

## CAPÍTULO 3

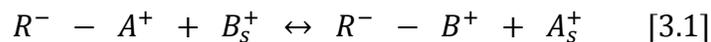
### INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido (Nevárez 2009; Pérez *et al*, 2006). En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga de un fluido (Choi, 2002).

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

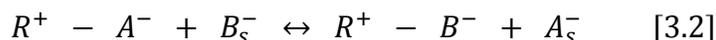
La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión; éste último factor está en función de la dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro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

Cuando el intercambiador iónico generalmente sólido posee en su estructura cargas negativas será capaz de retener e intercambiar iones cargados positivamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio catiónico (Ec. 3.1).



Donde  $R^-$  representa al intercambiador catiónico,  $A^+$  al catión intercambiable del sólido y  $B_s^+$  al catión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al catión como monovalente, pero puede tener cualquier carga (Grágeda y Grágeda, 2006; Manahan, 2007).

Cuando el intercambiador iónico generalmente sólido posee en su estructura cargas positivas será capaz de retener e intercambiar iones cargados negativamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio aniónico (Ec. 3.2).



Donde  $R^+$  representa al intercambiador aniónico,  $A^-$  al anión intercambiable del sólido y  $B_s^-$  al anión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al anión como monovalente, pero puede tener cualquier carga (Grágeda y Grágeda, 2006; Manahan, 2007).

Los primeros productos empleados en la industria como intercambiadores iónicos fueron las zeolitas inorgánicas de origen natural, como los silicatos de aluminio; después se introdujeron los intercambiadores iónicos orgánicos, hechos a partir de productos naturales sulfonados como el carbón, la lignita y la turba; sin embargo, en la actualidad se utilizan resinas sintéticas en su mayoría de poliestireno-divinilbenceno conocidas como resinas de intercambio iónico (Pérez *et al*, 2006).

### **3.1 Resinas de Intercambio Iónico**

Son pequeñas sustancias granuladas o esféricas insolubles en agua, compuestas por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante (Grágeda y Grágeda, 2006). Reaccionan como ácidos, bases o sales, pero tienen la peculiaridad de tener sólo cationes o aniones con la habilidad de tomar parte de la reacción química por su capacidad de migración (Nevárez, 2009).

Como la concentración de grupos polares en la resina es un número finito, éstas tienen una capacidad definida de intercambio. La ventaja de las resinas de intercambio iónico es que tienen habilidad para recuperar la capacidad original mediante el tratamiento con

una solución que puede ser ácido, base o sal (según la resina y el uso) que desplace los iones retenidos por la resina y los remplace por iones deseados. Este procedimiento se llama regeneración y se realiza cuando la resina agota su capacidad, permitiendo de ésta manera utilizar la resina una y otra vez (Nevárez, 2009).

Las resinas sintéticas de intercambio iónico son pequeñas sustancias granuladas e insolubles que consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales; el entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad.

El grado de entrecruzamiento es un factor importante de controlar ya que no sólo determina las propiedades mecánicas de la resina sino también su capacidad de hincharse (*swelling*) y de absorber agua. El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo la estructura. El proceso de hinchamiento favorece la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales (Grágeda y Grágeda, 2006).

Actualmente se realizan investigaciones para el desarrollo de nuevas resinas poliméricas de intercambio iónico ya que en el futuro éstas serán de gran utilidad e importancia en el tratamiento de agua para consumo humano, en aplicaciones industriales y medio ambiente (Pérez *et al*, 2006).

### **3.1.1 Tipos Según su Estructura de Red**

#### **3.1.1.1 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).

### **3.1.1.2 Macroporosas o Macroreticulares**

Son resinas formadas por el polímero de poliestireno y divinilbenceno, como las de tipo gel, pero su apariencia es diferente a las de gel (CIDI, 1999) ya que durante la síntesis de esta resina se utiliza un co-solvente que actúa interponiéndose entre las cadenas poliméricas creando 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 (Grágeda y Grágeda, 2006; FECYT, 2001).

### **3.1.1.3 Isoporosas**

Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red; son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y un costo más bajo que las resinas macroporosas (Grágeda y Grajeda, 2006; FECYT, 2001).

## **3.1.2 Tipos Según su Grupo Funcional**

### **3.1.2.1 Resinas Catiónicas de Ácido Fuerte**

Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico, el grupo funcional es el ácido sulfónico ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) que es altamente ionizable, intercambian iones positivos (cationes). Estas resinas operan a cualquier pH (Nevárez, 2009), requiere de excesivas cantidades de regenerante y es la resina más utilizada (CIDI, 1999).

### **3.1.2.2 Resinas Catiónicas de Ácido Débil**

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.

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, 2009).

### **3.1.2.3 Resinas Aniónicas de Base Fuerte**

Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno clorometilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, ( $R_4N^+$ ). Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (Nevárez, 2009).

### **3.1.2.4 Resinas Aniónicas de Base Débil**

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, 2009).

### **3.1.2.5 Resinas Quelatantes**

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 anteriores y por tener una cinética de absorción más lenta (Grágeda y Grágeda, 2006; FECYT, 2001).

