

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**ESTUDIO DE REMOCIÓN DE BORO DEL AGUA
DESTINADA PARA LA AGRICULTURA EN EL
DISTRITO DE ITE – TACNA UTILIZANDO
UNA RESINA SELECTIVA AL BORO
Y PROPUESTA DE DISEÑO DE
UNA COLUMNA DE
INTERCAMBIO
IÓNICO
TESIS**

Presentada por:

Bach. Jean Carlo Pizarro Rabanal

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

TACNA – PERÚ

2021

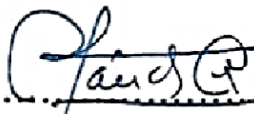
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

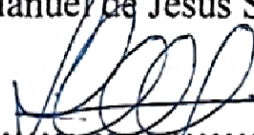
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química


**ESTUDIO DE REMOCIÓN DE BORO DEL AGUA DESTINADA
PARA LA AGRICULTURA EN EL DISTRITO DE ITE –
TACNA UTILIZANDO UNA RESINA SELECTIVA AL
BORO Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA
COLUMNA DE INTERCAMBIO
IÓNICO**

Tesis sustentada por Bach. Jean Carlo Pizarro Rabanal el día 05 de marzo del 2021, estando integrado el jurado por:

Presidente: 
Mgr. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

Secretario: 
Mgr. Pedro Nolazco Cornejo del Carpio

Vocal: 
Mgr. Alberto Carmelo Condori Gamarra

Asesor: 
Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

Dedicatoria

A mis queridos padres que constantemente me apoyaron y por enseñarme a tener fortaleza de continuar hacia adelante, a mi hijo que es la razón de que me levante cada día, esforzarme por el presente y el mañana, eres mi principal motivación.

Agradecimiento

A Dios que me dio la oportunidad de vivir, la fortaleza espiritual, física y de regalarme una familia maravillosa.

Al Dr. Edgardo Avendaño Cáceres, por su constante apoyo y guía siendo el asesor de la presente tesis,

A la Escuela Profesional de Ingeniería Química, quien facilitó el uso del Laboratorio de Procesos Químicos para la elaboración del presente trabajo.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por financiar la presente tesis a través del canon, sobre canon y regalías mineras en su modalidad de concurso para tesis de pre-grado.

A la Municipalidad Distrital de Ite, por facilitar las tomas de muestras de agua utilizadas en la presente tesis.

A mis padres y hermanos, por apoyarme constantemente con palabras de aliento y fortaleza.

A mi hijo, por ser la motivación más grande para concluir con éxito esta tesis.

A todos los profesores, por sus enseñanzas durante el tiempo que pasé en las aulas de la universidad.

A mis compañeros de estudios, que de alguna manera han contribuido con este trabajo.

Contenido

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xii
Resumen	xv
Abstract	xvii
Introducción	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema	3
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	8
1.2. Formulación del problema	11
1.3. Justificación	11
1.4. Alcances y limitaciones del estudio	14
1.4.1. Alcances	14
1.4.2. Limitaciones	14
1.5. Objetivos	15
1.5.1. Objetivo general	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
1.6. Hipótesis	15
1.6.1. Hipótesis general	15

1.6.2.	Hipótesis específicas	16
Capítulo II: Marco Teórico		17
2.1.	Antecedentes del estudio	17
2.1.1.	Diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento para la eliminación de boro en vertidos industriales	17
2.1.2.	Estudio de adsorción de boro con Amberlite IRA 743	19
2.1.3.	Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación	22
2.2.	Bases teóricas	23
2.2.1.	Química del Boro	23
2.2.2.	Técnicas de eliminación de Boro	30
2.2.3.	Resina Selectiva Amberlite IRA 743	35
2.2.4.	Adsorción	38
2.2.5.	Diseño de un adsorbedor de lecho fijo	54
2.2.6.	Pérdida de carga, fluidificación y expansión del lecho durante el lavado	60
2.2.7.	Pérdida de carga en el lecho de intercambio al inicio del proceso de intercambio	64
2.3.	Definición de términos	65
2.3.1.	Boro	65
2.3.2.	Adsorción	66
2.3.3.	Intercambio iónico	66
2.3.4.	Resina de intercambio iónico	67
Capítulo III: Marco Metodológico		68
3.1.	Tipo y diseño de la investigación	68
3.2.	Población y muestra	69

