

PROPIEDADES MÁS DESEABLES DE SAL PARA SUAVIZADORES Y CRITERIOS PARA SU CORRECTA APLICACIÓN

14 octubre 2025



Carbotecnia
PURIFICACIÓN AVANZADA

**PROPIEDADES MÁS DESEABLES
DE SAL PARA SUAVIZADORES
Y CRITERIOS PARA SU CORRECTA
APLICACIÓN**

14 OCTUBRE
MARTES

10:00 AM.
HORA CDMX

CAPACITACIÓN

IMPARTIDO POR EL ING. GERMÁN GROSSO

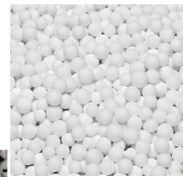
Diversos sólidos que intercambian iones



Carbón de hueso



Zeolita



Alúmina activada



Resinas de intercambio iónico

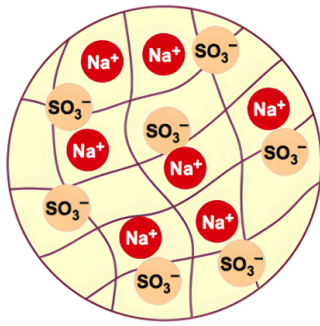
Diversos sólidos en la naturaleza intercambian iones. El ser humano ha sabido aprovechar este fenómeno y ha desarrollado sólidos sintéticos intercambiadores de iones que aprovecha en diversas aplicaciones.

Resinas de intercambio iónico



Uno de ellos son las resinas de intercambio iónico, que tienen diversas aplicaciones.

Resina suavizadora



- Resina de poliestireno reticulado con divinilbenceno.
- Grupo funcional: sulfonato (R-SO_3^-).
- Por lo tanto, es catiónica y fuerte.
- Ciclo sodio.

Su aplicación más frecuente ha sido la suavización del agua, que consiste en retener iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), así como otros iones divalentes presentes en menores concentraciones. A cambio, la resina cede iones sodio (Na^+) al agua. Dado que los iones divalentes son los que causan la “dureza” del agua, el proceso de eliminarlos se conoce como “suavización”. Las resinas suavizadoras se fabrican comúnmente a partir de copolímeros de estireno y divinilbenceno. Estos polímeros forman un sólido poroso que contiene grupos funcionales sulfonato ($-\text{SO}_3^-$). Los grupos sulfonato permanecen disociados en todo el rango de pH, lo que hace que estas resinas sean resinas catiónicas fuertes, es decir, capaces de intercambiar todo tipo de cationes.

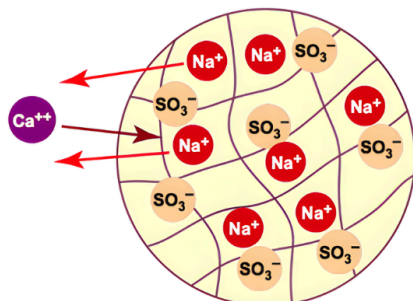
Iones que prefieren las resinas catiónicas fuertes

- Los de carga mayor
- Los de radio iónico menor

Preferencia	Ion Trivalente	Ion Divalente	Ion Monovalente
1	Al^{3+} (aluminio)		
2	Fe^{3+} (hierro(III))		
3		Ba^{2+} (bario)	
4		Sr^{2+} (estroncio)	
5		Ca^{2+} (calcio)	
6		Mg^{2+} (magnesio)	
7			K^+ (potasio)
8			NH_4^+ (amonio)
9			Na^+ (sodio)
10			H^+ (hidrógeno)
11			Li^+ (litio)

Las resinas catiónicas fuertes muestran una mayor afinidad por los cationes de mayor valencia. Entre los cationes con la misma valencia, prefieren aquellos con menor radio iónico. Dado que los principales cationes divalentes presentes en el agua son el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), las resinas catiónicas fuertes los retienen con mayor fuerza que a los cationes monovalentes, como el sodio (Na^+). Por ello, cuando se hace percolar agua que contiene calcio y magnesio a través de una cama de resina catiónica fuerte en ciclo sodio, la resina intercambia sus iones sodio por los iones calcio y magnesio: retiene los divalentes y cede sodio al agua.

Resina suavizadora



Si retiene un ion Ca^{2+} (40 g/mol), cede dos iones Na^+ (46 g/mol).