### **3.1.3 Propiedades**

#### **3.1.3.1 Tamaño de partícula**

Para uso industrial el tamaño de partícula de las esferas de resina resulta de la relación entre la velocidad de intercambio (la cual es mayor con partículas pequeñas) y la tasa de flujo (la cual requiere partículas grandes para tener menores pérdidas de presión). El tamaño estándar varía entre partículas con un diámetro entre 0,3 y 1,2 mm, pero se pueden conseguir tamaños menores o mayores según la necesidad del uso (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

#### **3.1.3.2 Solubilidad**

El intercambio iónico de sustancias puede ser soluble bajo operación normal. Todas las resinas intercambiadoras usadas actualmente son poliácidas o polibases de alto peso molecular que son virtualmente insolubles pero después de ciertas temperaturas se solubilizan (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

### **3.1.3.3 Forma**

La forma de los gránulos esféricos debe tener máxima homogeneidad y dimensión uniformes, tal que el fluido en la filtración permanezca aceptable (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

### **3.1.3.4 Densidad**

Esta es una propiedad muy importante en las resinas. Existen varios tipos de densidad, la más representativa es la densidad húmeda y varía de 1.02 a 1.38 según el tipo de resina (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

### **3.1.3.5 Caída de Presión**

La caída de presión es muy importante en el diseño de equipos. Esta relaciona el tamaño, forma, uniformidad y compresibilidad de las partículas, la viscosidad de la solución, temperatura y tasa de flujo utilizada (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

### **3.1.3.6 Resistencia a la Fractura**

La expansión y contracción de la resina durante el agotamiento y la regeneración no sería causa para que se revienten los gránulos. El diseño de aparatos de intercambio iónico debe también estar dirigido a la expansión, a evitar excesiva tensión o abrasión mecánica de la resina. El agua a ser ionizada por resinas de intercambio iónico debe estar libre de material suspendido y coloidal ya que pueden obstruir la resina, disminuir el flujo e intercambio, así como también el tiempo de vida (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

### 3.1.4 Estabilidad

Al deteriorarse una resina se va perdiendo la estabilidad. El deterioro se manifiesta en diferentes formas cada una de ellas es independiente o relacionada con otros factores; bajo condiciones normales. El deterioro puede ser de naturaleza química y se manifiesta en una pérdida gradual de su capacidad de intercambio (CIDI, 1999, Nevárez 2009).

El siguiente listado muestra las formas de deterioro:

- ✓ Ruptura de las partículas de la resina.
- ✓ Despolimerización de la resina y consecuentemente hinchamiento.
- ✓ Disminución de la capacidad total.
- ✓ Daño de los grupos funcionales.
- ✓ Ensuciamiento por precipitación de elementos extraños sobre la partícula del intercambiador.

### 3.1.5 Selectividad

Una consideración importante al determinar la posibilidad de una reacción de intercambio iónico, es la preferencia observada de ciertas resinas por ciertos iones que poseen unas características de carga similares; el que un equilibrio sea favorable para un sistema iónico determinado depende mayormente de la selectividad de la resina.

Actualmente se conocen las razones de las selectividades de las resinas; en general, la selectividad depende de la *carga y el tamaño de los iones*. La influencia más importante es la magnitud de la carga del ion ya que una resina prefiere contraiones de elevada valencia. Así, para una serie de aniones típicos encontrados en los tratamientos de agua podrían esperarse el orden de preferencia siguiente:  $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ . De una forma similar para una serie de cationes:  $\text{Th}^{4+} > \text{Nd}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$  (Weber, 2003).

Un segundo factor que influye en la selectividad iónica es la *presión de hinchamiento de la resina*. En un disolvente polar como el agua los grupos activos de la resina y los iones móviles en las fases resina y disolución tienden a solvatare. La solvatación o hidratación de los iones ejerce una presión de hinchamiento dentro de la resina, ésta presión está incrementada por las fuerzas de repulsión entre los grupos iónicos fijos y está contrarrestada por los enlaces de reticulación que unen a la partícula.

Para una resina y solución electrolítica en agua el radio de solvatación influye en las variables que afectan a la presión con el resultado de que las resinas prefieren los iones con menor radio de solvatación. En general los iones multivalentes hidratados son adsorbidos con prioridad debido a que su tamaño es inferior al de una unidad cargada equivalente de iones de menor carga. En una serie iónica de igual carga el ion con menor radio en la fase en disolución ocupa el primer lugar de la serie.

A continuación se da el orden de preferencia para los metales alcalinos:  $Cs^+ > Rb^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$  y para los alcalinotérreos:  $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Be^{2+}$ . Se observa que para cada serie la preferencia aumenta con el número atómico y el radio iónico y disminuye con el radio de solvatación. De forma similar, para una serie aniónica monovalente se obtiene:  $CNS^- > ClO_4^- > I^- > NO_3^- > Br^- > CN^- > HSO_4^- > NO_2^- > Cl^- > HCO_3^- > CH_3COO^- > OH^- > F^-$  (Weber, 2003).

El tercer factor que influye en la selectividad es la *interacción iónica dentro de la resina y en el volumen de la disolución*. La resina prefiere como regla general los contraiones que presentan mayor afinidad para los grupos iónicos fijos; la resina adsorberá con prioridad los iones que pueden formar precipitados o complejos con los grupos iónicos de la resina.

