria ( $-NH_2$ ), secundaria ( $-NHR$ ) y terciaria ( $-NR_2$ ). Suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad, pero su cinética es lenta. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración, no se puede utilizar a pH altos, pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento, deben ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio, fijan los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, pero no los aniones débiles del ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), ni del ácido silícico ( $H_2SiO_3$ ) (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

Ávila (1999) define las resinas aniónicas de basicidad débil como aquellas que contienen grupo funcional de poliamina, que adsorbe ácido, eliminando así los ácidos fuertes de la corriente del efluente de cationes. Esta resina débilmente ionizada es regenerada de manera eficiente con hidróxido de sodio que restaura los sitios de intercambio a la forma de base libre. El paso de regeneración es esencialmente una neutralización de los ácidos fuertes que

son recolectados en la resina. Estas resinas deben ser usadas en aguas ( *Figura 8* ) con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio.



Figura 8: Perlas de resinas utilizadas en el tratamiento de aguas mediante intercambio ionico  
Fuente 9: Fluence News Team (2016)

#### 4.1.5. Resinas Quelatantes

Grágeda (2006) y FECYT (2001) mencionan que en estas resinas el grupo funcional tiene las propiedades de un reactivo específico ya que forman quelatos selectivamente con algunos iones metálicos. Los átomos más frecuentes son azufre, nitrógeno, oxígeno y fósforo que forman enlaces de coordinación con los metales. Son poco utilizadas en la industria por ser más caras que las mencionadas anteriormente y por tener una cinética de absorción más lenta.

#### 4.2. Tipos según su estructura de red

##### 4.2.1. Microporosas o Tipo Gel

Son resinas convencionales originadas a partir de la polimerización del divinilbenceno y el estireno. Los grupos de intercambio están distribuidos estadísticamente en la partícula, es muy difícil describir la porosidad ya que la distancia entre los enlaces cruzados y las cadenas varía considerablemente (CIDI, 1999) (FECYT, 2001).

En uno de sus apartados Margineda de Godos (2004) menciona que estas resinas poseen una red macroscópicamente homogénea y elástica, la cual contiene parte del disolvente utilizado en su síntesis. Son caracterizadas por presentar una matriz sin poros (*Figura 9*) La imagen fue obtenida por microscopia electrónica de la matriz de las resinas de intercambio iónico. En su lugar se encuentran canales a través de su estructura que provienen del “hinchaiento” o swelling del gel. Los canales tienen un tamaño mayor cuanto menor sea el porcentaje de divinilbenceno utilizado en la síntesis, regulando así el tamaño de la especie, ion o molécula que entra en la estructura y su velocidad de intercambio y difusión.

#### 4.2.2. Macroporosas o Macroreticulares

Las resinas llamadas macroporosas (*Figura 10*) esta imagen fue obtenida por microscopia electrónica de la matriz de las resinas de intercambio iónico o macroreticulares se obtienen mediante un proceso similar al de las geliformes, pero añadiendo durante la polimerización materiales inertes no polimerizables, denominados agentes modificadores, entre los que se encuentran las parafinas y el tolueno, que dan lugar a la formación de grandes huecos o macroporos en la estructura de la matriz. Por lo tanto, su estructura estará formada por dos fases bien diferenciadas, la primera fase constituida por las micro partículas de tipo geliforme que forman la matriz de la resina y una fase porosa constituida por los macroporos que dejan los conglomerados de micro partículas al unirse entre si (Rodriguez Romero Juan Francisco., 1995).

Su apariencia es completamente diferentes a las resinas tipo gel pero comparten la similitud de estar formadas por los polímeros de poliestireno y divinilbenceno (CIDI, 1999) eso a causa de que en la síntesis de esta resina se emplea un cosolvente que se implementa interponiéndose entre las cadenas poliméricas formando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las de tipo gel siendo mayor la capacidad de intercambio favoreciendo la difusión de los iones y mejorando por lo tanto la cinética de intercambio (FECYT, 2001) (Grágeda, 2006).

#### 4.2.3. Isoporosas

Son identificadas por poseer un tamaño de poro relativamente uniforme por medio del cual aumenta la permeabilidad de los iones dispuesto al interior de la red; se caracterizan de igual forma por ser resinas con una alta capacidad, un bajo costo en comparación a las resinas macroporosas y una regeneración bastante eficientes (FECYT, 2001) (Grágeda, 2006).

Estas resinas constituyen un grupo en el que se modifica su estructura durante la síntesis de manera que se obtienen polímeros con un tamaño de poro por lo general uniforme. De esta manera, las resinas isoporosas tienen baja sensibilidad al envenenamiento orgánico o fouling (Margineda de Godos., 2004).

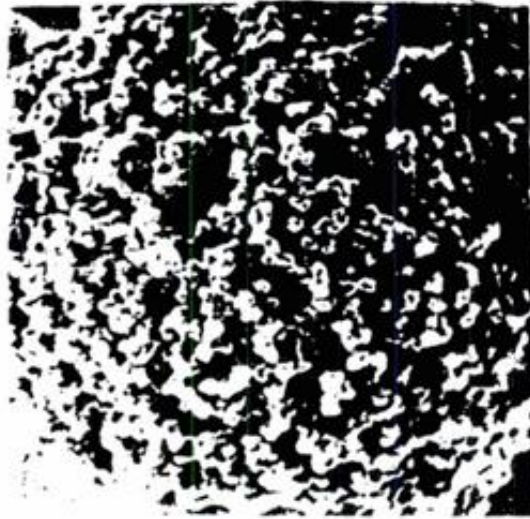
#### 4.2.4. Peliculares

Son un tipo de intercambiador iónico especial el cual consiste en un material intercambiador inmobilizado en forma de una película sobre un soporte inerte. Presentan cinéticas muy rápidas y permiten trabajar a elevadas presiones, lo cual las hace muy útiles para la cromatografía. Su capacidad es muy pequeña (Margineda de Godos., 2004).



Fuente 10: Rodríguez Romero Juan Francisco (1995)  
Figura 9: Resina Geliforme





Fuente 11: Rodriguez Romero Juan Francisco (1995)  
Figura 10: Resina Macroporosa

La siguiente imagen (*Figura 11*) muestra con exactitud las características que han sido mencionada con anterioridad (Margineda de Godos., 2004).

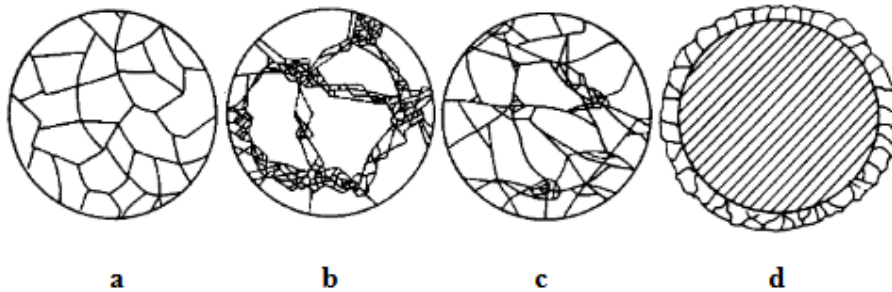
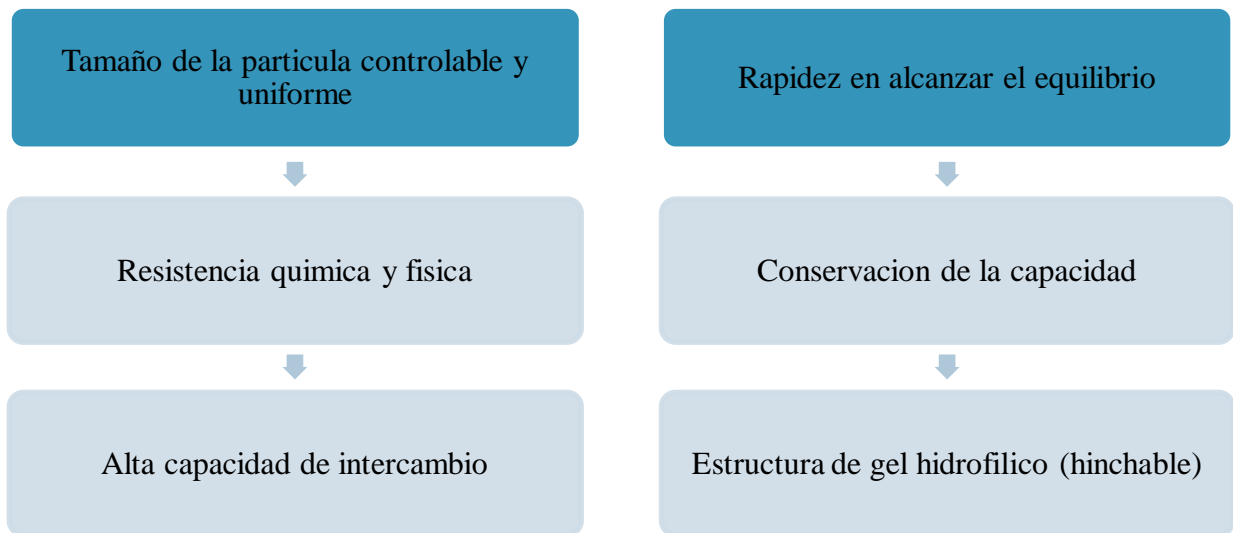


Figura 11: Modelos estructurales de resinas  
Fuente 12: Margineda de Godos (2004)

Valcarcel y Hens (1994) en conjunto con Margineda de Godos (2004) mencionan ciertas características consideradas ideales para una resina de intercambio ionico (*Esquema 1*).

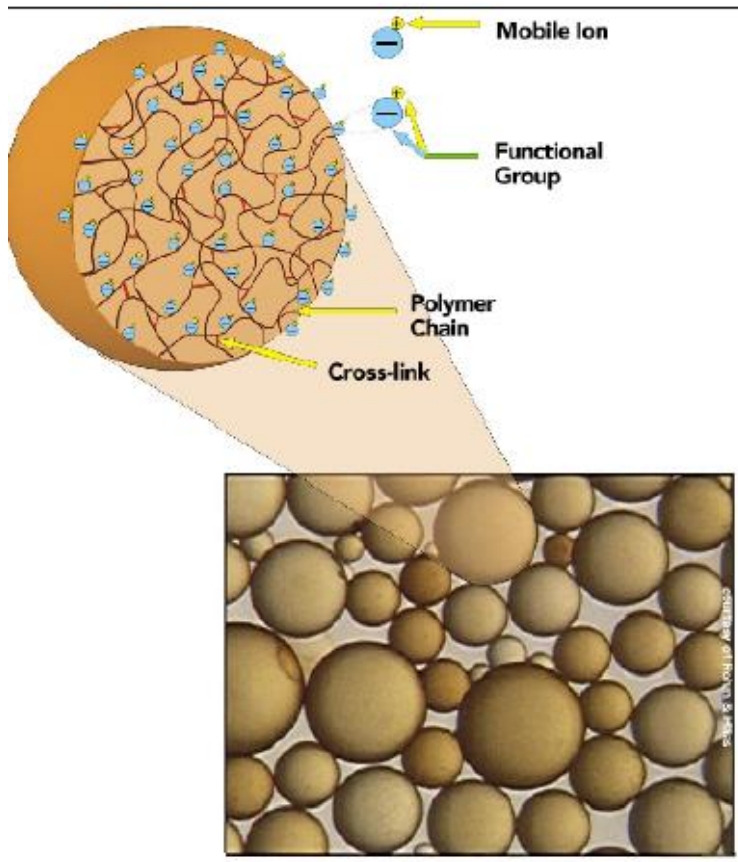


Fuente 13: Valcarcel & Hens (1994); Margineda de Godos (2004)  
 Esquema 1: Características ideales para una resina de intercambio iónico

#### 4.3. Estructura de las resinas de intercambio iónico

Se encuentran conformadas por una matriz y unos grupos activos (*Figura 12*)

- Los grupos activos se albergan en la matriz y son los encargados del intercambio. Estos grupos determinan la selectividad y la capacidad de la resina.
- Por otra parte, la matriz es una estructura insoluble en todos los disolventes y elástica, esto permite su expansión. Tiene una buena superficie de contacto y un gran número de poros de tamaño uniforme. Generalmente su estructura contiene polímeros lineales y divinilbenceno formando una estructura tridimensional. Las características y composición de la matriz definen en gran medida la estabilidad de la resina (Nieves Cifuentes., S.F).



Fuente 14: Nieves Cifuentes  
 Figura 12: Estructura de la Resina

#### 4.4. Características de las resinas de intercambio iónico

##### 4.4.1. Forma

Los gránulos esféricos por lo general poseen una forma que debe tener su máxima homogeneidad y dimensión uniforme; de manera que en la filtración su fluido se mantenga aceptable (CIDI, 1999) (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

##### 4.4.2. Estabilidad

Las resinas sufren varias formas de stress en servicio (Dardel, 2017) (Tabla 2).