Si retiene un ion Mg^{2+} (24.3 g/mol), cede dos iones Na^+ (46 g/mol).

Por cada ion divalente que retiene una resina suavizadora, libera dos iones sodio (Na^+), que son monovalentes.

Compuesto utilizado para regenerar resinas suavizadoras

NaCl

KCl (costoso)

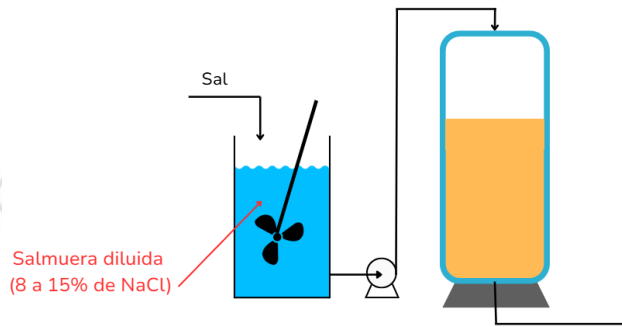
Cuando una resina suavizadora ha agotado su capacidad de retener iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), debe regenerarse con una solución concentrada de cloruro de sodio (NaCl). Durante la regeneración, la alta concentración de iones sodio (Na^+) en la salmuera desplaza a los iones divalentes que la resina había retenido durante el servicio. Aunque la resina tiene mayor afinidad natural por los cationes divalentes, la fuerza de la concentración (efecto de masa) permite que los iones sodio reemplacen a los de calcio y magnesio, restaurando así la resina a su forma sódica.

Formas en las que se ofrece comercialmente la sal para regenerar resinas suavizadoras



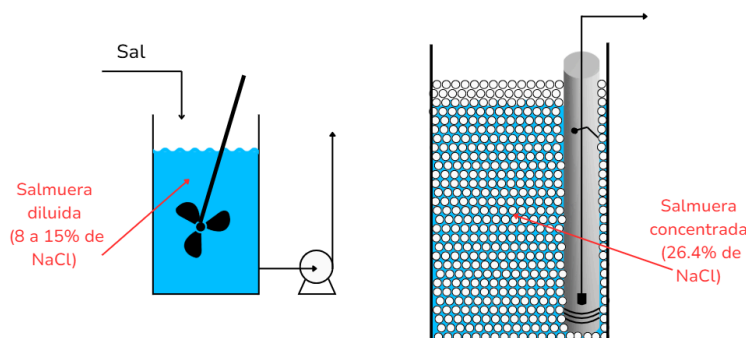
La sal para regenerar resinas suavizadoras se vende en tres presentaciones: pélets, gránulos o cristales.

Regeneración de una resina suavizadora



La solución empleada para regenerar las resinas catiónicas se denomina salmuera diluida. Se llama así porque su concentración de cloruro de sodio (NaCl), aunque elevada, es inferior a la de una salmuera saturada. Normalmente contiene entre 8 % y 15 % en peso de NaCl.

Alternativa simple para preparar la salmuera diluida



Para preparar la salmuera diluida, una opción es partir de una salmuera concentrada o saturada. Esta se obtiene poniendo en contacto agua con pélets, gránulos o cristales de sal, hasta que se disuelve suficiente cantidad de cloruro de sodio (NaCl) para alcanzar una concentración de saturación de aproximadamente 26.4 % en peso a temperatura ambiente. A partir de ese punto, no se disuelve más sal, y los pélets, gránulos o cristales conservan su forma y resistencia mecánica.



Una vez obtenida la salmuera concentrada, esta se succiona mediante una válvula de instalación superior equipada con un eyector o venturi. El principio de succión se basa en un flujo de agua motriz o inductor, que al

pasar por el venturi genera una zona de baja presión que aspira la salmuera concentrada. El flujo de agua motriz suele tener un caudal aproximadamente dos veces mayor que el del flujo inducido de salmuera, y de esta proporción resulta una salmuera diluida con una concentración de entre 8 % y 15 % en peso de NaCl.