El último factor significativo en la selectividad iónica es la *acción tamizadora o de filtración*. Los iones orgánicos y complejos inorgánicos son en su mayoría demasiado grandes para penetrar la matriz de la resina. Este efecto es mucho más pronunciado para

resinas que tengan un grado elevado de reticulación; de hecho, el grado de reticulación influye en la selectividad de la resina. Cuanto mayor sea el grado de reticulación mayor es la selectividad de una resina para un ión por encima de otro, cuando la reticulación disminuye el efecto de éste factor disminuye llegando a ser despreciable (Weber, 2003).

### **3.2 Resina Purolite NRW-37**

Las resinas grado nuclear de Purolite son procesadas para satisfacer las especificaciones más exigentes. Estas resinas son purificadas especialmente con una alta conversión a la forma regenerada y con un tamaño de partícula estrictamente controlado. La dureza de la perla tiene un promedio de más de 400 gramos en la forma regenerada; todos los productos grado nuclear de Purolite tienen más del 95% de perlas enteras perfectas.

Los productos grado nuclear Purolite son utilizados en agua ultra-pura, desechos de radiación, productos farmacéuticos, semiconductores y pulido de condensados.

La resina Purolite NRW-37 se compone de Purolite NRW-400 (anión tipo 1 de base fuerte) y Purolite NRW-100 (catión de ácido fuerte), ambos en la forma regenerada mezclados a un equivalente químico 1:1. Hay otras relaciones a solicitud del cliente. Los lechos de resina mixta Purolite pueden utilizarse para sistemas regenerativos o no regenerativos (en cartucho). Las resinas nucleares de lecho mixto son procesadas sin agentes defloculantes para garantizar que la calidad obtenida sea nada menos que la mejor (<http://www.novem.com.mx>, [en línea]).

La Figura 3.1 muestra la resina mixta Purolite NRW-37 en tres dimensiones: en forma normal y observada en microscopio con objetivo de 4x y 10x. Se puede apreciar en estas imágenes la forma esférica y los colores ámbar y blanco de la resina mixta. La Tabla 3.1 muestra las características químicas y físicas típicas de esta resina

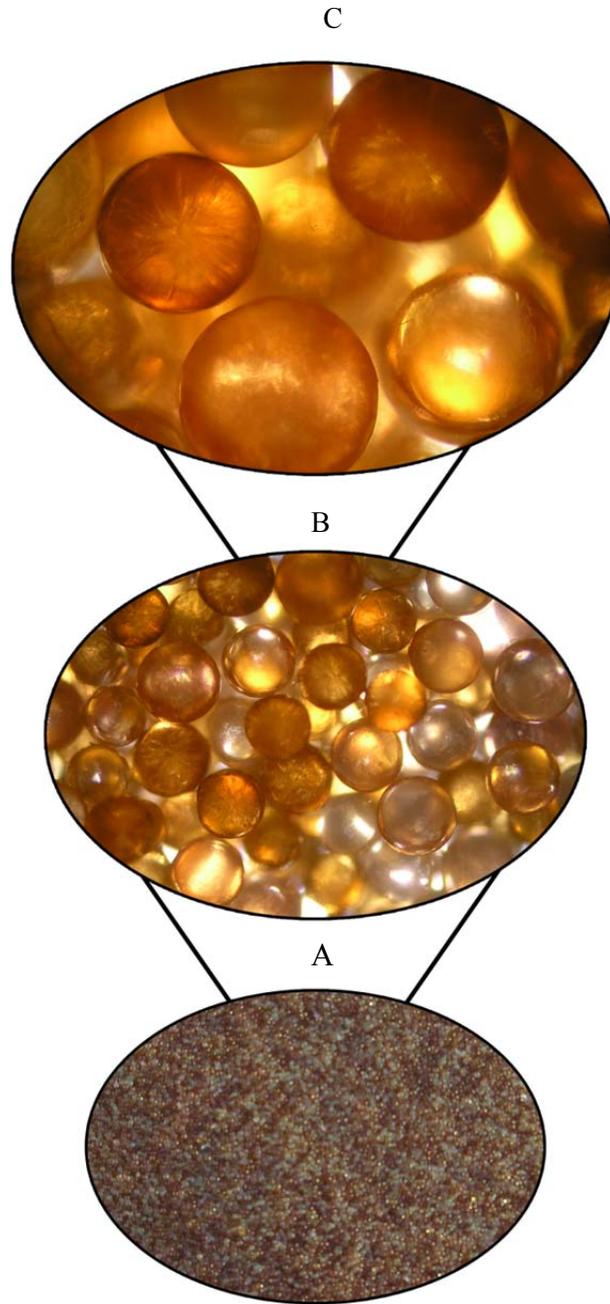


Figura 3.1. Resina Purolite NRW-37. A: normal. B: observada en microscopio con objetivo de 4x. C: observada en microscopio con objetivo de 10x.