Tabla 2: *Formas de Stress de una resina*

---

FORMA DE STRESS DE LAS RESINAS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Stress térmico en los casos de temperatura elevada o de fuertes variaciones de temperatura</li><li>• Stress mecánico en caso de pérdida de carga</li><li>• Stress osmótico debido a las variaciones de volumen</li><li>• Envenenamiento por materias orgánicas</li><li>• Stress mecánico en el transporte de la resina de una columna a otra</li></ul>

---

Fuente 15: Dardel (2017)

CIDI (1999) junto a Nevárez (2009) mencionan que una resina de intercambio iónico se desestabiliza en el momento en que empieza a deteriorarse. Dicho deterioro se presenta de diversas formas ( *Tabla 3* ) siendo notorio que cada una de ellas se relaciona y es independiente de varios factores; bajo condiciones normales. Su deterioro puede ser de naturaleza química y se demuestra en una pérdida gradual de la capacidad de intercambio. Seguidamente se mostrará las formas en las que se puede deteriorar la resina:

Tabla 3: *Deterioro de la resina*

---

FORMAS DE DETERIORO
<ul style="list-style-type: none"><li>• Daño en los grupos funcionales</li><li>• Disminución en la capacidad total</li><li>• Ruptura de las partículas de la resina</li><li>• Ensuciamiento por precipitación de elementos extraños sobre la partícula del intercambiador</li><li>• Despolimerización de la resina y consecuente hinchamiento</li></ul>

---

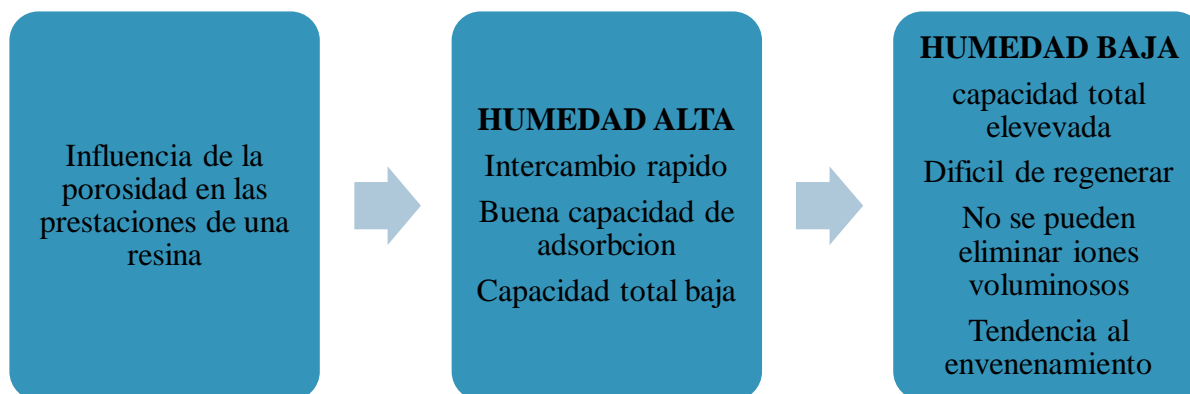
Fuente 16: Icedo Garcia & Ramona (2011)

#### 4.4.3. Tamaño de la partícula

Al ser utilizadas industrialmente se puede decir que el tamaño de las partículas presentes en las esferas de la resina suele ser una relación entre la velocidad (Generalmente es mayor con partículas pequeñas) de intercambio y la tasa de flujo (Demanda grandes partículas de manera que logre tener menos pérdidas de presión). Su tamaño oscila en un diámetro de 0,3 y 1,2 mm, aunque se logran conseguir de menores incluso mayores tamaños dependiendo de la necesidad del uso (CIDI, 1999) (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

#### 4.4.4. Humedad

En una resina la retención de humedad se relaciona con su porosidad, así como su forma iónica. Se expresa generalmente como porcentaje de la masa de una resina en una determinada forma iónica (Dardel, 2017). El autor menciona la influencia que presenta la porosidad de una resina de la siguiente manera ( *Esquema 2* ).



Fuente 17: Dardel (2017)

Esquema 2: Influencia de la porosidad en las prestaciones de una resina

Cerca de la mitad de la masa de una resina es agua a excepción de cuando la resina está seca o cuando el agua de hidratación normal es reemplazada por un solvente orgánico. Sus

moléculas de agua rodean los grupos funcionales y llenan las partes que están vacías del cuerpo de la resina. De esta manera cuando una resina posee alta humedad tiene menor materia seca llevando menos grupos activos y tiene una capacidad más baja. Por otro lado, aquellas resinas muy porosas proporcionan un acceso más fácil a los iones de mayor tamaño (Dardel, 2017).

#### 4.4.5. Resistencia a la fractura ( *Esquema 3* )

En las resinas la expansión y contracción en el agotamiento y la regeneración no sería causa para que se revienten los granulos.

El diseño de aparatos de intercambio iónico tiende a estar dirigido a la expansión, para evitar excesiva tensión o abrasión mecánica de la resina.

El agua ionizada por las resinas de intercambio iónico debe estar libre de material suspendido o coloidal debido a que pueden obstruir la resina, disminuir el flujo e intercambio, como también el tiempo de vida.

Esquema 3: Resistencia a la fractura  
Fuente 18: Garcia & Ramona (2011)

#### 4.4.6. Densidad

La densidad aparente de las resinas se expresa en masa por volumen (g/L). Debido a que existen pequeñas variaciones entre lotes producidos, generalmente se utiliza un valor estándar de peso. Estas variaciones son debido a la humedad residual que permanece entre las partículas de la resina (Dardel, 2017).

CIDI (1999) y Nevárez (2009) mencionan que la densidad es una propiedad muy importante en las resinas. Existen diferentes tipos de densidad, la que más sobresale es la densidad húmeda y oscila de 1,02 a 1,38 según el tipo de resina.

#### 4.4.7. Solubilidad

En el intercambio iónico las sustancias logran ser solubles bajo operación normal. En la actualidad gran mayoría de las resinas intercambiadoras son poliácidas o polibases de gran peso molecular que tienen por virtud ser insolubles pero después de determinadas temperaturas se solubilizan (CIDI, 1999) (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

#### 4.4.8. Caída de presión

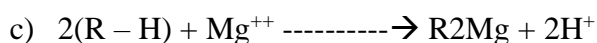
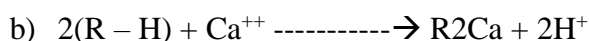
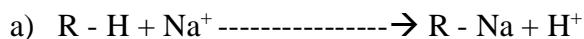
La caída de presión relaciona el tamaño, forma, uniformidad y compresibilidad de las partículas presentes en las resinas intercambiadoras, la viscosidad de la solución, temperaturas y tasa de flujo utilizada. De esta manera logra ser importante en el diseño de equipos (CIDI, 1999) (Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth., 2009).

### 4.5. Reacciones de intercambio que efectúan las resinas

#### 4.5.1. Ciclo catiónico

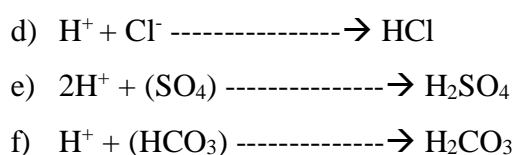
##### 4.5.1.1. Fase de agotamiento

El autor menciona que los cationes  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^+$  cuando pasa por la resina catiónica son intercambiados por cationes hidrogeno (Dominguez & Guaman Perez., 2006).



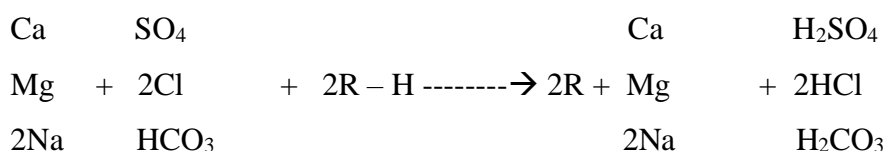
La remoción de estos cationes depende de la selectividad de la resina. Aquellas resinas catiónicas reciben una mayor selectividad por los cationes divalentes que por los monovalentes.

Generalmente la fuga de un intercambiador catiónico es  $\text{Na}^+$  y no  $\text{Ca}^{++}$  o  $\text{Mg}^{++}$ . Los iones hidrogeno liberados en las ecuaciones anteriores forman ácidos con los aniones que acompañan a los cationes intercambiados (Dominguez & Guaman Perez., 2006).



Las ecuaciones (d) y (e) muestran los ácido clorhídrico y sulfúrico los cuales son altamente disociados y presentan equilibrios fuertes desplazados a la izquierda; de manera que generan gran cantidad de hidrógenos ( $\text{H}^+$ ) libres, los cuales limitan la consumación de la reacción presentada en la ecuación (d) (Dominguez & Guaman Perez., 2006). Por otra parte la ecuación (a) logra consumirse por completo, esto debido a que el ácido carbónico aun siendo un ácido débil presenta fuertes desplazamientos de un equilibrio hacia la derecha esto provoca la reducción de hidrógenos libres en solución.

Por consiguiente las reacciones en la fase de agotamiento de una resina catiónica fuertemente acida puede reducirse de la siguiente manera (Dominguez & Guaman Perez., 2006).



#### 4.5.1.2.Fase de regeneracion

La resina debe ser regenerada al momento en que alguno de los iones que se intenta remover aparece en el efluente de la columna intercambiadora. Un intercambiador cationico se



regenera cuando se precisa de una fuente rica en iones hidrogeno, para esto se utiliza ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, siendo el ácido clorhídrico el que da mayor capacidad operativa, pero a causa de su elevado costo su uso es limitado a equipos pequeños (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

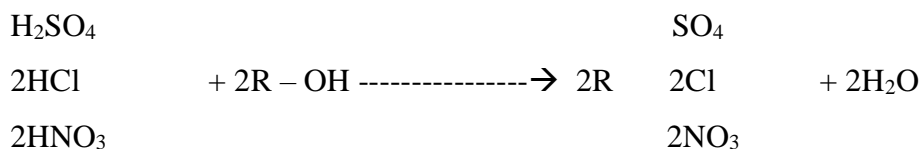
La regeneración químicamente es posible a causa de la alta concentración de hidrogeno en la solución regenerante; pero debido a que las resinas son fuertemente acidas el efluente regenerante contiene mucho acido sin reaccionar, que podría ser reutilizado para mejorar su utilización. La concentración optima del ácido se encuentra en 4 a 5% (en peso) (Encyclopedia of polymer science and technology).

#### 4.5.2. Ciclo anionico

La desmineralización se completa con un tratamiento con resinas anionicas, su alimentación se constituye por ácidos que los aniones influentes formaron en la resina catiónica (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

##### 4.5.2.1.Fase de agotamiento

El intercambio de iones hidroxilo que experimenta la resina anionica por iones negativamente ionizados como el sulfato, cloruro y nitratos se ve reflejada de la siguiente manera (Dominguez & Guaman Perez., 2006).



En caso que sea una resina anionica fuertemente básica, puede remover también ácidos débilmente ionizados como el carbonico y silícico.



Si la resina es débilmente básica, no removerá el  $\text{CO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  y solo se darán las reacciones antes mencionadas (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

#### 4.5.2.2. Fase de regeneración

La regeneración únicamente es posible a la alta concentración de la soda caustica (4% en peso), la cual da la “Fuerza Directora” necesaria para volver la resina a la forma hidróxido (Encyclopedia of polymer science and technology). A causa de esta poca afinidad de la resina por los  $\text{OH}^-$ , la regeneración de las resinas fuertemente básicas no es completa quedando una porción grande de regenerante sin ser utilizado (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

### 5. Tratamiento de efluentes por intercambio iónico

En este tipo de operaciones es habitual utilizar un material denominado resinas de intercambio iónico el cual se encarga de suspender de manera selectiva sobre la superficie los iones que se encuentran disueltos en el agua, de forma que los mantiene por un tiempo unidos a la superficie y seguidamente los cede frente a una disolución con un regenerante fuerte. De esta manera se considera que la aplicación de estos sistemas es habitual en situaciones como la eliminación de sales cuando estas presentan una baja concentración, también es típica en la aplicación para la desmineralización y el ablandamiento de aguas, así como lo es también para la retención de algunos productos químicos (Condorchem envitech. Smart ideas for wastewater & air treatment., 2019).

De forma general se mencionan algunas propiedades, ventajas y características que se encuentran en el proceso de intercambio iónico en aguas ( *Tabla 4* ).

Tabla 4: *Características, Propiedades y Ventajas del proceso de intercambio iónico*

---

PROPIEDADES, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO EN AGUAS
Logran mantener su electro neutralidad en el proceso de la reacción
Actúan de manera selectiva, de manera que pueden preferir un ion sobre otro con afinidad relativa oscilando en valores relativos de 15 o más.
La reacción de intercambio iónico puede avanzar en dos sentidos, esto significa que es reversibles.
Químicamente son bastante estables, tienen una larga duración y son fácil de regenerarse.
Poseen cierta facilidad de adaptación y automatización a algunas situaciones.
Son muy versátiles siempre que se logre trabajar en concentraciones relativamente bajas de sales.
En la actualidad las resinas tienen altas capacidades de tratamiento, siendo así económicas y compactas.

---

Fuente 19: Condorchem envitech. Smart Ideas for Wastewater & air treatment (2019)

## 6. Metales Pesados

Los siguientes autores Domingo (2008), Daphia (2002), Soto, Lozano, Barbaron y Alcalá (2004) mencionan que los índices de contaminación elevada, a causa de altas concentraciones de metales pesados presentes en aguas residuales, debido a actividades industriales, indican como resultado el deterioro de lagos, ríos y diversos cuerpos de agua, vitales para cualquier ecosistema. De igual forma el aumento de la población, la extensión de las zonas urbanas y la creciente industrialización, generan mayor preocupación en los impactos adversos sobre el recurso hídrico. Esto genera que los residuos líquidos sean objeto de tratamiento antes de ser vertidos a los cuerpos de agua naturales, sin embargo, los metales pesados son considerados inhibidores de procesos biológicos y dañinos para la salud.

Las metodologías analizadas para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados han sido rigurosas; de modo tal que se han incluido fenómenos biotecnológicos, de osmosis inversa, precipitación química, adsorción, ultrafiltración e intercambio iónico (Matlock, Howerton, & Atwood, 2002), obteniendo en algunos casos la preconcentración de la solución (Hagarová, Buidos, & Kubová., 2013) y (Bahadir, Numa, Ozdes, Bektas, & Soyak., 2014).

Algunos tratamientos han mostrado problemas al momento de ser aplicados, debido a que tienen limitaciones en el momento de retirar los metales de los lodos resultantes en procesos industriales, de manera específica en el proceso de separación de contaminantes en la fase sólida, también como al implementar un proceso de bioadsorción (Agouborde, 2008), No obstante ciertos métodos como la anterior mencionada no puede ser aplicada para soluciones que contienen elevados contenidos metálicos en solución además de presentar algunos problemas para la separación de la fase acuosa y sólida (Purakin & Paknikar, 1999) , por otro lado, la microfiltración (Ritchie, 2001), la osmosis inversa y la ultrafiltración, demuestran poca viabilidad para las pequeñas empresas debido a los elevados costos de operación en el proceso y al reemplazo de resinas en el caso del intercambio iónico (Escobar, Salazar, & Tora, 2006).