Tiempo en que queda saturada la salmuera

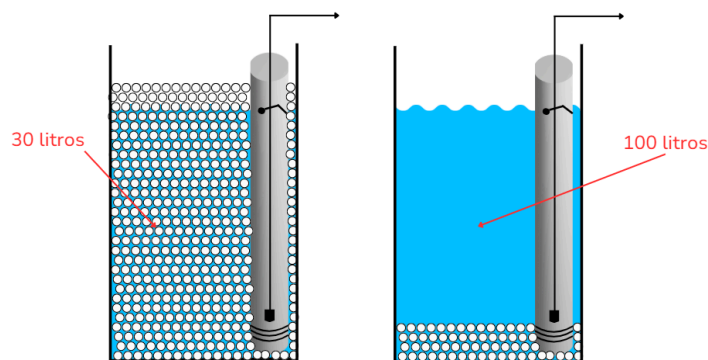
1.5 h
a 20°C

26.4%
NaCl



El tiempo requerido para formar una salmuera concentrada al colocar agua entre los espacios intersticiales de los pélets de sal es de aproximadamente una hora y media. Cuando se utiliza sal granular o en cristales, el tiempo de disolución es menor, ya que estas partículas son más pequeñas y presentan una mayor superficie de contacto con el agua.

Espacio vacío entre los gránulos de sal: 30%



Es más práctico y confiable preparar la salmuera diluida a partir de una salmuera saturada que se succiona mediante una válvula de instalación superior, método que, de hecho, es el más utilizado actualmente. Para obtener la salmuera concentrada, el tanque de salmuera se dimensiona considerando que el espacio vacío entre las partículas de sal representa aproximadamente el 30 % del volumen total. La salmuera se extrae del tanque entre dos niveles:

- El nivel inferior, donde se ubica una pichanca con válvula de retención.
- El nivel superior, controlado por una válvula de flotador.

Como ejemplo, si se requieren 30 litros de salmuera concentrada, el volumen comprendido entre ambos niveles debe ser de alrededor de 100 litros. Si el tanque no se llena adecuadamente con sal, la válvula de instalación superior succionará un volumen mayor de salmuera en lugar de

mantener la concentración deseada. Si el nivel de sal queda por debajo del nivel inferior (donde está la pichancha), la válvula succionará los 100 litros completos de salmuera concentrada en lugar de los 30 litros requeridos. Por ello, siempre debe mantenerse el nivel de sal por encima del nivel superior correspondiente a la salmuera concentrada, para asegurar una preparación estable y reproducible del regenerante.

EL NIVEL DE SAL EN EL TANQUE DE SALMUERA DEBE ESTAR POR ENCIMA DEL NIVEL DE LÍQUIDO



Así debe verse un tanque de salmuera: con la sal por encima del nivel de la salmuera.

Producción de sal para regenerar resinas suavizadoras

Tipo de sal	Método de producción	Pureza típica (NaCl %)
Sal solar	Evaporación natural de agua de mar o salmueras en estanques abiertos.	95-98 %
Sal de mina (rock salt)	Extracción minera subterránea y trituración del mineral halita.	95-99 %
Sal evaporada	Evaporación mecánica de una salmuera purificada con vapor o vacío (<i>vacuum pan evaporation</i>).	99.6-99.9 %

En cuanto a la calidad de la sal para regenerar resinas suavizadoras, esta puede variar según su origen. Como se muestra en la imagen, la sal puede extraerse del agua de mar, obtenerse de minas o producirse industrialmente. En este último caso, la sal tiene un origen natural, pero se somete a procesos de purificación y recristalización para alcanzar la alta pureza requerida en aplicaciones de tratamiento de agua.

Grado de pureza de la sal para regenerar resinas suavizadoras

	A Grano		B Pélet		C Cristales		D Pélet		E Pélet		F Pélet	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Humedad (%)		0.30		0.20		0.3		0.20		0.25		0.1
Insolubles (%)		0.04		0.05		0.04		0.10		0.03		0.03
NaCl (%)	99.50		99.60		99.60		99.60		99.50		99.00	
SO ₄ ⁻ (%)		0.25		0.30		0.25		0.40		0.30		0.041
Mg ⁺⁺ (%)		0.04		0.04		0.04		0.15		0.03		0.35
Ca ⁺⁺ (%)		0.09		0.10		0.09		0.15		0.12		
Metales tóxicos, ppm (arsénico, cadmio, mercurio, plomo)		3.1		1.5		3.1				3.1		0.0002
Nitrógeno amoniacal (ppm)					No contiene					1		
Nitritos (ppm)					No contiene				No contiene			
Nitratos (ppm)					No contiene				No contiene			
Materia extraña (%) // Impurezas (%)		0			No contiene			0.10	0.20	1.00		

Los datos de la tabla fueron tomados de las fichas técnicas y certificados de calidad de los proveedores.