Tabla 3.1 Características químicas y físicas típicas de la resina mixta Purolite NRW-37\*

---

**Estructura Funcional**  
 Cation..... $\text{RSO}_3 \text{H}^+$  (Copolímero de poliestireno sulfonado en forma hidrógeno)  
 Anión..... $\text{R}_4\text{N}^+ \text{OH}$  (Forma de hidróxido en base fuerte del copolímero de poliestireno de alquilo cuaternario de amonio)

**Aspecto Físico....** Perlas esféricas color ambar

**Forma Iónica** (al embarcar).... H/OH

**Tamaño de Criba**  
 Criba estándar británica.....malla 14-36  
 Criba estándar EUA.....malla 16-40

**Rango de Tamaño de Partícula** .....+1.2mm<5%  
 .....-0.4mm<2%

**Relación por Volumen:** 1.5 partes de anión PuroliteNRW-400:  
 1.0 partes de cation Purolite NRW-100

**Capacidad Total (Volumétrica)**  
 Cation forma  $\text{H}^+$  .....1.8 meq./mL. min.  
 Anión forma  $\text{OH}^-$  ..... 1.3 meq./mL. min.

**Capacidad de Columna** 0.58 meq./mL. (29 g  $\text{CaCO}_3$  /L) min.  
 (12.7 kg/pie<sup>3</sup> ) mín.

**Contenido de Metales Pesados en ppm por peso de resina seca**  
 Sodio y Potasio..... 40 ppm máx.  
 Hierro (Fe)..... 100 ppm máx.  
 Metales Pesados..... 50 ppm máx.

**Porcentaje de Conversión a Forma Iónica**  
 Cation....  $\text{H}^+$  =99.9% mín. (o según lo solicitado)  
 Anión .... $\text{OH}^-$ =95% mín. (o según lo solicitado)  
 Cl=0.4% máx. (o según lo solicitado)\*\*  
 $\text{CO}_3$ =5% máx.

**Contenido de Humedad al embarcar....** 65% máx.

**Rango de pH (Estabilidad)....** 0 a 14

**Peso Aprox. de Embarque ...**740 g/L (46 lbs./pie<sup>3</sup>)

**Temperatura Máxima de Operación**  
 Cama no regenerable.....100 °C (212 °F)  
 Cama regenerable.....60 °C (140 °F)

**Capacidad de Flujo de Operación**  
 12-17 m/h (5-7 gpm/pie<sup>3</sup>) (se pueden utilizar capacidades más altas para el pulido)

**Pureza del Agua Desionizada:**  
 Agua de pureza ultra alta mayor a 10 megohmios de resistencia llegando hasta 18.3 megohmios, que equivalen respectivamente a 0.1  $\mu\text{S/cm}$  a 0.055  $\mu\text{S/cm}$

---

\*Según catálogo del proveedor

\*\*El NRW-37-LC con menos del 0.1% de cloruro está disponible a solicitud.

### **3.3 Intercambio Iónico en Columna**

Este sistema se emplea a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical a través de la cual fluye la disolución a tratar. El proceso global consta de varias etapas las cuales se describen a continuación.

#### **3.3.1 Etapas del Proceso**

##### **3.3.1.1 Empaquetamiento de la Columna**

Se introduce la resina de intercambio iónico en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para obtener un lecho uniforme. Esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada que además resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de hinchamiento (FECYT, 2001).

##### **3.3.1.2. Acondicionamiento del Intercambiador**

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

Una vez que se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada (Grágeda y Grágeda, 2006).

### **3.3.1.3 Etapa de Carga**

En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y la resina. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través de la resina. Las condiciones de operación (velocidad de flujo, pH de la disolución, otros) dependerán del tipo de resina utilizada y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento en cuanto a capacidad y selectividad.

Cuando la resina comienza a estar saturada con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna. Esta descarga de iones se conoce como punto de ruptura (*breakthrough*) e indica que el tratamiento de la disolución por la resina ya no es efectivo. Una vez que la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la de la concentración de entrada, la resina ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación (Grágeda y Grágeda, 2006).

### **3.3.1.4 Etapa de Regeneración**

La etapa de regeneración consiste en devolver la resina saturada a su forma iónica inicial empleando una disolución concentrada en el ion originariamente asociado a la resina. Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento de la resina en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente. Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como la concentración y volumen de disolución regenerante así como la velocidad de flujo (FECYT, 2001).

La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

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

- ✓ La generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas.

### **3.3.1.5 Modo de Operación**

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

- ✓ Las disoluciones de carga y de regeneración se introducen siempre por la parte superior de la columna (Figura 3.2).
- ✓ El regenerante se introduce en dirección opuesta a la disolución de carga. Es decir por la parte inferior de la columna. Este proceso se denomina proceso en contracorriente (Figura 3.3).

El procedimiento más habitual es el primero ya que supone un equipamiento más barato que el segundo; sin embargo, este modo de operación utiliza el regenerante menos eficientemente que el proceso en contracorriente. En éste al pasar el regenerante de abajo hacia arriba se fluidiza el lecho de intercambiador de manera que se aumenta la superficie de contacto. La regeneración es más rápida y se necesita menos volumen de regenerante (Grágeda y Grágeda, 2006; FECYT, 2001).

La operación de intercambio iónico se realiza habitualmente en semicontinuo, en un lecho fijo de resina a través del cual fluye una disolución. El régimen de funcionamiento no es estacionario por variar continuamente la concentración de los iones en cada punto del sistema.