Aquellos metales pesados que se encuentran presentes en el ambiente como consecuencia de los procesos naturales y contaminantes ocasionados de las diversas actividades humanas; son estables y persistentes en ambientes acuáticos. Metales como Zn, Fe, Cu y Mn son importantes ya que son esenciales para el metabolismo de organismos, el inconveniente radica en su estrecha frontera entre la necesidad y la toxicidad. Por otra parte metales como el Cd, Hg, Cr y Pb alcanzan a tener un nivel de toxicidad similar, inclusive en bajas concentraciones con las condiciones establecidas, por lo cual requieren de supervisión constante en los sistemas de tratamiento de aguas (Campos Hernando., 1987).

Cartaya, Reynaldo y Peniche (2008) junto a Akar, Tosun, Kaynak, Kavas e Incirkus (2009) Recientemente, existe gran preocupación a nivel mundial, a causa del incremento notorio en los índices de contaminación de efluentes industriales generados a causa de los metales

pesados como lo son Cr, Pb, Cd, Hg. La OMS (Organización Mundial de la Salud) señalo que la mayor concentración de iones de metales pesados en agua debe estar en un rango promedio de 0,01-1 ppm (WHO, 2003), sin embargo recientemente se reportan concentraciones de iones de metales pesados que alcanzan hasta 450 ppm en los efluentes (Pinzon-Bedoya & Cardona-Tamayo., 2010).

Las principales industrias que son mayor fuente contaminante de metales pesados son; industria del cemento, galvanoplastia, minería, colorantes, materia fotográfico, producci3n de acero, fabricaci3n de textiles, producci3n de energía, conservaci3n de la madera, producci3n de acero, refrigeraci3n por agua entre otras (Cobos, Londoño, & Florez Garcia., 2009) y (Correa, Velasquez, & Quintana., 2012).

Debido a que en los sistemas acuáticos se encuentran presentes elementos metálicos se le han denominado elemento traza. Algunos se consideran nutrientes esenciales para animales y plantas, micronutrientes tales como Mn(Manganeso), Mo(Molibdeno), Cu(Cobre), Co(Cobalto), Zn(Zinc), Se(Escandio) y V(Vanadio); por otro lado, elementos como el Ni(Niquel), Sn(Estaño) y Cr(Cromo) se consideran necesarios únicamente para animales, pero cuando est n presentes estos elementos en sistemas ambientales a elevadas concentraciones a ciertos niveles, a causa de desequilibrios naturales o por introducci3n antropogénica, suelen ser t3xicos para los seres vivos (Domenech & Peral, 2008).

Al momento de clasificar los metales, otro de los términos de clasificaci3n son los metales pesados, haciendo referencia a aquellos metales que generan un impacto ambiental a causa de su toxicidad y cuya principal propiedad es tener una densidad aproximadamente superior a 6 g/cm<sup>3</sup> a excepci3n del Ti(Titanio) (4,5 g/cm<sup>3</sup>), considerándose así un metal pesado, sin embargo posee otras propiedades de carácter ambiental (Baird, 2001), (Domenech & Peral, 2008), (O'Connell, Birkinshaw, & O'Dwyer, 2008).

Camacho Barreiro y Ariosa Roche (1998) definen a los metales pesados como aquellos elementos cuyo peso at3mico son elevados, son potencialmente t3xicos, y se emplean en procesos industriales entre estos están el cadmio (Cd), cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y el niquel (Ni) que en bajas concentraciones suelen ser nocivos tanto para las plantas

como para los animales. Como plantea Ruiz (2010) definición exacta para describir los metales pesados no existe, mas sin embargo se puede refería a ellos como el conjunto de elemento, incluyendo también algunos compuesto que ocasionalmente suelen ser de carácter metálico, aunque comprenden cierto número de elementos semimetálicos, inclusive no metálicos, y tienen alto grado de contaminación, toxicidad o ecotoxicidad.

Los metales pesados forman un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a  $5\text{g/cm}^3$ . El rasgo que distingue de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), vanadio (V), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), Cu, Zn y molibdeno (Mo), se ha obtenido que también tiene efectos tóxicos sobre las células, en especial como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Abud, Trujillo, & Navarro., 2013).

Gracia-Barrera (2016) mención que el principal inconveniente de la contaminación por metales pesados, es que no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales debido a que no son biodegradables. Por el contrario, siguen un ciclo global, donde las aguas naturales son el principal camino. Es por eso, que en la actualidad los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad del agua debida a su toxicidad y muy especialmente al comportamiento bioacumulativo. Además, los metales pesados tienen a reaccionar con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, etc., por lo que se acumulan en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de ríos, lagos y mares.

#### 6.1. Actividades industriales generadoras de metales pesados ( *Tabla 5* )

Tabla 5: Principales actividades industriales

INDUSTRIA	METALES	CONTAMINACION DERIVADA
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Escombreras, drenaje de ácidos de mina, relaves
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Ti	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado termino de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales.  Relaves y escoriales
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas

Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuoso y solido desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y Ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas.

---

Fuente 20: Cavides Rubio, Muloz Calderon, Perdomo Gualtero, Rodriguez Acosta y Sandoval Rojas (2015)

El implementar metales pesados en los procesos industriales han generado que concentraciones amplias de metales pesados potencialmente tóxicos sean emitidos a la atmosfera y vertidos en ambientes tanto terrestres como acuáticos (Fu & Wang., 2011) (O'Connell, Birkinshaw, & O'Dwyer, 2008).

En cuanto a lo que se refiere a toxicidad de los metales pesados podríamos decir que depende de su movilidad en el medio que se encuentren, y a su vez dependen de la especiación química, tendencia de acumulación o bioacumulacion y persistencia (Domenech & Peral, 2008) y (Kumar, y otros, 2012).

En la siguiente tabla ( *Tabla 6* ) se describen los síntomas de la intoxicación típicos, la dosis letal en la dieta humana y los niveles de contaminación máximos (NCM) expuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) (Spiro & Stigliani., 2006) (Nguyen, y otros, 2013).



Tabla 6: *Sintomas de Intoxicacion y niveles de contaminacion maximos*

METAL PESADO	TOXICIDAD	DOSIS LETAL EN DIETA HUMANA mg/día	NCM (mg/l) USEPA
As	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular	50-340	0,05
Cd	Daño renal, trastorno renal y efectos cancerígenos	1,5k-9k	0,01
Cr	Dolor de cabeza, diarreas, náuseas, vomito, cancerígeno	3k-8k	0,05
Cu	Daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio	175-250	0,25
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, cancerígeno humano	---	0,2
Zn	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de la sed	6k	0,8
Pb	Teratogenicidad cerebral, enfermedades	10k	0,0006

renales, vasculares y  
neuronales

Hg	Artritis reumatoidea y enfermedades renales, vasculares y neuronales	150-300	0,00003
----	---	---------	---------

---

k= miles de mililitros/día

Fuente 21: Cavides Rubio, Muñoz Calderon, Perdomo Gualtero, Rodriguez Acosta y Sandoval Rojas (2015)

A continuación ( *Tabla 7* ), se describen los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y de las aguas residuales según la Resolución 0631 de 2015 expuesta por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Tabla 7: Valores maximos permisibles. Colombia

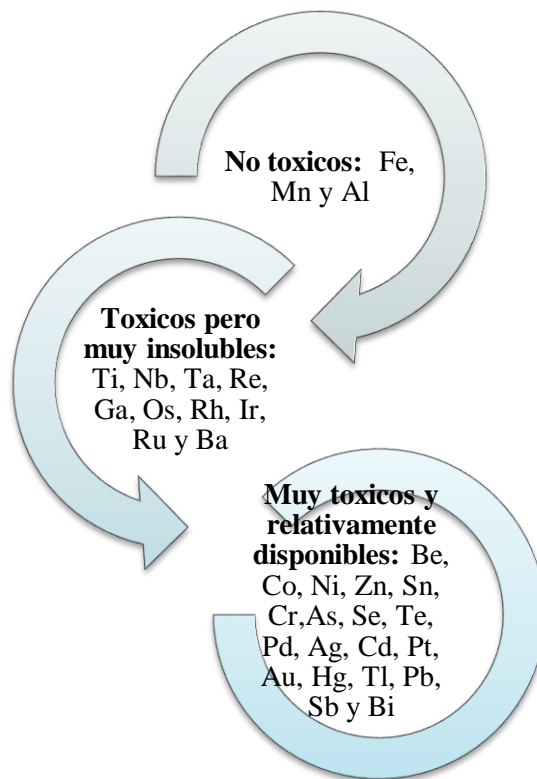
PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES. CON UNA CARGA MENOR O IGUAL 625 Kg/dia DBO5
Metales y Metaloides			
Aluminio (Al)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/l	0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/l	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/l	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/l	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/l	0,02	0,02
Niquel (Ni)	mg/l	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/l		Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/l	0,50	0,50

Fuente 22: Resolucion 0631 2015

## 6.2.Toxicidad de metales pesados

Algunas evidencias experimentales han llegado a demostrar el grado de importancia biológica de los iones metálicos pesados con respecto a los sistemas vivos, algunos son oligoelementos, sigue el mismo patrón que tiene su disponibilidad en la naturaleza. Además, existe una aparente correlación entre la abundancia de los elementos en la corteza terrestre y las necesidades alimentarias de las células microbianas. Estos metales, en cantidades mínimas o traza, pueden ejercer efectos positivos o negativos sobre los seres vivos (Yepez Guerrero., 2011).

El grado de toxicidad ( *Esquema 4* ) potencial de los metales pesados depende de una serie de factores. En primer lugar, dependen de la naturaleza del metal y también de su disponibilidad en el ambiente.



Fuente 23: García Barrera (2016)

Esquema 4: Clasificación de los metales

## 7. Tecnologías para la remoción de metales pesados en aguas residuales

Hoy día la clasificación de las metodologías empleadas para el tratamiento de metales pesados en las aguas residuales tienen a depender de diversos factores, aquí se mencionaran las tecnologías más habituales que son empleadas para la remoción de dichos contaminantes y las no convencionales, aquellas que presentan procesos innovadores para la eliminación de metales en aguas residuales por lo general de origen industrial (Rubio, Calderon, Gualtero, Acosta, & Sandoval Rojas., 2015).

### 7.1. Técnicas Convencionales

#### 7.1.1. Filtración por membrana

Su versatilidad es de las ventajas más atractivas que tiene la tecnología de membranas, y debido a esto se ha empleado en diferentes tipos de mezclas, bien sea para concentrarlas o para diluirlas. Entre las aplicaciones más comunes encontramos la industria de alimentos, de papel, petroquímica, nuclear, de papel, separación o purificación de gases. En las aplicaciones más prometedoras de esta tecnología está la recuperación de productos químicos de aguas residuales, como es el caso de los colorantes costosos o la recuperación de gases de desecho industrial (Awwa., 1998).

La asociación americana de Abastecimiento Awwa (1998) señala que una membrana se puede definir como una película delgada que separa dos fases y que logra ser una barrera selectiva al transporte de materia.

La filtración por membrana es una tecnología que presenta altas eficiencias, requiere de muy poco espacio, es de fácil operación y no es selectiva, es una tecnología que genera gran cantidad de lodos conteniendo metales. Es empleada en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Se pueden clasificar dependiendo sus diferentes características como peso molecular, material

de la membrana, permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Taylor & Wiesner., 2002).

Nemerow y Dasgupta (1998) junto a Ji (2015) señalan que la separación por membrana es empleada comúnmente para recuperar y tratar sales metálicas procedentes de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción de bebidas y alimentos y en la explotación y producción de hidrocarburos.

En las técnicas de filtración por membrana podemos resaltar diversas tecnologías como lo son la electrodiálisis, osmosis inversa, nanofiltración y ultrafiltración (Rubio, Calderon, Gualtero, Acosta, & Sandoval Rojas., 2015).

#### 7.1.2. Intercambio Iónico

En este proceso los iones en solución son transferidos a una matriz sólida que en su momento libera iones de diferentes tipos pero con igual carga. Esta tecnología de intercambio iónico genera la separación física de los iones intercambiados y que no son modificados químicamente. Sus principales ventajas radican en la recuperación del metal, la selectividad, menor volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Zewail & Yousef., 2015).

#### 7.1.3. Adsorción

La bioadsorción es una alternativa que resalta en la remoción de iones de metales pesados en los efluentes industriales, debido a que es una tecnología que permite no solo removerlos, también darle un tratamiento a los desechos agrícola que antes no tenían utilidad, son materiales biosorbentes de bajo costo y fácil adquisición (Fiorentin, y otros, 2010) (Mao, Won, Vijayaraghavan, & Yun., 2009).

Esta tecnología presenta una remoción amplia de variedad de contaminantes, su capacidad es alta, de cinética rápida y generalmente selectiva dependiendo del adsorbente razón por la

cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo (Liu & Lee., 2014).

Cabe mencionar algunos de los adsorbentes como los son las arcillas, carbones activos, zeolitas, biopolímeros, perlas de sílice y plantas o desecho lignocelulosicos; por lo general con procesos variados de modificación química (Wan Ngah, Teong, & Hanafiah., 2011), los cuales son empleados comúnmente para la remoción de colorantes orgánicos e inorgánicos generados por diversos tipos de industrias (Boamah, y otros, 2015).

#### 7.1.4. Precipitación química

Es implementada generalmente para la remoción de metales pesados de efluentes inorgánicos. Seguidamente después de ajustar el pH a condiciones básicas (pH 11), aquellos iones metálicos disueltos son convertidos a una fase sólida insoluble por medio de una reacción química junto con un agente precipitante como lo es la cal. En las desventajas de la precipitación química se incluye el incremento en el contenido de sólidos disueltos del agua residual a tratar; otra desventaja se considera el gran volumen de lodo a tratar puesto que puede contener compuestos tóxicos que dificulten su tratamiento y evacuación (Kurniawan., 2006) (Fu & Wang., 2011).