3.3.	Operacionalización de variables	70
3.4.	Técnicas e instrumento para recolección de datos	72
3.4.1.	Instrumentos, equipos, materiales y reactivos	72
3.4.2.	Técnicas de recolección de datos	75
3.5.	Procesamiento y análisis de datos	98
3.5.1.	Construcción y descripción de la columna de intercambio iónico	98
Capítulo IV: Resultados y Discusión		108
4.1.	Estudio de la columna de intercambio iónico	108
4.1.1.	Evaluación de la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio	108
4.1.2.	Evaluación del caudal de lavado para una expansión del 50 %	109
4.1.3.	Curva de equilibrio y línea de operación	109
4.1.4.	Determinación experimental de las curvas de avance	110
4.1.5.	Determinar la longitud (altura) o profundidad de la zona de intercambio	111
4.1.6.	Determinar la masa de la zona de intercambio	112
4.1.7.	Determinar el coeficiente global de transferencia de masa	112
4.2.	Resultados	112
4.2.1.	Evaluación de la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio	112
4.2.2.	Evaluación del caudal de lavado para una expansión del 50 %	113
4.2.3.	Curva de equilibrio y línea de operación	113
4.2.4.	Curvas de avance	129
4.2.5.	Determinación de la longitud y profundidad de la zona de intercambio	134
4.2.6.	Determinar la masa de la zona de intercambio	138

4.2.7.	Determinación del coeficiente global de transferencia de masa	139
4.2.8.	Comparación de la curva regenerada con la curva de resina nueva	140
4.3.	Discusión de resultados	142
4.3.1.	Sobre la calidad de la resina	142
4.3.2.	Sobre la velocidad de retrolavado para una expansión del 50 %	143
4.3.3.	Sobre la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio	144
4.3.4.	Sobre el diseño de la columna de intercambio iónico	145
4.3.5.	Sobre las curvas de avance.	147
4.3.6.	Sobre el coeficiente global de transferencia de masa	150
4.4.	Propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico	152
4.4.1.	Masa de la resina	153
4.4.2.	Volumen de resina	154
4.4.3.	Caudal de intercambio	154
4.4.4.	Área de intercambio	155
4.4.5.	Cálculo de la altura del lecho de resina	155
4.4.6.	Tiempo de intercambio	155
4.4.7.	Cálculo de la pérdida de carga al inicio del intercambio	156
4.4.8.	Cálculo de la velocidad de lavado para una expansión determinada (50 %)	156
4.4.9.	Cálculo de la pérdida de carga en el lecho de resina durante el lavado	157
4.4.10.	Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de regenerante	157
4.4.11.	Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de agua de enjuague	158
4.4.12.	Cálculo de la altura del lecho expandido	158

4.4.13. Altura de la columna de intercambio	159
Conclusiones	163
Referencias Bibliográficas	165
Anexo	169

Índice de tablas

Tabla 1	Resultados de monitoreo de calidad del agua de la cuenca Locumba	1
Tabla 2	Resultados de monitoreos de calidad del agua de la planta tratamiento de agua potable de ITE	de 7
Tabla 3	Clasificación de cultivos según su tolerancia al boro	12
Tabla 4	Tabla de valores constantes utilizados en el ensayo de 200 mg/L	20
Tabla 5	Clasificación de las aguas de riego	29
Tabla 6	Comparación de métodos de eliminación de boro	34
Tabla 7	Operacionalización de variables para la curva de equilibrio	71
Tabla 8	Operacionalización de variables para la curva de avance	72
Tabla 9	Resultados de la densidad aparente a diferentes pesos de resina	83
Tabla 10	Resultados de la capacidad útil de la resina	84
Tabla 11	Resultado de análisis de mallas	85
Tabla 12	Datos teóricos para la columna de intercambio iónico	93
Tabla 13	Pérdida de carga al inicio del intercambio	94
Tabla 14	Instrucciones de operación	105
Tabla 15	Pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio	113
Tabla 16	Datos de la curva de equilibrio, concentración inicial y final en mg/L	114