Las instalaciones constan generalmente de dos lechos idénticos de forma que sí por uno de ellos circula la disolución que contiene los iones que se desea intercambiar, el otro se está regenerando (Gilarranz, 2006).

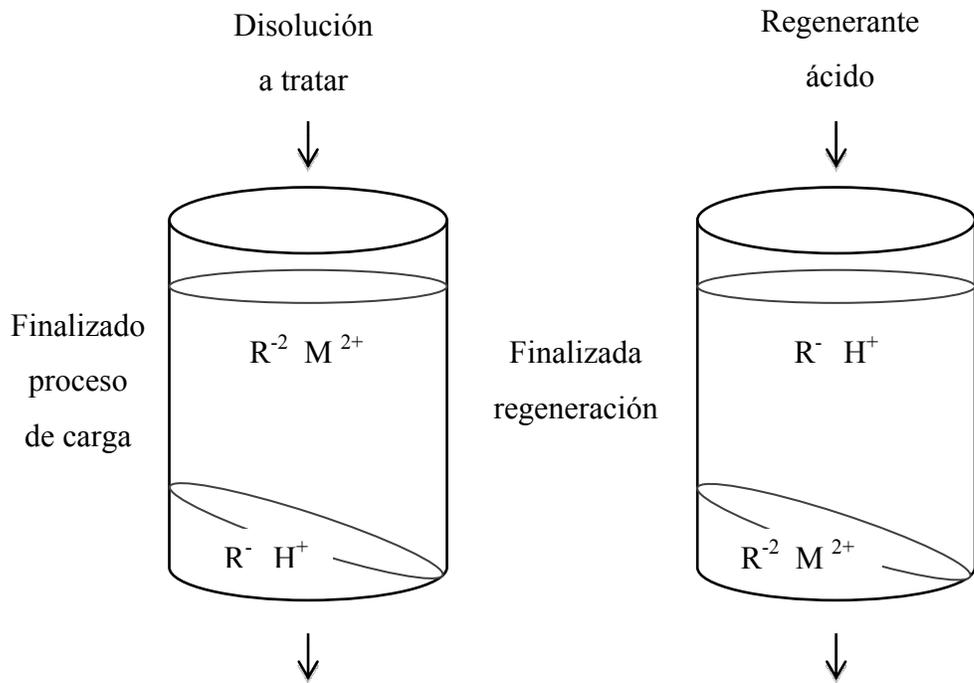


Figura 3.2 Proceso de intercambio iónico en columna: carga y regeneración por la parte superior de la columna (FECYT, 2001).

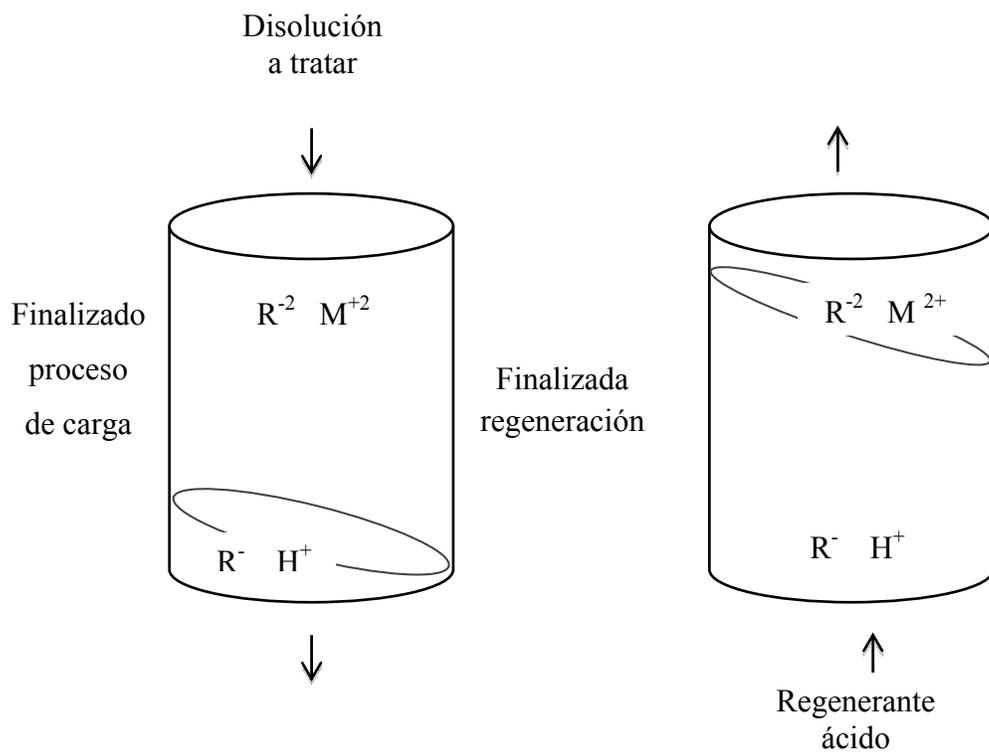


Figura 3.3 Proceso de intercambio iónico en columna: regeneración por la parte inferior de la columna (FECYT, 2001).