Es una tecnología muy utilizada en los procesos industriales debido a que es relativamente fácil de operar, económica y selectiva; su mantenimiento es costoso debido a la alta generación de lodos (Rubio, Calderon, Gualtero, Acosta, & Sandoval Rojas., 2015). Sin embargo se emplea también la precipitación por sulfuros aunque presente solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, de tal manera que se puede lograr altos rendimientos; también se ha empleado sustancias quelantes aunque sus desventajas sean considerables como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Chen, Luo, Hills, Xue, & Tyrer., 2009).

## 7.2. Técnicas no convencionales

### 7.2.1. Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes

La adsorción es conocida como un proceso de transferencia de masa por medio del cual una sustancia se transporta desde la fase líquida a la superficie de un sólido. Este proceso de adsorción señala en realidad un grupo de procesos que incluyen la adsorción y la reacción de precipitación. Actualmente la adsorción es una de las tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales cargadas con metales pesados (Wan Ngah, Teong, & Hanafiah., 2011).

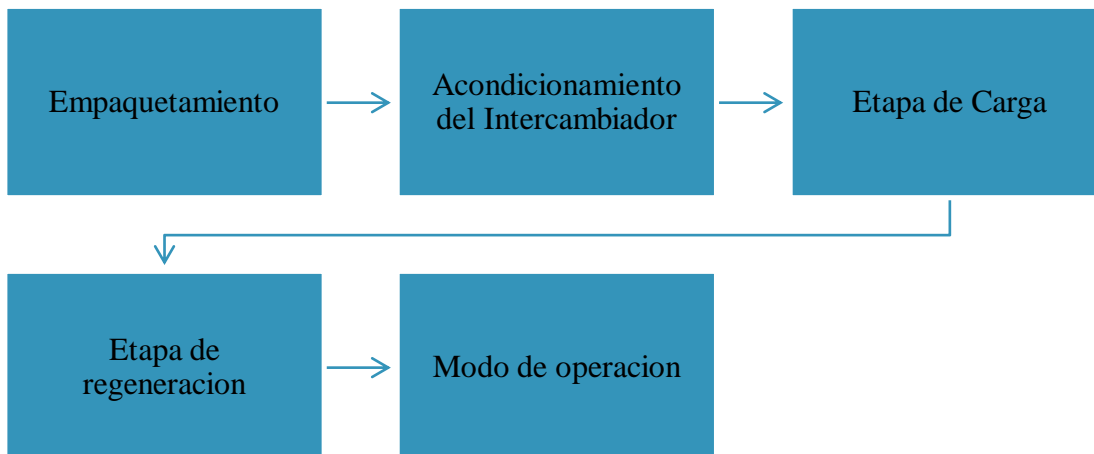
Se ha generado un amplio espectro de los materiales biológicos, de manera especial las algas, levaduras, hongos y bacterias han sido importantes y han tenido una atención relevante para la eliminación y recuperación de metales pesados, a causa de su excelente rendimiento, bajo costo y grandes cantidades disponibles (Wang & Chen., 2009) (Anastopoulos & Kyzas., 2015).

Los procesos que implican adsorción están siendo ampliamente utilizados para la eliminación de metales pesados; dentro de las tecnologías adsorbentes de bajo costo encontramos las siguientes: Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales, Fitorremediación, Biopolímeros, Hidrogeles y Ceniza Volante (Rubio, Calderon, Gualtero, Acosta, & Sandoval Rojas., 2015).

## 8. Etapas del proceso (Intercambio Iónico en Columna)

García y Ramona (2011) resaltan que el sistema de intercambio iónico por medio de columnas ( *Esquema 5* ) es empleado comúnmente en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador es colocado en el interior de una columna de forma vertical de modo que la disolución a tratar fluya.





Esquema 5: Proceso de intercambio iónico en columna  
Fuente 24: Garcia & Ramona (2011)

### 8.1. Empaquetamiento

La resina de intercambio iónico es introducida en la parte interior de la columna de manera que se logre evitar la formación de bolsas de aire entre las partículas para así obtener un lecho uniforme. Dicha operación se hace habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada la cual es útil para eliminar impurezas y provocar el fenómeno de hinchamiento (FECYT, 2001).

### 8.2. Acondicionamiento del Intercambiador

Gran parte de las resinas comerciales son vendidas en forma iónica que tal vez puede no ser la adecuada en algunos tratamientos. Para citar un ejemplo, se tiene una resina básica fuerte que posee un contra ion de grupo  $\text{OH}^-$  y que por el proceso se desea un ion  $\text{Cl}^-$ . En el proceso de acondicionamiento se lleva a cambio el contra ion de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener (Garcia & Ramona., 2011). Por otra parte Grágeda (2006) recalca que al ser conseguido este objetivo y la resina se encuentra en forma iónica se debe eliminar el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada.

### 8.3.Etapa de carga

El intercambio de iones entre la disolución y la resina logra tener lugar en esta etapa. Para este apartado García y Ramona (2011) mencionan que la disolución que se va a tratar es introducida en la columna fluyendo gradualmente por la resina. En su operación condiciones como el pH de la disolución, la velocidad de flujo entre otros dependerán exclusivamente del tipo de resina que es empleada y es bastante importante optimizarlas para que su rendimiento sea el óptimo en cuanto a capacidad y selectividad.

En el momento en que la resina comienza a presentar gran saturación con los iones de la disolución que entra se logra observar un aumento de la concentración de iones en la disolución que se encuentra saliendo de la columna. La descarga de iones es conocida como punto de ruptura o breakthrough esto indica que el tratamiento de la disolución ya no es efectivo; de esta manera Grágeda (2006) también menciona que la concentración de los iones en la disolución de salida es igual a la concentración de entrada, concluyendo que la resina ha agotado su mayor capacidad de intercambio en las condiciones de operación.

### 8.4.Etapa de Regeneración

La regeneración es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y su principal finalidad es devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio. Este procesos se realiza pasando soluciones que contengan el ion móvil original, este es depositado en la resina y se desalojan los iones captados durante el agotamiento (Jose Pulga Bullon., 2011). En el momento de la regeneración de las resinas de intercambio iónico se emplea:

- NaCl (Cloruro de Sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes
- HCl (Ácido Clorhídrico) o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Ácido Sulfúrico) dependiendo el costo y la eficiencia; para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles

- NaOH(Hidróxido de Sodio) o NH<sub>3</sub> ( Hidróxido de Amonio); para regenerar resinas anionicas de bases fuertes y resinas anionicas de bases débiles.

Al estar la resina ya regenerada esta lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico (Jose Pulga Bullon., 2011).

De igual manera la etapa de regeneración consiste en devolver la resina saturada a su forma iónica inicial usando una disolución concentrada en el ion originalmente asociado a la resina. FECYT (2001) resalta esta etapa en el proceso de intercambio iónico debido al buen funcionamiento de la resina en constantes procesos de carga que depende de una regeneración eficiente. Para alcanzar el máximo rendimiento es importante optimizar parámetros como volumen de disolución regenerante, concentración y velocidad de flujo.

Es así como Garcia y Ramona (2011) indican que en la regeneración se presentan dos inconvenientes importantes como lo son :

- Gasto económico en regenerante. Se puede llegar a reducir utilizándose hasta que pierda su eficiencia; de igual forma se debe tener en cuenta que esta opción no es del todo económica e implica establecer unas condiciones para su almacenamiento.
- Regeneración de residuos. Esto debido a que después de regenerar el intercambiador se adquieren disoluciones altamente ácidas o básicas por lo general muy concentradas en metales que han de ser tratados o eliminados.

#### 8.5. Modo de Operación ( *Figura 13* )



Las disoluciones de carga y de regeneracion se introducen siempre por la parte superior de la columna

El regenerante se introduce en direccion opuesta a la disolucion de carga. es decir por la parte inferior de la columna, Proceso en contracorriente.

Fuente 25: Garcia & Ramona (2011)  
 Figura 13: Modos de Operación

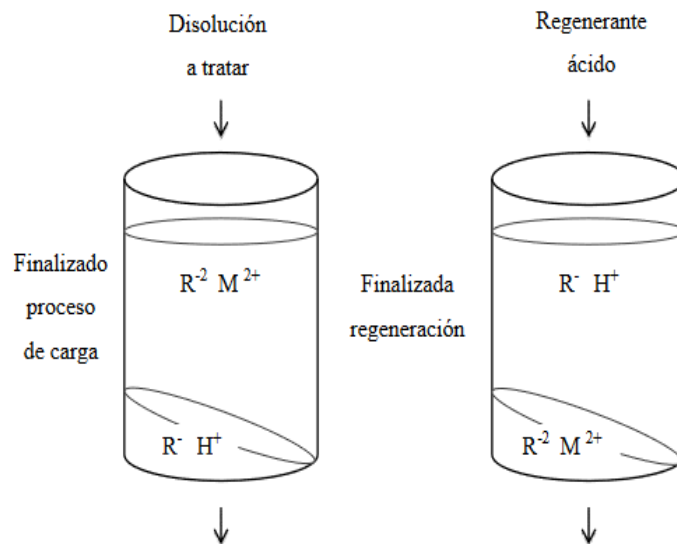
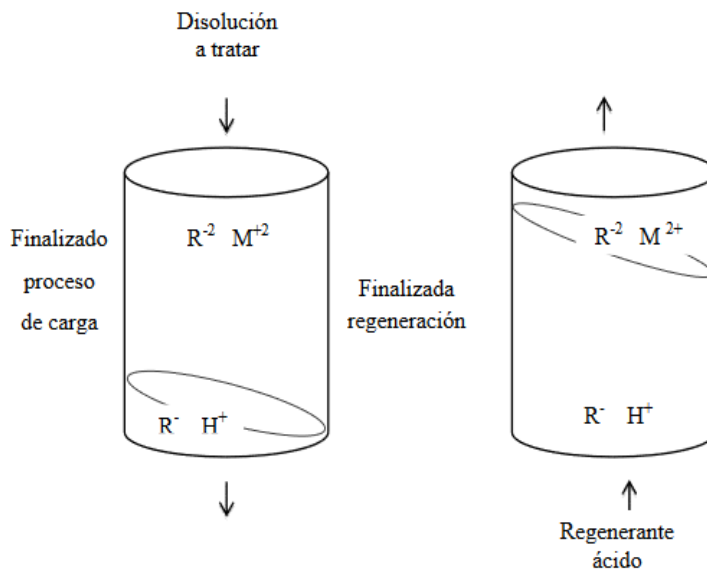


Figura 14: Proceso de intercambio ionico en columna: cara y regeneracion por la parte superior de la columna

Fuente 26: FECYT (2001) y Garcia & Ramona (2011)



Fuente 27: FECYT (2001) y Garcia & Ramona ( 2011 )

Figura 15: Proceso de intercambio ionico en columna: regeneracion por la parte inferior de la columna

El proceso mas habitual es el primero ( *Figura 14* ) debido a que supone un equipamiento más económico que el segundo ( *Figura 15* ); sin embargo Grágeda (2006) y FECYT (2001) discuten que este modo de operación utiliza el regenerante menos eficiente que el proceso en contracorriente. Lo que sucede al pasar el regenerante de abajo hacia arriba es fluidizar el lecho de intercambiador de manera que se aumenta la superficie de contacto. La regeneración logra ser más rápida y necesita menos volumen de regenerante.

## 9. Tratamiento de aguas

### 9.1. Eliminación de la dureza del agua

Los iones más comunes en aguas naturales son calcio y magnesio, esto debido al paso del agua por rocas sedimentarias como lo es la piedra caliza. Los cationes divalentes al

encontrarse a altas concentraciones son quienes le proporcionan la dureza del agua. El uso de agua dura para fines domésticos como industriales generan problemas de formación de depósitos e incrustaciones y complica la acción de los detergentes, formándose espumas y precipitados que reducen su eficiencia. Hidalgo y Guaman (2006) también menciona que las zeolitas son empleadas en la eliminación de la dureza de aguas domésticas e industriales debido a su gran capacidad de intercambio de los iones calcio y magnesio que se encuentran en el agua por iones sodio alojados en su estructura. A causa de esto los minerales han reemplazado a los fosfatos en la composición de los detergentes, más exactamente para mejorar su efectividad al tomar los iones calcio y magnesio del agua. Cerca del 80% de la producción de zeolitas es utilizada en esta aplicación.

En el proceso de eliminación de la dureza en el agua es común también emplear intercambiadores iónicos más versátiles como lo son el carbón sulfonado, resinas sulfonadas de fenol-formaldehído y en la actualidad se utilizan también resinas de poli estireno sulfonado. Hay una pequeña fracción de iones hierro y manganeso que se encuentran presentes en las aguas naturales, la presencia de estos es indeseable debido a que pueden manchar los tejidos, formar depósitos en tuberías, tanques, etc., así como también pueden generar corrosión. Los iones pueden ser eliminados por medio de intercambio iónico, pero el proceso es limitado ya que los iones pueden precipitarse en la superficie de la resina (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

## 9.2. Alcalinidad del agua

Aquella agua que tiene un grado elevado de alcalinidad tiende a tener un sabor amargo. Industrialmente, llega a ser un problema al momento de emplearse agua hirviendo, debido a que el vapor de agua es rico en CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) que al condensarse genera ácido carbónico el cual tiene la capacidad de atacar el metal de las conducciones. Se emplean resinas aniónicas de intercambio para la eliminación de aniones responsables de la alcalinidad del agua, por lo general en forma de cloruro, así se intercambian los iones del agua por el cloruro de la resina. También es posible emplear resinas débilmente ácidas (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

La alcalinidad del agua está provocada por la presencia de diversos aniones como hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como magnesio, sodio, calcio, potasio o amoníaco. Los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La propiedad de la alcalinidad es ayudar a regular aquellos cambios de pH, que han sido producidos por adición de ácidos. El agua residual por lo general es alcalina, esta propiedad la adquiere de las aguas de tratamiento, aguas subterráneas y de materiales añadidos en los usos domésticos. Su concentración en un agua residual es importante en casos donde se empleen tratamientos químicos, en la eliminación biológica de nutrientes, y cuando se deba eliminar el amoníaco mediante arrastre por aire (Aguamarket, 2017).