Tabla 17	Datos de la curva de equilibrio, concentración inicial y final, meq de boro / L solución	115
Tabla 18	Datos experimentales de la curva de equilibrio	116
Tabla 19	Datos para trazar la línea de operación y la curva de equilibrio	119
Tabla 20	Datos para calcular la curva de saturación	124
Tabla 21	Altura de la zona de intercambio para los caudales de trabajo	138
Tabla 22	Comparación de las velocidades de lavado teórica y experimental	143
Tabla 23	Comparativo entre las pérdidas de carga iniciales teóricas y experimentales	144
Tabla 24	Comparativo de los tiempos y volúmenes de agua a tratar, y experimentales	145
Tabla 25	Datos de la propuesta de diseño de la columna de intercambio	160
Tabla 26	Datos de la propuesta de diseño de los regenerantes de la columna de intercambio	161

Índice de figuras

Figura 1.	Puntos de monitoreo de la cuenca Locumba - ANA	5
Figura 2.	Resultados de parámetros de la cuenca del río Locumba	6
Figura 3.	Isoterma de la muestra de 25 mg/L de Boro a 30°C	18
Figura 4.	Evolución de las curvas de ruptura en función del flujo de alimentación	19
Figura 5.	Curva de avance de los datos de la Tabla 5	21
Figura 6.	Comparación del modelo ajustado y los datos experimentales, curva de equilibrio	21
Figura 7.	Comportamiento del ácido bórico como ácido de Lewis	24
Figura 8.	Distribución de los diferentes compuestos de boro	26
Figura 9.	Estructura de una partícula de resina y mecanismo de intercambio	36
Figura 10.	Esquema de regeneración de la resina Amberlite IRA-743	37
Figura 11.	Onda de Adsorción	40
Figura 12.	Curva de ruptura idealizada	43
Figura 13.	Tipos de Isotermas de adsorción	47
Figura 14.	Isotermas típicas para los modelos de adsorción de Langmuir y BET.	49
Figura 15.	Perfiles de concentración para la adsorción en un lecho fijo.	54

Figura 16.	Determinación de la capacidad de una columna a partir de la curva de avance	557
Figura 17.	Curvas de avance con diferentes alturas de lecho	59
Figura 18.	Ubicación del punto de muestreo	68
Figura 19.	Curva granulométrica	84
Figura 20.	Columna de intercambio iónico y jebe de unión	98
Figura 21.	Sistema de drenaje parte inferior de la columna de intercambio	99
Figura 22.	Tapón de la parte superior de la columna de intercambio	101
Figura 23.	Construcción de la rejilla inferior	102
Figura 24.	Esquema del proceso de intercambio	104
Figura 25.	Esquema del proceso de lavado o retrolavado	104
Figura 26.	Esquema del proceso de regeneración	105
Figura 27.	Esquema del sistema de intercambio iónico	107
Figura 28.	Datos experimentales de la curva de equilibrio ajustados a la ecuación de Langmuir	117
Figura 29.	Ajuste de la isoterma de Langmuir	117
Figura 30.	Balance de materia para el soluto a lo largo de toda la columna	120
Figura 31.	Línea de operación e isoterma de adsorción	123
Figura 32.	Curva calculada de saturación	127
Figura 33.	Área bajo la curva (unidades de transferencia)	128
Figura 34.	Fracción adsorbida en la zona de intercambio	129