Al inicio de la operación de un lecho la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar cerca de la entrada del lecho donde el fluido se pone en contacto con intercambiador. A medida que transcurre el tiempo el sólido próximo a la entrada se encuentra prácticamente saturado y la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar lejos de la entrada. Debido a la resistencia que opone el sistema a la transferencia de iones desde el seno del líquido a los centros de intercambio se establece un gradiente de concentración en el lecho. La región donde ocurre la mayor parte del cambio de concentración es la llamada zona de transferencia de materia, esta zona separa la zona virgen de la resina y la de saturación. (Gilarranz, 2006).

A medida que progresa el intercambio iónico la zona de transferencia de materia se traslada en el lecho hasta alcanzar su extremo inferior (Figura 3.4), instante a partir del cual la disolución de salida contendrá cantidades crecientes de los iones que se desea intercambiar.

El tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación en el lecho hasta que los iones de la disolución aparecen en la corriente de salida o más concretamente cuando se alcanza la máxima concentración permisible en el efluente, se denomina *tiempo de ruptura* ( $t_R$ ). En este momento, la corriente se desviaría a un segundo lecho, iniciando el proceso de regeneración del primero. La curva que representa la evolución de la concentración del efluente que abandona el lecho recibe el nombre de *curva de ruptura* (Figura 3.5).

El conocimiento de la curva de ruptura, es fundamental para el diseño de un lecho fijo de intercambio iónico, y en general debe determinarse experimentalmente dada la dificultad que entraña su predicción (Gilarranz, 2006).

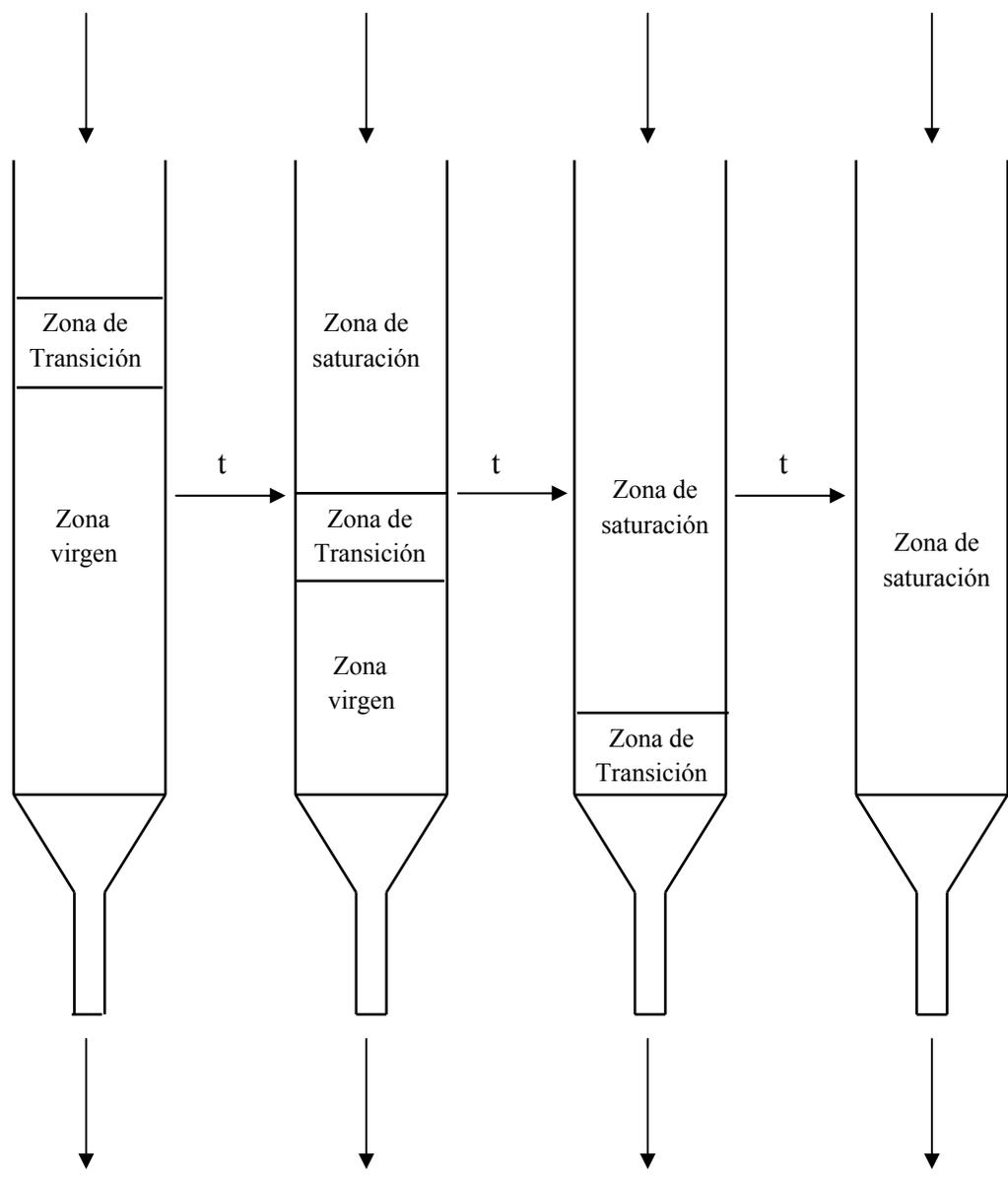


Figura 3.4 Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico (Gilarranz, 2006).