Hidalgo Domínguez y Guamán Pérez (2006) señalan que un agua alcalina es capaz de aceptar gran cantidad de iones hidrogeno antes de que su pH empiece a decaer. La alcalinidad se expresa en términos de mg/l de  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de Calcio).

### 9.3. Eliminación de Materia Orgánica

En aguas superficiales es usual encontrar ácidos orgánicos, como ácidos húmicos o taninos. la materia orgánica al encontrarse en agua para uso doméstico genera tanto olor, como color y sabor desagradable, de allí el interés en eliminar estos compuestos puesto que tienen a convertirse en trihalometanos cuando se procede a la cloración del agua. De igual forma Hidalgo Domínguez y Guamán Pérez (2006) relacionan que estas sustancias se pueden eliminar empleando resinas anionicas de intercambio en forma de cloruro, en especial las resinas acrílicas.

### 9.4. Eliminación de Nitratos

Este anión se logra eliminar mediante el uso de resinas de intercambio anionico en forma de cloruro. El excesivo uso de fertilizantes, el estiércol y los efluentes que proceden de explotaciones ganaderas son los implicados en la contaminación del agua por el anión nitrato  $\text{NO}_3$  (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

### 9.5. Eliminación del ion amonio

La eliminación de amonio por medio de intercambio iónico, se realiza mediante resinas convencionales como por intercambiadores iónicos inorgánicos. Por su selectividad a este catión las zeolitas son el material que se elige en la fabricación de filtros para eliminar amonio del agua. Aquellas aguas residuales que son vertidas por industrias, redes de alcantarillado y las producidas en procesos agrícolas y ganaderos son las responsables de la presencia del ion amonio en ríos, lagos y a largo plazo en pozos de agua potable (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

### 9.6. Desionización del agua

Hidalgo Domínguez y Guamán Pérez (2006) para este proceso mencionan que se emplea una resina catiónica de intercambio para la eliminación de cationes como sodio, magnesio, calcio, entre otros; y dos resinas aniónicas, una básica fuerte que se encarga de intercambiar los aniones cloruro, sulfato, bicarbonato, etc y una básica débil que absorberá los ácidos fuertes.

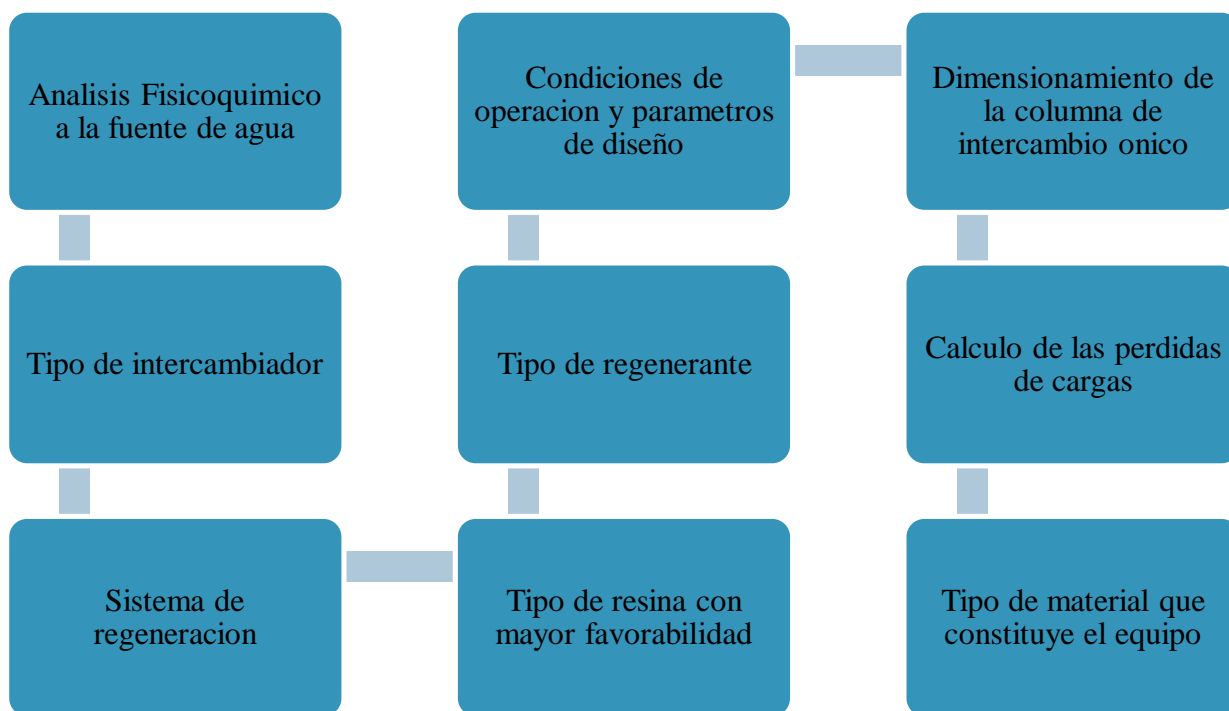
El agua desionizada es esencial en laboratorios, aplicaciones médicas, industria farmacéutica, cosméticos, microelectrónica, etc. El proceso consiste en reducir la concentración de iones presentes en ella a bajos niveles, proceso que se puede llevar a cabo mediante intercambio iónico (Dominguez & Guaman Perez., 2006).

## 10. Pasos para el diseño de un equipo de intercambio iónico

Los sistemas de intercambio de iones son diseñados para un agua determinada, lo que quiere decir que su diseño depende de las características fisicoquímicas que posea el agua. A continuación ( *Esquema 6* ) se describe de manera general los pasos que se llevan a cabo para diseñar un sistema de intercambio iónico (Agamez Salvador., 2014).



- La primera etapa consiste en realizar un correcto y adecuado análisis fisicoquímicos a la fuente de agua
- Seleccionar el tipo de intercambiador; aquí se elige la configuración mas apropiada para el fin requerido
- Sistema de regeneración; se selecciona entre las dos posibles alternativas (Modo de operación)
- Tipo de resina y selección de las capas; se clasifica la resina de acuerdo con las necesidades, teniendo en cuenta las características de cada una y los análisis fisicoquímicos del agua
- Selección del regenerante; se escoge dependiendo el tipo de resina que ha sido seleccionada
- Determinar los parámetros de diseño, dimensionar la columna iónica y seguidamente calcular las pérdidas de cargas; seguido a esto se selecciona el tipo de material que constituye el equipo.



Fuente 28: Agamez Salvador (2014)  
Esquema 6: Diseño de un equipo de intercambio iónico

## 11. Revisión de evaluaciones de resinas de intercambio iónico a nivel de laboratorio

A continuación, se mostrarán diferentes estudios en los cuales se ha implementado las resinas de intercambio como una alternativa para la eliminación de diversos metales presentes en aguas.

### 11.1. Eliminación de arsénico en agua utilizando resinas de intercambio iónico modificadas con hierro

Los autores Gutiérrez y Lucca (2017) en su documento mencionan que el arsénico es abundante en la corteza terrestre y es un contaminante del agua del cual su origen puede ser natural o antropogénico. En la localidad en la cual se llevó a cabo este estudio el tratamiento

de agua es realizado mediante osmosis en una planta, de la cual se abastece la comunidad. Su principal objetivo fue estudiar la adsorción de arsénico sobre las resinas de intercambio modificadas a partir de nanopartículas de hierro.

La metodología aplicada fue la siguiente; se prepararon varias muestras de hierro soportado sobre resinas comerciales de intercambio aniónico: Diaion® WA30 y Amberlite PWA5. A las muestras utilizadas para ambas resinas se denominaron: R1a, R1c y R4 para las muestras con WA30 y R2a, R2c y R3 para PWA5.

MUESTRA R1a: Fue tratada con NaOH (Hidróxido de sodio) a una concentración del 25% durante 2 horas, seguidamente se lavó con agua destilada al punto de obtener un sobrenadante limpio y con pH neutro. Ejecutando el mismo procedimiento mencionado en forma sucesiva, se logró una resina con un 30% de Fe (Hierro) que se llamo R1c.

MUESTRA R3: El tratamiento se realiza con NaOH (Hidróxido de sodio) a una concentración del 25% por 2 horas y después se lava con agua destilada.

MUESTRA R4: Su tratamiento se realiza con una solución hidracina (Líquido incoloro y oleoso, con un olor similar al del amoníaco y que libera vapores cuando está expuesto al aire ) mas NaOH al 20% ; teniendo una relación 1:1 en volumen.

MUESTRA R2: La preparación de esta muestra se llevó a cabo mediante el intercambio de la resina en primer lugar con un agente oxidante (KMnO<sub>4</sub> Permanganato de potasio, al 0.2%) seguidamente se reaccionó con FeSO<sub>4</sub> (Sulfato de Hierro) al 5% durante 5 horas con agitación suave. De esta manera se quiso obtener una muestra de 10% de Fe a la que se llamó R2a. La muestra se lavó con agua destilada. Este mismo procedimiento fue implementado de forma sucesiva para obtener en la resina un 30% de Fe, muestra que se denominó R2c.

En la resina WA30 no se logró un intercambio del oxidante, por lo cual el procedimiento anterior no pudo ser aplicado. Estas muestras se caracterizaron por medio de Fluorescencia de rayos X, Microscopía Óptica y Espectroscopia.

En los resultados obtenidos podemos resaltar que, mediante una gráfica expuesta de la concentración de As medida en el agua de salida en función del volumen de agua tratada, calculado como volumen de agua circulada sobre volumen de resina utilizado; se observó que las muestras logran mayor rendimiento que la resina base (WA30 y PWA5), esto demuestra que al estar presentes partículas de hierro se mejora la capacidad de adsorción de la resina. También se observó que las preparaciones con impregnaciones de hierro en la resina PWA5 son más eficientes que las preparadas a partir de WA30. También se resalta que no solo hay un efecto del contenido de hierro, sino que también del tratamiento que recibieron las resinas en su preparación, debido a que R4 tenía menor cantidad de hierro y evidenció mayor capacidad de adsorción. Lo cual indico en este estudio que la preparación con hidracina será la mejor opción. Entre las muestras preparadas a partir de PWA5, R2 es la más indicada para la fijación de hierro y adsorción de arsénico, concluyendo que el mejor tratamiento es el de  $\text{KMnO}_4$  y  $\text{FeSO}_4$ . De esta manera se concluye que a mayor cantidad de hierro impregnado en la resina mayor arsénico adsorbido (Gutierrez & Lucca., 2017).

Finalmente los autores Gutiérrez y Lucca (2017) concluyen que este estudio a pesar de encontrarse en una etapa preliminar demuestra que con los diversos métodos de preparación empleados, el hierro se fija en las resinas sin alterarlas. De igual forma las muestras preparadas con hierro presentan mayor adsorción de arsénico que las resinas puras, siendo las obtenidas sobre PWA5 las que presentaron mejores resultados.

#### 11.2. Eliminación de amoniaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas

En este estudio los autores Flores, Ramírez y Duran (S.F.) evalúan el proceso de intercambio iónico para eliminar el nitrógeno amoniacal que se encuentra presente en efluentes de aguas residuales tratadas para clarificación y adsorción. En este trabajo se realizaron pruebas de laboratorio en el cual se emplearon mini-columnas; los dispositivos se empacaron con 20g de dos tipos de resina para eliminar el nitrógeno amoniacal una de tipo natural o zeolita y una de tipo comercial (Amberlite IR-120, ROHM HAAS).

La metodología estudiada presento que el agua cruda colectada tenía una cantidad elevada de nitrógeno amoniacal, entre 50 y 55 mg/L, por lo que para disminuir la concentración se utilizó la desorción. En el proceso se ajustó el pH del agua residual clarificada a un valor superior a 10 (en este valor el nitrógeno esta en forma  $\text{NH}_3$ ). El agua fue alimentada de manera ascendente, a contracorriente respecto del aire en la torre empacada de desorción. Al ejecutarse la desorción, la concentración de amoniaco disminuyo a un valor entre 20 y 25 mg/L.

**PROCEDIMIENTO ZEOLITA:** Fue acondicionada con cloruro de sodio para transformarla a su forma homoionica de sodio; esto se realiza con el fin de incrementar la capacidad de intercambio iónico (Vaca, y otros, 2000). Inicialmente se lavaron alrededor de 20 g de Zeolita y se calentó con 200 ml de una solución 1 M de NaCl a  $120^\circ$  y 2 atm por 2 horas. Fueron llevadas a un periodo de enfriamiento, se filtraron las muestras y se lavaron tres veces con agua desionizada. Por ultimo tuvieron un proceso de secado final, y se colocaron en frascos herméticos para su uso posterior.

Las pruebas de intercambio iónico se realizaron alimentando de forma paralela la columna de resina y la de zeolita para garantizar una misma calidad de influente. Se tomaron muestras del efluente en intervalos de una hora de tiempo para determinar el contenido de nitrógeno amoniacal mediante un método analítico.

En cuanto a resultados los aspectos que más resaltan es la eficiencia de remoción que presenta la resina comercial respecto a la zeolita natural; la diferencia entre ambas es de 10-50%. Esto debido a que la resina comercial presenta un tamaño de partícula 6 veces más pequeño, lo que quiere decir, un área específica mayor que la zeolita. Por otro lado, la eficiencia de remoción de amoniaco aumenta de manera proporcional en función del tiempo de contacto en ambas resinas utilizadas.