En la imagen se muestran los parámetros de calidad que suelen reportar los fabricantes de sal para regenerar resinas suavizadoras. Por ejemplo,

con la especificación de humedad, el cliente sabe cuánto es el monto máximo que podría estar pagando por agua. Además, al controlar la humedad se evita apelmazamiento y formación de bloque sólidos que dificultan la fluidez, tanto al vaciar la sal en el tanque de salmuera como en el interior del mismo.

Parámetros que provocan ensuciamiento del tanque de salmuera y erosión en las válvulas automáticas de instalación superior

	A Grano		B Pélet		C Cristales		D Pélet		E Pélet		F Pélet	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Insolubles (%)		0.04		0.05		0.04		0.10		0.03		0.03
SO4= (%)		0.25		0.30		0.25		0.40		0.30		0.041
Mg++ (%)		0.04		0.04		0.04		0.15		0.03		0.35
Ca++ (%)		0.09		0.10		0.09		0.15		0.12		
Materia extraña (%) // Impurezas (%)		0			No contiene			0.10	0.20	1.00		

Los insolubles reportados suelen corresponder a arcilla o arenilla. La materia extraña e impurezas son otros sólidos visibles y muy distintos al cloruro de sodio. Pueden ser de origen orgánico. Los sulfatos, el magnesio y el calcio forman sulfatos de magnesio o calcio muy poco solubles en la salmuera y que, forman un lodo salino

Costras y lodo en el tanque de salmuera

- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Insolubles (arena y arcilla) • Sulfatos de calcio y magnesio • Carbonatos de calcio y magnesio • Materia orgánica | } | <ul style="list-style-type: none"> • Lodo • Mushing (lodo salino) • Bridging (costras) |
|--|---|---|

El ensuciamiento del tanque de salmuera puede presentarse de distintas formas:

- Lodo de color café, generalmente asociado a arena, arcilla o materia orgánica.
- Lodo salino, de color blanco o crema, compuesto principalmente por sales poco solubles.
- Costras blancas, que se adhieren a las paredes o al fondo del tanque y suelen ser depósitos cristalinos de sal o sulfatos de calcio y magnesio.

El lodo y el lodo salino erosionan y dañan los internos de las válvulas de instalación superior



Es importante limpiar el tanque de salmuera cuando se nota ensuciamiento porque los insolubles que llegan al interior de las válvulas de instalación superior erosionan los internos de las mismas y los dañan.

Efecto de los metales pesados

5. Niveles críticos orientativos

Aunque la sal para suavizadores no tiene especificación universal de metales, las guías de pureza de sales industriales (AWWA B200, ASTM D632) suelen considerar:

Metal	Nivel máximo recomendable en sal (mg/kg)	Motivo del límite
Hierro (Fe)	< 10	Evitar color y fouling
Manganeso (Mn)	< 1	Evitar manchas y depósitos
Cobre (Cu)	< 0.5	Evitar intercambio indeseado
Plomo (Pb)	< 1	Toxicidad, cumplimiento sanitario
Arsénico (As)	< 1	Toxicidad crónica
Mercurio (Hg)	< 0.1	Toxicidad aguda

Las resinas suavizadoras pueden retener algunos metales pesados al intercambiarlos por iones sodio (Na^+) presentes en la resina. Durante la regeneración, la mayoría de estos metales se eliminan de la resina junto con la salmuera de descarga. Se considera metal pesado a todo elemento metálico con una densidad superior a 5 g/cm^3 , como el plomo (Pb), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el cadmio (Cd) o el níquel (Ni). No todos los metales pesados son altamente tóxicos ni provocan toxicidad aguda, pero cada uno puede afectar de forma distinta a la resina o al agua tratada. Por estas razones, y como se indica en la imagen, es importante que la concentración de metales pesados en la sal regenerante esté estrictamente limitada.