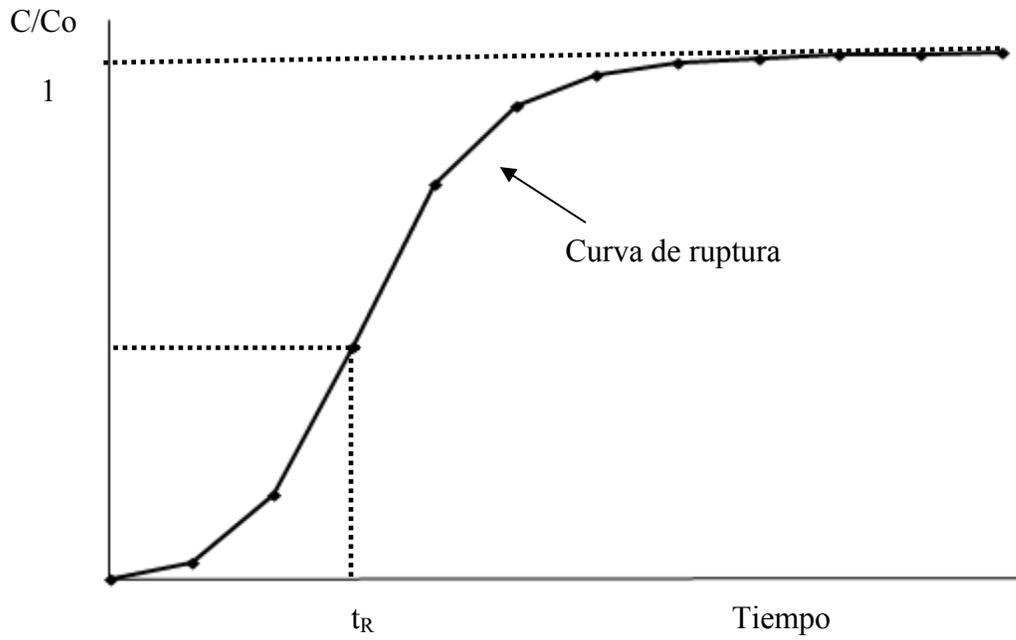


Figura 3.5. Diagrama concentración efluente-tiempo iónico (Gilarranz, 2006).

### 3.4 Determinación de la Capacidad de la Resina

Se define como *capacidad de la resina* al valor de la concentración de iones que pueden ser retenidos por una unidad de peso de resina. Suele expresarse como *meq* de soluto retenidos/g resina seca (Aguilar, 2002). La capacidad de la resina es un parámetro fundamental para la selección del intercambiador ya que generalmente se requieren capacidades altas para la separación o purificación a realizar.

La determinación de la capacidad máxima de una resina catiónica se realiza intercambiando ésta con una disolución básica, se produce una reacción irreversible entre el catión saliente de la resina con los iones OH<sup>-</sup> de la disolución de tal forma que si existe suficiente concentración de soluto llega a agotarse la capacidad total de la resina.

Para el cálculo de la capacidad de la resina en lecho fijo en unas condiciones determinadas es necesario conocer cuál es la cantidad total de soluto retenido por la misma. Este valor se puede determinar a partir de la curva de ruptura del sistema en función del volumen eluído (Figura 3.6). Se calcula el área de la zona comprendida entre la curva de ruptura y la línea recta horizontal correspondiente a la concentración de la disolución de entrada y se divide este valor entre el peso total de resina contenido en la columna (Ec. 3.3).

$$q_0 = \frac{\text{Área sobre la curva de ruptura (L)} \times C_o \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}}\right)}{\text{Peso de resina (g)}} \quad [3.3]$$