Figura 35.	Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 3 ml/min	131
Figura 36.	Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 7 ml/min	132
Figura 37.	Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 11 ml/min	133
Figura 38.	Comparación curva de avance regenerada y curva de avance nueva	141
Figura 39.	Comparación de las curvas de avance	147
Figura 40.	Curvas de avance a partir del punto de ruptura	149
Figura 41.	Altura de la zona de intercambio a diferentes caudales	150
Figura 42.	Coeficiente global de transferencia de masa para diferentes flujos	151
Figura 43.	Propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico	162
Figura 44.	Captación del agua a tratar en laboratorio de la salida del filtro de la Planta de Tratamiento de Agua de Ite	199
Figura 45.	Imagen de la zona del lecho empacado	200
Figura 46.	Cálculo para hallar la densidad aparente	201
Figura 47.	Muestra de los diferentes puntos de una curva de avance	202
Figura 48.	Muestra de análisis para la curva de calibración	202
Figura 49.	Equipo de trabajo (Columna de intercambio iónico)	203

Resumen

En la presente tesis se estudia la remoción de boro en agua destinada para la agricultura, en el distrito de Ite, utilizando la resina Amberlite IRA 743 en una columna de intercambio iónico, para alcanzar los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, categoría 3, D1, según el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y su modificación D.S. N° 004-2017-MINAM.

Para este estudio se utilizó el agua superficial del Río Locumba; la parte experimental se realizó a través de ensayos en una columna de intercambio iónico (proceso de lecho fijo) que se construyó en el laboratorio, teniendo en cuenta la capacidad útil de la resina en el agua superficial de 0,276 meq de Boro / ml de resina.

La metodología de estudio se centró en obtener las curvas de equilibrio y de avance de la resina Amberlite IRA 743; para la curva de equilibrio se mantiene constante la cantidad de resina (1 gramo) en diferentes recipientes y se varía la concentración inicial de boro, esperando la saturación completa por gramo de resina. La curva de equilibrio se ajustó al modelo de Langmuir, teniendo así un modelo altamente favorable; para la construcción de las curvas de avance se trabajó con tres caudales diferentes, (caudal mínimo, medio y máximo), en este caso para 15 gramos de resina se tendría: 3, 7 y 11 ml/min respectivamente; con la construcción de las curvas de avance y los cálculos respectivos se obtuvo los

coeficientes de transferencia de masa para cada caudal, $0,0134 \text{ L g resina/ h cm}^2$, $0,0214 \text{ L g resina/ h cm}^2$ y $0,0258 \text{ L g resina/ h cm}^2$ respectivamente.

Finalmente, se proyectó el diseño de una columna de intercambio iónico para la siembra de cebolla, donde se proyectó a utilizar 1310 Litros de agua para todo el ciclo de producción de cebolla (05 meses) y 601 gramos de resina Amberlite IRA 743; se planteó trabajar con una producción de 67 litros de agua a la semana, el diseño también incluye las etapas de operación para el proceso de regeneración.

Palabras clave: intercambio iónico, adsorción, boro, resina Amberlite, columna.

Abstract

This thesis studies the removal of boron in water intended for agriculture, in the district of Ite, using Amberlite IRA 743 resin in an ion exchange column, to achieve the national environmental quality standards for water, category 3, D1, according to Supreme Decree N° 002-2008- MINAM and its modification D.S. N° 004-2017-MINAM.

For this study, surface water from the Locumba River was used; the experimental part was carried out through tests in an ion exchange column (fixed bed process) that was built in the laboratory, taking into account the useful capacity of the resin in surface water of 0.276 meq of Boron/ml of resin.

The study methodology focused on obtaining the equilibrium and breakthrough curves of the Amberlite IRA 743 resin; for the equilibrium curve, the amount of resin (1 gram) is kept constant in different containers and the initial boron concentration is varied, waiting for complete saturation per gram of resin. The equilibrium curve was adjusted to the Langmuir model, thus having a highly favorable model; for the construction of the breakthrough curves we worked with three different flow rates, (minimum, average and maximum flow rate), in this case for 15 grams of resin we would have: 3, 7 and 11 ml/min respectively; with the construction of the advance curves and the respective calculations the mass

transfer coefficients were obtained for each flow rate, 0.0134 L g resin/ h cm², 0.0214 L g resin/ h cm² and 0.0258 L g resin/ h cm² respectively.

Finally, the design of an ion exchange column for onion planting was projected to use 1310 liters of water for the entire onion production cycle (05 months) and 601 grams of Amberlite IRA 743 resin; it was planned to work with a production of 67 liters of water per week, the design also includes the stages of operation for the regeneration process.