Sal comestible

NOM-040-SSA1-1993

Debe ser yodatada (KIO_3 o KI) (0.003 a 0.005 %) → Protección contra bocio

O yodofluorada (NaF) (0.04 a 0.055%) → Protección contra caries

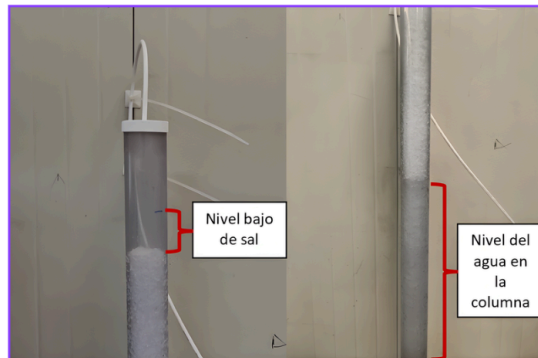


La sal comestible suele estar yodatada y, en algunos casos, también fluorada. Ni el yodato, el yoduro ni los fluoruros presentes en estas sales afectan el funcionamiento de las resinas suavizadoras. Sin embargo, no es recomendable utilizar sal comestible —incluso si es de alta pureza— para la regeneración de resinas, ya que su costo es considerablemente mayor que el de la sal industrial especialmente formulada para este propósito.

Pruebas: 200 ciclos de formación de salmuera



Pruebas: 200 ciclos de formación de salmuera



Pruebas: 200 ciclos de formación de salmuera



En Carbotecnia hemos realizado pruebas de 200 ciclos consecutivos de formación de salmuera, utilizando sal granular de calidad para regeneración de resinas suavizadoras. El objetivo fue evaluar si, tras múltiples ciclos, la sal podía formar una masa compacta o incrustación que obstruyera la succión de la salmuera. Los resultados mostraron que no se presentó ninguna obstrucción ni alteración significativa en la fluidez o disolución de la sal.

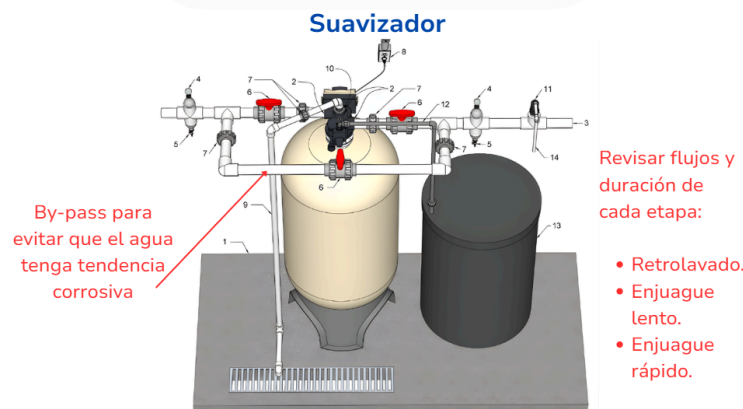
Tipo de control de la válvula de instalación superior

Θ V

Precio: + 25 a 30%

**Mayor aprovechamiento
de la sal**

En cuanto a las válvulas de instalación superior, las más costosas son aquellas que se programan para regenerar en función del volumen de agua tratada, en lugar de hacerlo por tiempo. No obstante, este tipo de control vale la pena, ya que la inversión adicional se recupera gracias a un uso más eficiente de la salmuera. Esto se debe a que la regeneración ocurre solo cuando la resina ha suavizado el volumen de agua correspondiente a su capacidad de intercambio, evitando regeneraciones innecesarias y reduciendo el consumo de sal y agua.



Todo suavizador debe contar con una línea de by-pass, por dos razones principales: (a) Permitir el suministro de agua cuando el equipo se encuentra en mantenimiento o en regeneración. (b) Facilitar la mezcla controlada de agua suavizada y no suavizada, con el fin de ajustar el índice de saturación de Langelier y evitar condiciones corrosivas o incrustantes en la red de distribución. Además, al iniciar la operación del suavizador —y periódicamente cada 3, 4 o 6 meses— conviene verificar que la duración y los caudales de las distintas etapas del ciclo de regeneración (retrolavado, dosificación de salmuera, enjuague lento y enjuague rápido) sean los adecuados para las condiciones del sistema.