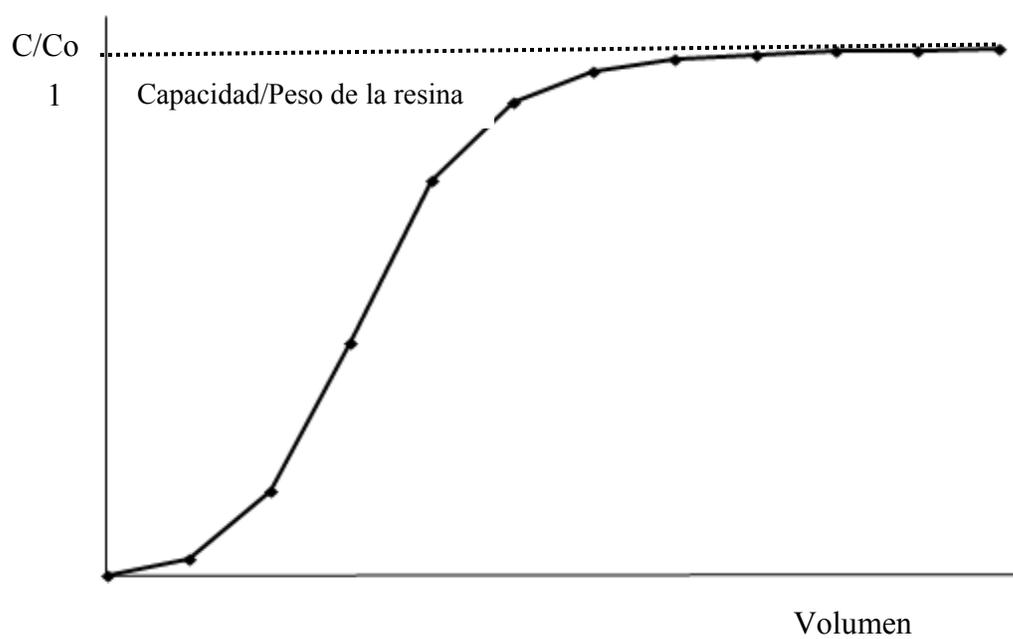


Figura 3.6 Cálculo de la capacidad de una resina (Gilarranz, 2006).

### 3.5 Fracción de Lecho Utilizado

La fracción de lecho utilizado en el punto de ruptura o a cualquier tiempo de la operación se puede determinar a partir de la cantidad de soluto retenida en ese punto y la capacidad de la resina (Ec. 3.4).

$$\text{Fracción de lecho utilizado} = \frac{\text{Cantidad de soluto retenido (meq)}}{q_0 \left(\frac{\text{meq}}{\text{g}}\right) \times \text{Peso de la resina (g)}} \quad [3.4]$$

La cantidad de soluto retenido a un tiempo dado se calcula determinando el área de la zona comprendida entre el tramo correspondiente de la curva de ruptura y la línea recta horizontal que corresponde a la concentración de la disolución de entrada (Ec. 3.5, Figura 3.7).

$$\text{Cantidad de soluto retenido (meq)} = A_t \times C_o \quad [3.5]$$

### 3.6 Longitud de Lecho no Utilizado

Una vez iniciada la operación de intercambio el perfil de concentración en la zona de transferencia de materia adquiere pronto su forma característica y una anchura que no varía al desplazarse a través del lecho. Por tanto, si se utilizan diferentes longitudes de lecho manteniendo constante el resto de las condiciones se obtendrán curvas de ruptura de la misma forma. En lechos de gran longitud la zona de transferencia representa una fracción menor de forma que se utiliza una mayor fracción y longitud de lecho. La longitud de lecho no utilizado en un punto determinado se puede calcular a partir de la fracción del lecho utilizado y la longitud del lecho (Ec. 3.6) (Gilarranz, 2006).

$$\text{Longitud de lecho no utilizado} = \text{Longitud de lecho} - (\text{Fracción de lecho utilizado} \times \text{fracción de lecho}) \quad [3.6]$$

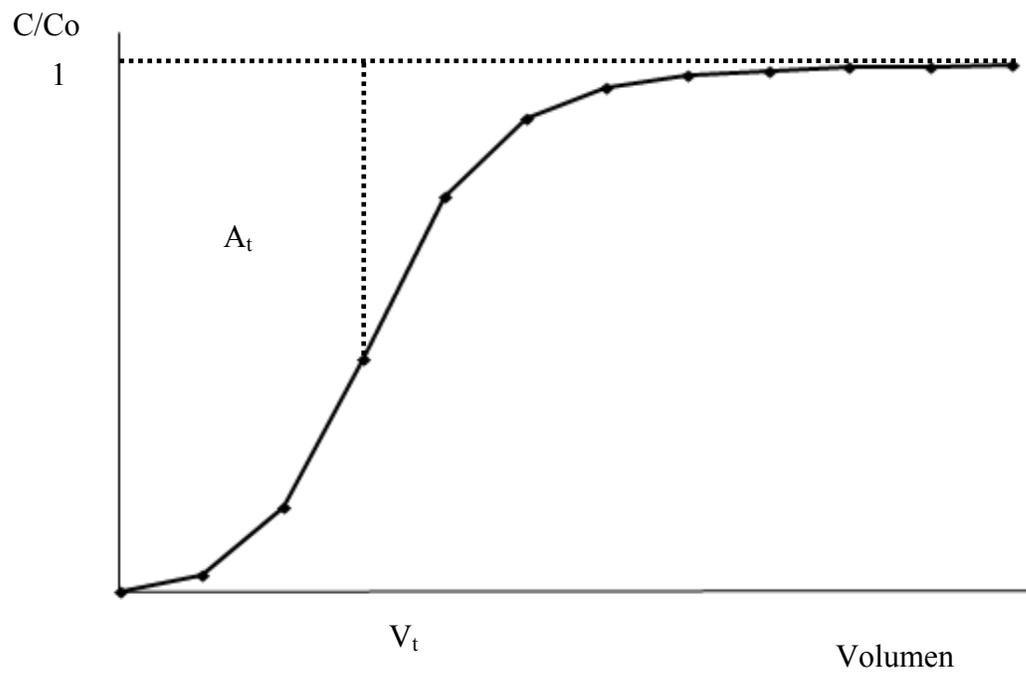


Figura 3.7 Cálculo de la cantidad de soluto retenida a un tiempo determinado (Gilarranz, 2006).