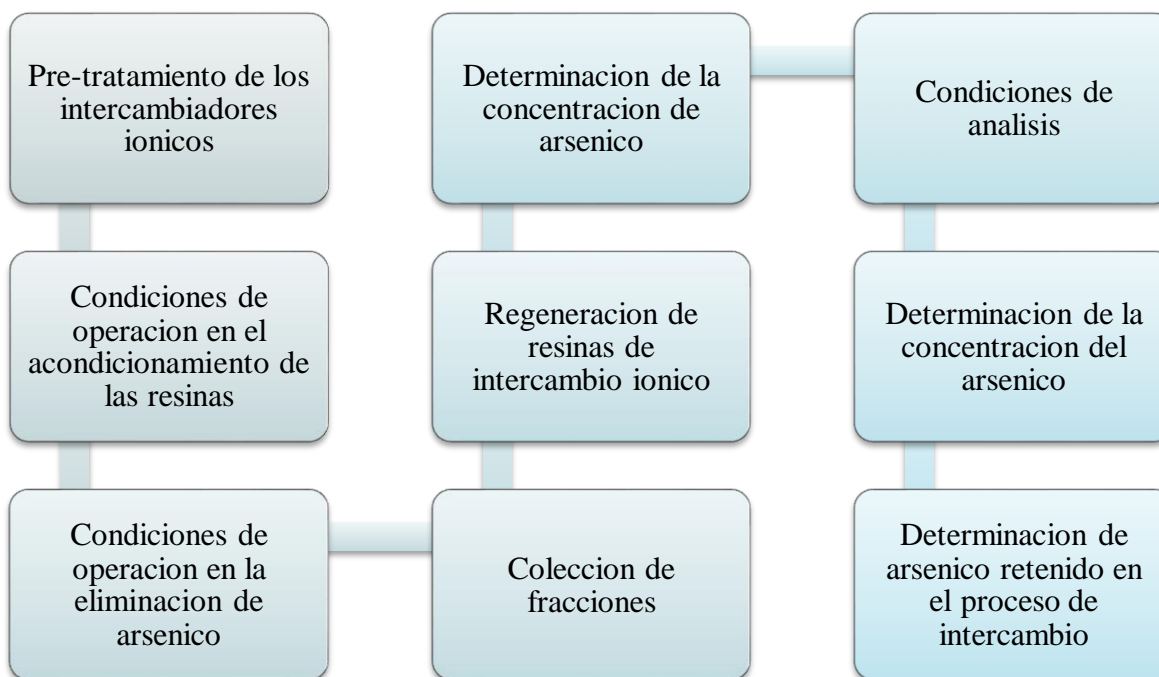
Finalmente se llega a la conclusión que la resina que presento mayor eficiencia en la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas residuales fue la resina comercial IR 120

con respecto a las zeolitas naturales. La saturación en la resina comercial fue gradual y constante, este comportamiento ayuda a predecir su saturación con respecto a la zeolita natural, esto permite predecir de manera más exacta el momento justo donde se hace necesario regenerar la resina para mantener una concentración residual dada de amoníaco en el efluente (Flores, Ramirez, & Duran., S.F.).

### 11.3. Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapan, Estado de Hidalgo, México

En este estudio Pérez-Moreno, Prieto-García, Rojas-Hernández, Marmolejo-Santillán, Salinas-Rodríguez y Patiño-Cardona (2006) investigaron resinas de intercambio iónico con respecto a su capacidad para la eliminación de arsénico contenido en agua. Se utilizaron dos resinas anionicas fuertes; una de tipo reticular (IRA-900) y el otro tipo gel (IRA-400) así como una tercera anionica débil de tipo macro reticular (IRA-96).

La metodología empleada fue la siguiente ( *Esquema 7* ):



Fuente 29: Pérez-Moreno , Prieto-Garcia, Rojas-Hernandez y otros (2006)

Esquema 7: Metodología empleada en el estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapan, Estado de Hidalgo, México

En los resultados que se muestran en este estudio se resalta la variación de eficiencia. Sin embargo, la resina macro reticular anionica fuerte IRA-900 mostro la eficiencia más alta durante el tratamiento. Con 25 ml de resina se lograron tratar cerca de 17.5 l de agua, logrando disminuir la concentración promedio de arsénico en agua de  $480 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  hasta  $24 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ . Por otra parte, la resina anionica fuerte de tipo gel IRA-400 logro tratar 8.0 l de agua con las mismas condiciones de operación, presentando aproximadamente el 50% de eficiencia respecto a la resina IRA-900.

La resina marco reticular anionica débil IRA-96 trato alrededor de 1,3 l de agua; esta capacidad es la más baja de las tres resinas utilizadas para este estudio. La eliminación de arsénico fue repetido en las resinas IRA-900 e IRA-400 después de ser regeneradas se obtuvieron resultados similares confirmando las capacidades de estas para la eliminación de arsénico en agua potable.

Finalmente, los autores concluyen que las resinas anionicas que se estudiaron la que presento mayor capacidad de retención de arsénico fue la IRA-900; a pesar de que la capacidad real de eliminación de arsénico de esta resina es menor a lo descrito en la literatura se puede utilizar para realizar estudios a nivel de planta piloto y aplicarla directamente a una planta purificadora para la eliminación de arsénico (Pérez-Moreno, y otros, 2006).

11.4. La eliminación de metales tóxicos de los efluentes líquidos mediante resinas de intercambio iónico. Parte VII: Manganeso (VII) / H + / Amberlite 958

Durante el desarrollo de este estudio el autor Alguacil (2018) menciona que se ha utilizado resina de intercambio anionico Amberlite 958 para eliminar manganeso(VII) de aguas con distintos valores de pH. Se han investigado otras variables que pueden afectar el proceso de carga del metal en la resina como lo son: velocidad del sistema, temperatura, fuerza ionica del medio y concentración de la resina. El proceso de elución del metal es abordado con

disoluciones de sulfato de hidracina, que además permiten obtener al metal en la disolución de elución como la especie menos toxica Mn(II).

La resina Amberlite 958 presenta características específicas que son descritas respectivamente por el autor (Alguacil., 2018). De igual forma se describen los nano tubos de carbono de paredes múltiples que estuvieron presentes en el desarrollo de este estudio. Los metales en solución fueron analizados mediante espectrofotometría AAS, mientras que la carga de metales en la resina se calculó mediante el balance de masa.

En los resultados es importante mencionar la elución del metal a partir de la resina cargada; debido a que se tuvieron en cuenta diferentes soluciones de elución, en el caso de NaCl 1 M no se presentó eliminación apreciable del metal en la resina después de 1 hora de reacción. Por otra parte la solución de HCl 1 M se evidencia que el rendimiento no es superior al 30% de recuperación de manganeso en la solución incluso después de 2 horas de reacción. En el caso de la solución de sulfato de hidracina el porcentaje de recuperación de manganeso en el eluato es cuantitativa incluso a apenas 15 minutos de contacto. En ciertas condiciones experimentales, pero empleando una solución de sulfato de hidracina  $2.5 \text{ g L}^{-1}$  como eluyente, la recuperación es de 80% a los 7,5 minutos y cuantitativa a los 10 minutos de la reacción.

Finalmente, el autor concluye que fueron varias las condiciones que fueron experimentadas en las que influyen la absorción de manganeso (VII) sobre la resina Amberlite 958. Con una velocidad de agitación de 1000rpm se alcanzó la carga máxima del metal, lo cual indica que a esta velocidad se alcanza un mínimo en el espesor de la capa acuosa; mientras que un aumento en la temperatura se aumenta la absorción de metal en la resina siento esto un proceso endotérmico. Los resultados experimentales indicaron que los mejores resultados de absorción de manganeso (VII) se obtuvieron con los nanotubos de carbono y la resina Amberlite 958, y la carga de metal respondió a los modelos controlados de difusión de partículas (nanotubos de carbono) o de difusión de películas (Amberlite 959). Los mejores resultados de elución se obtuvieron con soluciones de sulfato de hidracina y el manganeso liberado en el eluyente como la forma menos tóxica de Mn (II) (Alguacil., 2018).



#### 11.5. Remoción de plomo en agua a partir de material nano estructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolita natural

El trabajo se fundamentó en la cinética de la remoción de plomo en agua con un material nano estructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolitas (NTC-ZN) y con zeolita natural (ZN). El material nano estructurado se sintetizó mediante el método de aspersión pirolítica bajo condiciones específicas, se caracterizó por microscopía electrónica de barrido y de transmisión y determinación de área superficial (Cruz, y otros, 2017).

La metodología aplicada en la síntesis del material nanoestructurado consiste en un horno cilíndrico por aspersión pirolítica a una temperatura de 900°C con un flujo de argón como gas acarreador, la fuente de carbono utilizada fue una mezcla de ferroceno/tolueno. El material nanoestructurado se caracterizó por microscopía electrónica de barrido, microscopía de transmisión y la determinación del área superficial por BET (Aguilar-Elguezabal, Alonso, Paraguay-Delgado, Espinosa, & Miki-Yoshida., 2006).

El autor señala que las pruebas de remoción se realizaron mediante una solución de Pb a una concentración de 10 ppm. La solución fue colocada en vasos de precipitados, a cada vaso se le añadió 1 g del material nanoestructurado; el mismo tratamiento se llevó a cabo utilizando 1 g de zeolita natural. Las soluciones fueron sometidas a agitación constante a diferentes tiempos, desde 0 hasta 120 minutos, posterior al tiempo de contacto cada muestra se filtró a través de una micromembrana utilizando vacío (Cruz, y otros, 2017).

Los resultados obtenidos en la cinética de remoción de ambos materiales, híbrido y zeolita natural demuestran que el material híbrido presenta una remoción del 88,95% a los 5 minutos y continúa en aumento con el tiempo. En cambio, la zeolita natural presenta una remoción de aproximadamente 52% con igual tiempo de contacto y aumenta conforme el tiempo. Ambos materiales presentan un porcentaje máximo de 99%; mas sin embargo el tiempo en alcanzar un porcentaje mayor al 90% es seis veces menor con el híbrido que con la zeolita natural.

Finalmente se concluye que el empleo de zeolitas de origen natural como soporte para el crecimiento de los nanotubos de carbono multipared, da como resultado un material nuevo nanoestructurado que mejora las propiedades de los materiales individuales y es una opción viable para su uso en la eliminación del metal plomo en agua (Cruz, y otros, 2017). También se menciona que la cinética de eliminación de Pb evidencia un porcentaje máximo de remoción de 99,96% para NTC-ZN y 99,27% para ZN a los 120 minutos. Sin embargo el híbrido presenta un 94,5% de eliminación solo en 10 minutos a diferencia de ZN que alcanza el mismo porcentaje en 60 minutos lo que muestra una mayor eficiencia del material híbrido en la eliminación de Pb.

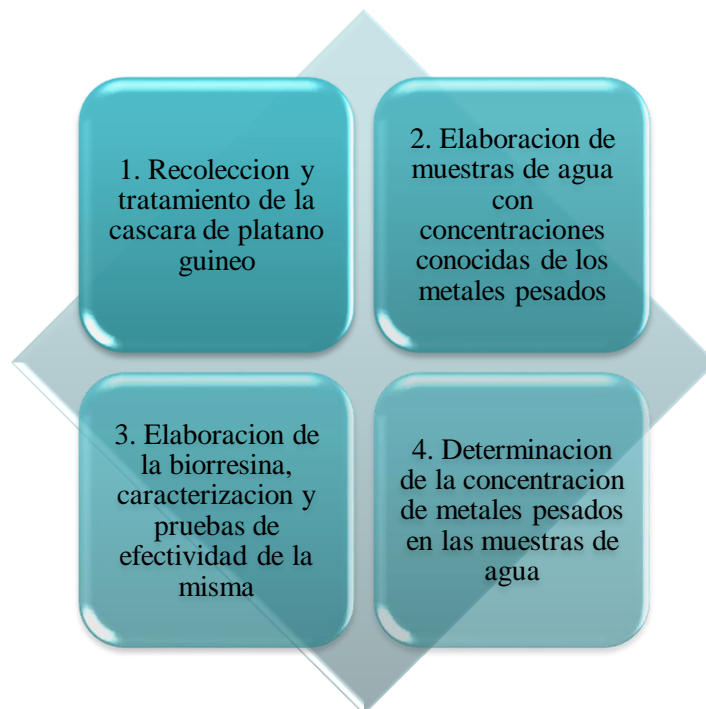
#### 11.6. Elaboración de una biorresina intercambiadora de cationes a partir de cascara de plátano o guineo para eliminar metales pesados en agua contaminada

La autora García Barrera (2016) señala que está comprobado que la cascara de plátano después de ser secada y pulverizada, se comporta como una resina fenólica de carga negativa, característica que logra ser empleada en purificación de aguas contaminadas por metales (aguas residuales de industrias tales como curtiembres, textiles y electrodeposición) debido a que se encuentran como iones positivos y se ven atraídos por la resina de signo contrario. Se considera benéfico ya que la cascara de plátano es un desecho y esto es una forma de aprovecharla para crear una resina 100% biodegradable y por otro lado ayuda a reducir la contaminación en aguas de desecho industrial que contengan metales pesados.

El equipo de estudio deseco y molio las cascaras de banano para luego verter el polvo resultante en frascos de agua que tenían distintas concentraciones previamente conocidas, llegando a la conclusión que se pueden preparar a partir de cascaras. Se determinó también que estas cascaras contiene gran cantidad de iones negativos que atrapan los cationes de metales pesados que pueden ser encontrados en líquidos residuales de muchas empresas; teniendo óptimo rendimiento en soluciones acidas. Debido a que es 100% orgánico y biodegradable, lo cual significa una forma mucho más segura de eliminar estos compuestos

y demás, lo hacen con un nivel de rendimiento mayor a los métodos tradicionales (García Barrera., 2016).

Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta 4 fases ( *Esquema 8* ):



Esquema 8: Fases del laboratorio  
Fuente 30: García Barrera (2016)

La autora García Barrera (2016) en base a los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio para la caracterización de la resina determinó que es insoluble en agua, vencida de petróleo y etanol; y tiene un pH promedio de 5.0 (Ácido) y una densidad seca aparente de 355 g/L lo cual permite tipificarla preliminarmente como una resina de intercambio catiónico débil con un grado de entrecruzamiento bajo. También la investigación obtuvo una reducción mas no eliminación de los cationes  $Fe^{+3}$ ,  $Cr^{+6}$  y  $Ni^{+2}$  en agua contaminada, utilizando la resina elaborada a partir de las cascara de guineo y de plátano como medio filtrante. Se determinó que la temperatura óptima de operación de la Biorresina fue de 30 °C, después de analizar los filtrados de agua contaminada en el espectrofotómetro VIS HACH 2800: obteniéndose los siguientes porcentajes de reducción en la concentración de metales pesados: 93.44%  $Cr^{+6}$ , 59.66 %  $Fe^{+3}$  y 25.13 %  $Ni^{+2}$  (todos los porcentajes presentados son en base a masa); notándose que la especie más sensible al efecto de la Biorresina fue el cromo hexavalente.