Enjuague lento



Desplazamiento de la salmuera

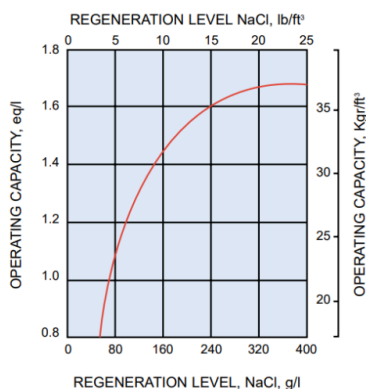
Vale la pena mencionar que el enjuague lento, más que una etapa de enjuague propiamente dicha, consiste en desplazar la salmuera que ingresó al suavizador mediante un flujo de agua a la misma velocidad con la que se dosificó la salmuera. Este paso permite que la reacción de intercambio iónico continúe hasta completarse, asegurando que la resina quede completamente regenerada antes del enjuague rápido. También conviene señalar que, al pasar de la etapa de regeneración al enjuague lento, la válvula de instalación superior no realiza ningún movimiento mecánico: simplemente, el nivel de salmuera desciende hasta alcanzar la altura de la pichancha, la cual se cierra para impedir que el venturi aspire aire. A partir de ese momento, solo circula el flujo motriz de agua, que cumple la función de realizar el “enjuague lento”.

Regeneración de la resina suavizadora



La regeneración en flujo ascendente (*counter-current regeneration*) es más eficiente que la de flujo descendente. Permite ahorrar entre 15 % y 30 % de sal y obtener un agua suavizada con menor fuga de dureza. Sin embargo, no se aplica en la mayoría de las válvulas de instalación superior, ya que requiere un mecanismo adicional o un distribuidor interno que permita invertir el flujo durante las etapas de regeneración y enjuague.

Por esta razón, la regeneración en flujo ascendente se utiliza principalmente en sistemas industriales de gran capacidad con válvulas automáticas de instalación lateral o múltiple, donde el diseño permite controlar la dirección del flujo.



Otro aspecto importante es que no conviene regenerar con una cantidad de cloruro de sodio tan alta que la capacidad operativa adicional obtenida sea mínima. En otras palabras, no vale la pena seguir aumentando la dosis de sal cuando la pendiente de la curva de capacidad operativa vs. nivel de regeneración se vuelve poco pronunciada, indicando que la resina ya no recupera capacidad de forma significativa. En el ejemplo mostrado en la imagen, este punto se alcanza aproximadamente con 10 lb de NaCl por ft³ de resina a regenerar.

Equipos que utilizan resinas de intercambio iónico

Unidades para medir TCCV (min)

gpm/ft³ (los ft³ son de resina)

BV/h

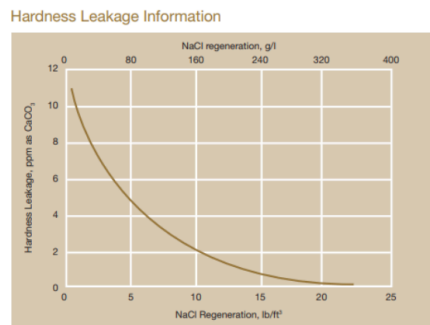
BV/h = volúmenes de cama de resina por hora

Unidades para medir velocidad de flujo o CH (gpm/ft²)

m/h

Cabe recordar que lo que en el ámbito del carbón activado granular (CAG) se denomina tiempo de contacto en cama vacía (TCCV) y se expresa en minutos (min), en el ámbito de las resinas de intercambio iónico suele expresarse en términos de caudal, ya sea en galones por minuto por pie cúbico de resina (gpm/ft³) o en volúmenes de cama (bed volumes, BV) por hora. Por otro lado, en lugar de carga hidráulica, que en filtración se expresa en galones por minuto por pie cuadrado (gpm/ft²), en el campo de las resinas se reporta como velocidad de flujo en metros por hora (m/h).

Fuga de dureza residual



Finalmente, es importante recordar que, a mayor nivel de regeneración —es decir, cuanto mayor sea la cantidad de cloruro de sodio (NaCl) alimentada a la cama de resina durante el ciclo de regeneración—, menor será la fuga de dureza que se presente en el suavizador. Esta fuga de dureza (también llamada dureza residual o “*hardness leakage*”) se refiere a la pequeña cantidad de iones calcio y magnesio que no son retenidos por la resina durante el servicio. En la mayoría de las aplicaciones no representa un problema, pero sí puede ser crítica en ciertos casos, como en la suavización de agua de alimentación a calderas o en procesos industriales que requieren agua de muy baja dureza.

Gracias por su atención

Tel. + 52 33 3834-0906
ventas@carbotecnia.com.mx
ingenieria@carbotecnia.com.mx

Carbotecnia
PURIFICACIÓN AVANZADA