#### 11.7. Evaluación de la eficiencia de la resina convencional ( Anionica de base fuerte) en la remoción de nitratos, en las aguas para consumo humano

El autor Anaya Fernández (2014) el estudio se realizó con el fin de determinar si las resinas anionicas de base fuerte (Convencionales) eran eficientes en la remoción de nitratos en las aguas para el consumo humano, para esto se estableció la construcción de una curva de calibración para la respectiva lectura de las muestras a analizar, diseñar y construir la columna de intercambio iónico, determinar la eficiencia de la columna en diversos tiempos de operación, cálculo de la capacidad real de la resina y por ultimo analizar el agua problema y realizar las pruebas para las columnas de intercambio iónico con las resinas anionicas de base fuerte.

La metodología expuestas por el autor (Anaya Fernandez., 2014) se basa en :

1. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA MEDIR LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS: Se llevó a cabo por medio de la metodología que expone la Asociación Americana de Salud Pública (APHA), la Asociacion Americana de Abastecimiento de Agua (AWWA) y la Federación para el control de la Polución de las Aguas (WPCF) (B.O.E., 1987).
2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA COLUMNA: Se tomó en cuenta la descrita por Perry y Green (2001).
  - 2.1.Datos de diseño
  - 2.2.Ecuaciones de diseño
3. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE LA COLUMNA CON RESINA DE INTERCAMBIO IONICO: Fue evaluada teniendo en cuenta el caudal establecido y tomando muestras en la salida de la columna, a diversos tiempos de trabajo, determinando asi la concentración de nitratos y seguidamente la eficiencia (McCabe, Smith, & Harriot., 1994).

4. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD REAL DE LA RESINA Y VOLUMEN DE AGUA DE REGENERACION Y LAVADO
  - 4.1.Determinación de la capacidad real de la resina
  - 4.2.Determinación del volumen de agua de regeneración y lavado.
5. ANALISIS DE LAS AGUAS Y CORRIDAS POR LAS COLUMNAS DE INTERCAMBIO IONICO

Finalmente se determina que las resinas anionicas de base fuerte son bastante eficientes, encontrándose esta como el mejor tratamiento para una concentración de 400 ppm y con un tiempo de 30 minutos se obtuvo una eficiencia del 99,82% en la remoción de nitratos (Anaya Fernandez., 2014).

- 11.8. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial

En este proyecto los autores describen las propiedades de la resina de intercambio ionico junto a las de la zeolita natural. De igual forma mencionan como las aguas industriales con presencia de hierro y dureza llegan a causar problemas de incrustación y corrosión en la maquinaria empleada. El estudio detalla como la zeolita y la resina de intercambio ionico logran remover estos contaminantes (Valencia & Sánchez, 2015).

Este proyecto dividió su metodología en cuatro fases así (Valencia & Sánchez, 2015):

- FASE 1: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LAS UNIDADES PILOTO: En el diseño de las unidades se tomaron como referencia los parámetros de diseño de los intercambiadores de iones con resinas de intercambio iónico.
- FASE 2: PREPARACION DE LAS MUESTRAS DE AGUA: De principio los autores plantearon preparar las muestras con agua des-ionizada pero a causa de la gran cantidad de agua que se requería para la ejecución de las pruebas estas se llevaron a cabo con el acueducto de la ciudad.

- FASE 3: PRUEBAS DE REMOCION DE DUREZA Y HIERRO: Aquí se manejaron dos cargas hidráulicas con el fin de estudiar el comportamiento de los dos prototipos y observar como esta variable influía en la remoción de hierro y dureza.
- FASE 4: LECTURA DE LAS MUESTRAS

Finalmente, en sus resultados se evidencio que ninguna de las dos alternativas removió en su totalidad la concentración de hierro en el agua, ni en velocidades bajas; aun así la resina de intercambio iónico fue la alternativa que removió mas cantidad. De acuerdo a los estudios de las pruebas de laboratorio la capacidad de intercambio cationico de la zeolita antes y después de las pruebas es menor que la de la resina de intercambio cationico; ya que se agota aun 20,78% más con respecto a su valor inicial que la resina de intercambio ionico, la cual se agotó solo un 17,22% respecto de su valor original (Valencia & Sánchez, 2015).

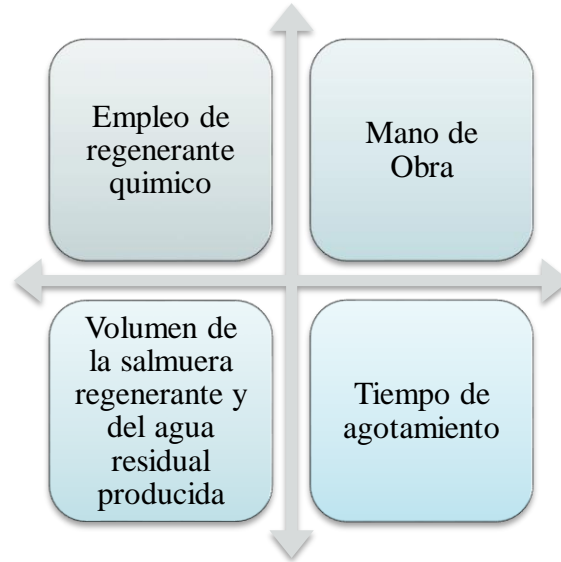
## 12. Análisis Económico

Valenzuela Marín (2004) determina un análisis económico para las resinas de intercambio iónico caracterizándolas así:

- Costos de tratamiento
- Costos de construcción
- Costos y Requerimiento de Operación y Mantenimiento

### 12.1. Costos de Tratamiento

En estos costos se incluye ( *Esquema 9* ):



Fuente 31: Valenzuela Marin (2004)  
 Esquema 9: Factores que determinan el costo de tratamiento

El aumento de estos requerimientos se refleja en el incremento de los costos de operación y mantenimiento.

## 12.2. Costos de construcción

Gumerman y Robert (1986) recalcan que los costos de construcción fueron aplicados para unidades de intercambio iónico con volúmenes entre 0,085 y 14,7 m<sup>3</sup>. En base a los datos proporcionados mediante este estudio; Valenzuela Marin (2004) menciona que se elaboraron graficos, a los cuales se les realizaron respectivos ajustes para llegar a una ecuación en función del volumen de agua tratada de modo que se pudiera estimar un costo aproximado.

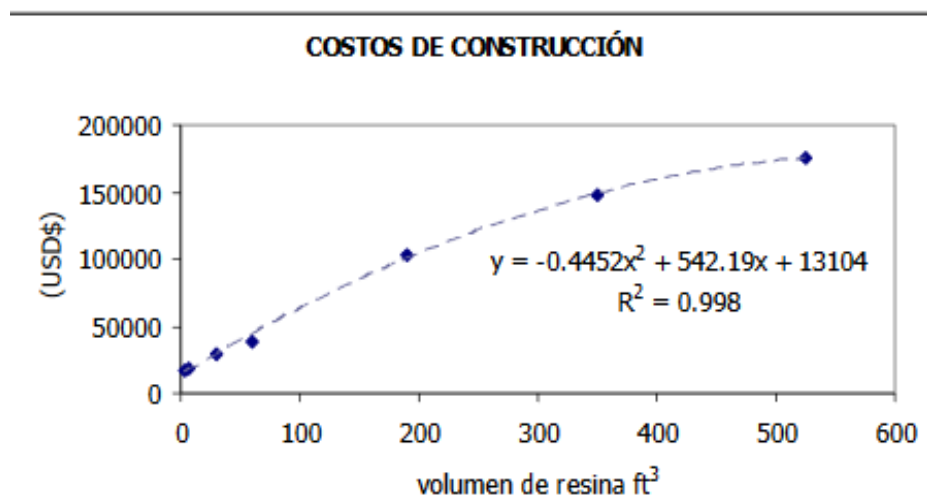
Seguidamente se muestran los datos reportados ( *Tabla 8* ) y las graficas correspondientes:

Tabla 8: Datos de costos de construcción para resinas de intercambio iónico

Volumen Resina m <sup>3</sup>	Volumen Resina ft <sup>3</sup>	Costo Construcción USD \$
0.083289	3	16200
0.166578	6	18800
0.832892	30	28600
1.665785	60	38100
5.274985	190	102900
9.717077	350	148000
14.575616	525	174900

Fuente 32: Valenzuela Marin (2004)

Es importante resaltar que los datos expresados anteriormente corresponden al año 1986, por lo cual se efectuó una conversión a valor futuro (2005).



Fuente 33: Valenzuela Marin (2004)

Figura 16: Costos de construcción vs Volumen para resinas de intercambio ionico



### 12.3. Requerimiento de Operación y Mantenimiento



*Esquema 10: Materiales de mantenimiento requeridos*  
*Fuente 34: Valenzuela Marin (2004)*

Junto a estos materiales ( *Esquema 10* ) también se requiere la mano de obra para la adición de sal a salmuera del tanque; de igual forma, se requiere del operador para efectuar revisiones a las unidades de intercambió de manera constante para garantizar que operen de manera satisfactoria (Gumerman & Robert., 1986).

## CONCLUSIONES

En la remoción de metales, alternativas como las resinas de intercambio iónico no logran remover en su totalidad la concentración de cualquiera de los metales, aun cuando las velocidades logran ser bajas.

Las resinas de intercambio iónico presentan como principal ventaja recuperar la capacidad de intercambio original por medio del tratamiento con una solución regenerante, de igual manera logran ser bastante estables químicamente y su facilidad de regeneración logra ser de gran aporte durante los diferentes procesos en los que pueden ser empleadas. Lo cual resulta una alternativa viable para la remoción de metales, a pesar de ser un poco costoso.

La revisión documental demuestra que el uso de las zeolitas naturales en el tratamiento de afluentes logra remover metales pesados como Pb, Cu, Ni, As, Cd, Hg, Zn. El uso de esta alternativa es producido a bajo costo. Este método se ha empleado en aguas residuales debido a que ofrecen un efecto mayor a la arena o los filtros de carbón, de manera que logra resultar un agua más pura. La zeolita muestra gran aplicación para implementarse en columnas de adsorción en intercambio permitiendo remoción de cationes en aguas residuales.

El empleo de biorresinas de forma natural es una gran alternativa para la remoción de metales pesados, debido al bajo costo de estas y las eficiencias que se han visto en diferentes estudios. Es recomendable estudiar más a fondo las biorresinas naturales, de manera que se muestren resultados más efectivos en cuanto a remoción de metales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abud, Trujillo, & Navarro. (2013). Evaluacion de la toxicidad ocasionada por el exceso de micronutrientes en plantas de arabis thaliana. *Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias*, 14(1), 30-36.
- Agamez Salvador. (2014). *Diseño de un intercambio cationico de lecho fijo para la potabilizacion de agua en el corregimiento de malagana (Bolívar)*. Cartagena de indias .
- Agouborde. (2008). *Remocion de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales*. Temuco, Chile: Universidad de la Frontera. Facultad de Ingenieria, Ciencias y Administracion.
- Aguamarket. (2017). *Alcalinidad de aguas residuales* . Obtenido de Alcalinidad de aguas residuales : <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3769&termino=alcalinidad+de+aguas+residuales>
- Aguilar-Elguezabal, Alonso, Paraguay-Delgado, Espinosa, & Miki-Yoshida. (2006). Study of Carbon Nanotubes Synthesis by Spray Pyrolysis and Model of Growth. *Diamond & Related Materials*, 15(9), 1329-1335.
- Akar, Tosun, Kaynak, Kavas, & Incirkus. (2009). Assessment of the biosorption characteristics of a macro-fungus for the decolorization of Acid Red 44(AR44) dye. *J. Hazard.Mater*, 865-71.
- ALARCÓN, D., & URREGO, M. (2016). *EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE REUTILIZACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO EN EL PROCESO DE MEZCLA ASFÁLTICA Y MORTERO DE CEMENTO HIDRÁULICO*. Bogotá .
- Alguacil. (2018). The removal of toxic metals from liquid effluents by ion exchange resins. Part VII: Manganese(VII)/H+/Amberlite 958. *Revista de Metalurgia*.
- Anastopoulos, & Kyzas. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular liquids*, 209, 77-86.

- Anaya Fernandez. (2014). *Evaluacion de la eficiencia de la resina convencional ( Anionica de base fuerte ) en la remocion de nitratos, en las aguas para consumo humano*. Tingo Maria-Peru.
- Avila J. (21 de Octubre de 1999). *Lo Esencial Acerca del Intercambio Iónico*. Obtenido de Lo Esencial Acerca del Intercambio Iónico: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/PDF/5-6-02avilla.pdf>
- Awwa., (. A. (1998). Tratamiento del agua para procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones. *McGraw-Hill*, 864.
- B.O.E. (1987). *Metodos oficiales de analisis fisico-quimicos para aguas potables de consumo publico.Codigo alimentario Español*. Madrid- España.
- Bahadir, Numa, Ozdes, Bektas, & Soylak. (2014). Separation and preconcentration od lead, chromium and copper by using with the combination coprecipitation-flame atomic absorpction spectrometric determination. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1030-1034.
- Baird. (2001). *Quimica Ambiental. Editorial Reverte. University of Western Ontario*, 622.
- Barreiro, C., & Ariosa Roche. (1998). *Diccionario de terminos ambientales. Centro Feliz Varela. La Habana*, 45.
- Boamah, O., Huang, Hua, Zhang, Wu, Onumah, . . . Osei Boamah. (2015). Sorption of heavy metal ions onto carboxyl ate chitosan derivatives. *A mini-review, Ecotoxicology and Environmental safety*, 16, 113-120.
- Brown, & Salle. (1997). *Quimica Cuantitava*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Brown, LeMay, & Bursten. (1998). "Química la ciencia central" (Séptima Edición). *Editorial Prentice Hill hispanoamericana S. A. Impreso en México*.
- Campos Hernando. (1987). Los metales pesados, su contaminacion y efectos toxicos. *Contaminacion Ambiental*, 63-70.
- Carrillo Aragon. (2007). *Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso* .

- Cartaya, Reynaldo, & Peniche. (2008). Cinética de adsorción de iones cobre(II) por una mezcla de oligogalacturonidos. *Iberoam.Polímeros*, 473-479.
- Chang. (1999). "Química" (Sexta Edición). Editorial McGraw Hill Compañías S. A. Impreso en México.
- Chen, Luo, Hills, Xue, & Tyrer. (2009). Precipitation of Heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Residual*, 43,2605-2614.
- Choi. (2002). *Improve plant water treatment*. . Hydrocarbon Processing (International edition).
- CIDI. (1999). *Intercambio Ionico* . Grupo de Investigadores Ambientales. Reuso de Aguas Industriales .
- Cobos, H., Londoño, A., & Florez Garcia. (2009). Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación generado en las industrias del curtido de cueros. *Dyna*, 107-119.
- Condorchem envitech. Smart ideas for wastewater & air treatment. (5 de Marzo de 2019). *Intercambio Ionico para el tratamiento de efluentes*. Obtenido de Intercambio Ionico para el tratamiento de efluentes: <https://blog.condorchem.com/tag/resinas-de-intercambio-ionico/>
- Correa, Velasquez, & Quintana. (2012). Uncommon Crop Residues as Ni(II) an Cd(II) Biosorbents. *Ind.Eng.Chem.Res.*
- Cruz, Javier, Luis, Gil, Perez, & Gochi-Ponce. (2017). Remoción de plomo en agua a partir de material nanoestructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolita natural. *Avances en Ciencias e Ingeniería* .
- D'angelo Mariano. (17 de Noviembre de 2014). *General Water Company Argentina*. Obtenido de General Water Company Argentina: <https://gwc.com.ar/agua/intercambio-ionico/>

- Daphia. (2002). *Mejora medioambiental del proceso de galvanización*. Puesta en marcha del protocolo Kioto.
- Dardel, F. d. (12 de octubre de 2017). *François de Dardel*. Obtenido de Propiedades de las resinas intercambiadoras de iones : [http://dardel.info/IX/resin\\_properties\\_ES.html](http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html)
- Domenech, & Peral. (2008). *Química ambiental de sistemas terrestres*. *Editorial Reverte*. *Barcelona, España, 239*.
- Domingo. (2008). *Evaluación de los potenciales riesgos para la salud en el entorno de plantas cementarias: metales pesados, dioxinas y furanos*. Barcelona, España: Jornadas sobre desarrollo sostenible.
- Dominguez, H., & Guaman Perez. (2006). *Diseño y Construcción de un desmineralizador de lecho múltiple*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química.
- Duarte, Oliver, & Jaramillo. (2009). *Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosano obtenido de desechos de camarón*. *Sci.Tech*.
- Ernesto Simon. (2 de febrero de 2008). *Madrid Blogs*. Obtenido de Los metales pesados en aguas residuales: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
- Escobar, Salazar, S., & Tora. (2006). Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural water and simulated wastewater. *Journal Environmental Management*, 384-391.
- Eugene Salle. (1977). *química cuántica. Separaciones analíticas*. barcelona: Editorial Reverte.
- Facultad de Ciencias Químicas, U. A. (2009). *Intercambio Iónico*. Recuperado el 30 de Marzo de 2014, .
- FECYT. (2001). Especial Resinas de Intercambio Iónico. *Tecnociencia*.
- Filtración, G. (15 de Noviembre de 2005). *GEA Filtración* . Obtenido de GEA Filtración : <http://www.geafiltration.com>

- Fiorentin, Trigueros, Modenes, Espinoza-Quiñones, Pereira, Barros, & Santos. (2010). Biosorption of reactive blue 5G dye onto drying orange bagasse in batch system: Kinetic and equilibrium modeling. *Chem.Eng.Journal*, 68-77.
- Flores, Ramirez, & Duran. (S.F.). 12.2. Eliminación de amoníaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas. *Facultad de Química UNAM*.
- François de Dardel. (15 de Mayo de 2019). *Aplicaciones del intercambio ionico. Guia general* . Obtenido de Aplicaciones del intercambio ionico. Guia general : [http://dardel.info/IX/applications\\_ES.html](http://dardel.info/IX/applications_ES.html)
- Fu, & Wang. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters. *A review. Journal of Environmental Management*, 407-418.
- Garcia Barrera. (2016). Elaboracion de una biorresina intercambiadora de cationes a partir de cascara de platano guineo para eliminar metales pesados en agua contaminada . *ESCUELA ESPECIALIZADA EN INGENIERÍA ITCA-FEPADE*.
- Garcia, I., & Ramona. (2011). Reduccion de cloruros y dureza mediante intercambio ionico, en agua del pozo N° 1Bis de Navojoa, Sonora . *Universidad de Sonora. Division de Ingenieria* .
- Grágeda. (2006). Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos. 3-49.
- Gumerman, & Robert. (1986). *Small Water System Treatment Costs*. New Jersey.
- Gutierrez, & Lucca. (2017). Eliminacion de arsenico en agua utilizando resinas de intercambio ionico modificadas con hierro. *Instituto de investigaciones en catalisis petroquimica (INCAPE)*.
- Hagarová, Buidos, & Kubová. (2013). Simultaneous preconcentration of cadmium and lead in water samples with silica gel and determination by flame atomic absorption spectrometry. *Journal of Environmental Sciences*, S45-S49.
- Index. (2015). *Intercambio Ionico. Serie: Tratamientos terciarios*.

- Ji. (2015). Membrane technologies for water treatment and reuse in the gas and petrochemical industries. En woodhead publishing series in energy, advances in membrane technologies for whter treatment. *Ed. Basile, A & Cassano, A Woodhear publishing Oxford*, 519-536.
- Jose Pulga Bullon. (2011). *Equipos y Laboratorios de Colombia*. Obtenido de Equipos y Laboratorios de Colombia: [https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos\\_mo.php?it=632](https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=632)
- Kumar, Ramalingam, Sathyaselvabala, Kirupha, Murugesan, & Sivanesan. (2012). Removal of Cd(II) from aqueous solution by agricultura waste cashew nut shell. . *Journal Chemical Engineerin*, 756-768.
- Kurniawan. (2006). Physico-chemical treatmen techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical engineering Journal*, 118,83-98.
- Liu, & Lee. (2014). Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes from wasterwaters. *Bioresource Technology*, 24-31.
- Manahan. (2007). *Introduccion a la quimica ambiental*. Ed. Reveté, S.A.de C.V.
- Manahan, & Stanley. (1991). Environmental Chemistry. *Editorial Lewis Publisher. Boston, USA.*, 32,97-102, 206-08, 512.
- Mao, Won, Vijayaraghavan, & Yun. (2009). Surface modification of corynebacterium glutamicum for enhanced reactive red 4 biosorption. *Bioresour.Technol*, 1463.6.
- Margineda de Godos. (2004). *Estudio de prosecos de adsorcion/desorcion de iones en resinas encapsuladas*. . Universidad autonoma de barcelona.
- Martinez Hernandez Maria Isabel. (2003). *AplicaciónTecnológica de un Residuo de la Industria del Acero en la eliminaciónde metales contaminantes*. Madrid, Madrid. España.
- Martínez, D., & Monteagudo Segovia. (S.F.). *Diseño de Procesos en Ingeniería Ambiental*. Guia de Practicas.



- Matlock, Homerton, & Atwood. (2002). Chemical precipitation of lead battery recycling plant wastewater . *Ind. Eng.Chem*, 41, 1579-1582.
- Matlock, Howerton, & Atwood. (2002). Chemical precipitation of lead from lead battery recycling plant wastewater. *Chemosphere*, 41,1579,1582.
- McCabe, Smith, & Harriot. (1994). *Operaciones unitarias de ingenieria quimica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Metcalf. (2003). Wastewater engineering. Treatment and reuse. *Cuarta edicion. McGraw Hill*, 1180,1182,1131.
- Michaud. (2017). Back from the Brink. *WC&P INTERNATIONAL. Noviembre*.
- N.F. (Nuffield Foundation). (1974). Quimica Intercambio Ionico. En A. Guerra, & R. Tomas. Barcelona-Bogota-Buenos Aires-Caracas-Mexico: Editorial Reverte S.A.
- Nemerow, & Dasgupta. (1998). Tratamiento de vertidos industriales peligrosos. *Ed. Dias de Santos. Madrid*, 822.
- Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth. (2009). *Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal esmeraldas*. Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo.
- Nguyen, Ngo, Guo, Zhang, Liang, Yue, & Li. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*., 574-585.
- Nieves Cifuentes. (S.F). Desmineralizacion. Tratamiento de agua con membrana . 2.
- O'Connell, Birkinshaw, & O'Dwyer. (2008). Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose. *A review.Bioresource Technology*, 99, 6709-6724.
- Pérez, Sierra, & Fajardo. (2006). iencias Experimentales y Tecnología. Preparación de materiales adsorbentes de Hg(II) con fines analíticos y aplicaciones medioambientales. *Madrid. Editorial DIKINSON*,.

- Pérez, Sierra, & Fajardo. (2006). *Ciencias Experimentales y Tecnología. Preparación de materiales adsorbentes de Hg(II) con fines analíticos y aplicaciones medioambientales*. Madrid: Editorial DIKINSON, S.L.
- Pérez-Moreno, Prieto-García, Rojas-Hernández, Marmolejo-Santillán, Salinas-Rodríguez, & Patiño-Cardona. (2006). Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapan, Estado de Hidalgo, México. *Revista de metalurgia*.
- Perry, & Green. (2001). *Manual del ingeniero químico*. Madrid-España: McGraw-Hill.
- Pinzon-Bedoya, & Cardona-Tamayo. (2010). Influencia del pH en la bioadsorción de Cr(III) sobre cascara de naranja. Determinación de las condiciones de operación en proceso discontinuo. *Rev. Facultad de Ciencias Básicas*.
- Purakin, & Paknikar. (1999). Biosorption of Lead, Cadmium and Zinc by Citobacter Strain MCM B-181. *Characterization Studies. Biotechnol.*
- Residuales, Fuente, C., Nutrientes, A. D., Martínez-prado, A., Pérez-lópez, M. E., Pinto-espinoza, J., . . . Nueva. (2011). TERMODEGRADACIÓN DE RESINAS AGOTADAS DE INTERCAMBIO IÓNICO DE LECHO MIXTO. 241–252.
- Ricardo Rodríguez. (2011). *Regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico del agua en la empresa ernerto che guevara*. Instituto superior minero metalúrgico.
- Rigola. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona: MARCOCOMBO S.A.
- Ritchie. (2001). Polycysteine and Other Polyamino Acid Functionalized Microfiltration membranes for heavy metals capture. *Environmental science technology* , 35,3252-3258.
- Rodríguez Romero Juan Francisco. (1995). Eliminación de metales alcalinos de polioles mediante intercambio iónico. En R. R. Francisco, *Eliminación de metales alcalinos de polioles mediante intercambio iónico*. Universidad de Castilla-La Mancha.

- Rubio, C., Calderon, M., Gualtero, P., Acosta, R., & Sandoval Rojas. (2015). Tratamientos para la remocion de metales Pesados Comunmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una revision. *Revista Ingenieria y Region*.
- Ruiz. (2010). Los metales pesados. *MoleQla. Revista de Quimica de la Universidad Pablo Olavide*, 73-90.
- Sala, Garcia, Gonzales, Frascaroli, Bellu, Mangiameli, . . . Salas . (2010). *Biosorcion para la eliminacion de metales pesados en aguas de desecho*. An. la real Soc. Española Quimica .
- Silva, & Barbosa. (2002). *Equilibrios iónicos y sus aplicaciones analíticas, Síntesis*”, .
- Soto, Lozano, Barbarin, & Alcalá. (2004). *Remocion de metales pesados en aguas residuales mediante agentes quimicos* .
- Spiro, & Stigliani. (2006). *Quimica Medioambiental. 2° Edicion. Editorial Pearson Prentice Hall*, 504.
- Taylor, & Wiesner. (2002). Membranas. Capitulo 11. En AWWA. *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de Agua Contaminada. McGraw Hill*, 707-779.
- Universidad autonoma de Madrid. (2006). Intercambio Iónico. *Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de Universidad autonoma de Madrid*.
- Vaca, Mier, Lopez, Callejas, Jimenez, Cisneros, & Alvarez. (2000). Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: Multi-component ionic exchange. *Water Research* , 373-378.
- Valcarcel, & Hens., G. (1994). *Tecnicas analiticas de separacion. Reverte, Barcelona*.
- Valencia, D., & Sánchez, V. (2015). *IEstudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética quesimula el agua para uso industria*. Bogota D.C: Universidad de La Salle.

- Valenzuela Marin. (2004). *Exploracion de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remocion de dureza que logre la optimizacion tecnica y economica del proceso* . Cholula, Puebla, Mexico .
- Víctor-Ortega, M. D., Ochando-Pulido, J. M., Airado-Rodríguez, D., & Martínez-Ferez, A. (2016). Comparison between different ion exchange resins combinations for final treatment of olive mill effluent. *Sep. Purif. Technol*, 374-382.
- Wan Ngah, Teong, & Hanafiah. (2011). Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites. *A review. Carbohydrate Polymers*, 83, 1446-1456.
- Wang, & Chen. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 27, 195-226.
- WHO. (2003). Chromium in drinking-water.
- Yepez Guerrero. (2011). Remocion de detergentes de aguas residuales textiles empleando hongos seleccionados obtenidos a partir de efluentes de industria textil y evaluacion de su tolerancia a metales pesados a nivel de laboratorio. *Escuela politecnica del ejercito. Guayaquil, Ecuador*.
- Zewail, & Yousef. (2015). Kinetic study of heavy metal ion removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. *Alexandria Engineering Journal* , 83-90.