Keywords: ion exchange, adsorption, boron, Amberlite resin, column.

Introducción

El uso del agua para fines agrícolas a nivel mundial representa el 70 %; para la agricultura el 20 % de la superficie total cultivada y contribuye al 40 % de la producción mundial de alimentos; alguno de los problemas de la agricultura es la falta de agua y la mala calidad de ella, estos factores son importantes para el crecimiento adecuado y óptimo del cultivo. (Banco Mundial, 2019)

En el distrito de Ite, Provincia Jorge Basadre, Departamento de Tacna, los agricultores de la zona realizan el regadío por inundación utilizando el agua de la cuenca Locumba, la cual según la Autoridad Nacional del Agua contiene concentraciones de boro que oscila entre los 8 y 10 mg/L, superando el límite máximo permisible de 1 mg/L de boro.

El grado del daño del cultivo depende de la concentración del tóxico, en este caso la cuenca Locumba presenta una concentración de boro que excede en más de 8 veces los límites máximos permitidos; según la dirección regional de agricultura de Tacna (2017) los principales cultivos del distrito de Ite son la alfalfa, cebolla, olivo, ají, ají panca, ajo, maíz chala y granado.

Entre las técnicas más utilizadas para la remoción de boro se encuentran el intercambio iónico y la osmosis inversa, también existen nuevas técnicas que están siendo estudiadas con el mismo fin, por ejemplo, el proceso de filtración por membrana (electrodiálisis y ultrafiltración). (Chillón, 2009).

Considerando la necesidad de un estudio focalizado a una calidad de agua específica de la zona de Tacna se propone realizar la presente tesis, que consiste en el estudio de remoción de boro en agua destinada para la agricultura en el distrito de Ite, utilizando la resina Amberlite IRA 743 en una columna de intercambio iónico, para que cumplan los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, y así proponer el diseño de una columna de intercambio iónico para un cultivo específico de la zona.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

El departamento de Tacna se divide en cuatro provincias: Jorge Basadre, Candarave, Tarata y Tacna. Las provincias de Jorge Basadre y Candarave no cuentan en la actualidad con agua potable.

El río Locumba ha sido históricamente el curso fluvial con caudales más estables en el sur del Perú, también es la cuenca que concentra gran parte de la actividad minera metálica del departamento (Consortio Río Locumba, 2017).

Según el informe técnico N° 057-2016-ANA-AAA.CO-ALA.CL-AT/CAJA, de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) – Administración local de agua Locumba, realizaron el monitoreo de calidad de agua superficial de la cuenca del río Locumba, en el mes de abril de 2016, considerando nueve (09) puntos de monitoreo, de los cuales se tiene el siguiente resultado:

Tabla 1*Resultados de monitoreo de calidad del agua de la cuenca Locumba*

N°	Punto de monitoreo	Descripción	Parámetro Boro, mg/L
1	1316RCall1	Río Callazas, después con la confluencia con el río Chico.	3,315
2	1316RSala1	Río Salado antes de la confluencia con el río Callazas.	10,04
3	1316RCall3	Río Callazas, después de la confluencia con el río Salado antes del ingreso de la laguna de Aricota.	7,421
4	1316RIlab2	Río Ilabaya, después de vertimiento de poblado Ilabaya antes de la confluencia con el río Curibaya.	6,647
5	1316RCuri2	Río Curibaya, antes de la confluencia con el río Ilabaya.	3,522
6	1316RLocu2	Río Locumba después del vertimiento del poblado Mirave (puente F. Antonio de Zela).	5,984
7	1316RLocu3	Río Locumba aguas abajo del vertimiento del distrito Locumba.	6,745
8	1316RLocu5	Río Locumba antes de la captación Bocatoma hacia la derivación de la ciudad de ITE.	7,602
9	1316RLocu6	Río Locumba, ingreso a humedales de Ite (puente Costanera).	9,891

Fuente: Elaboración propia con datos del ANA (ANA, 2016)

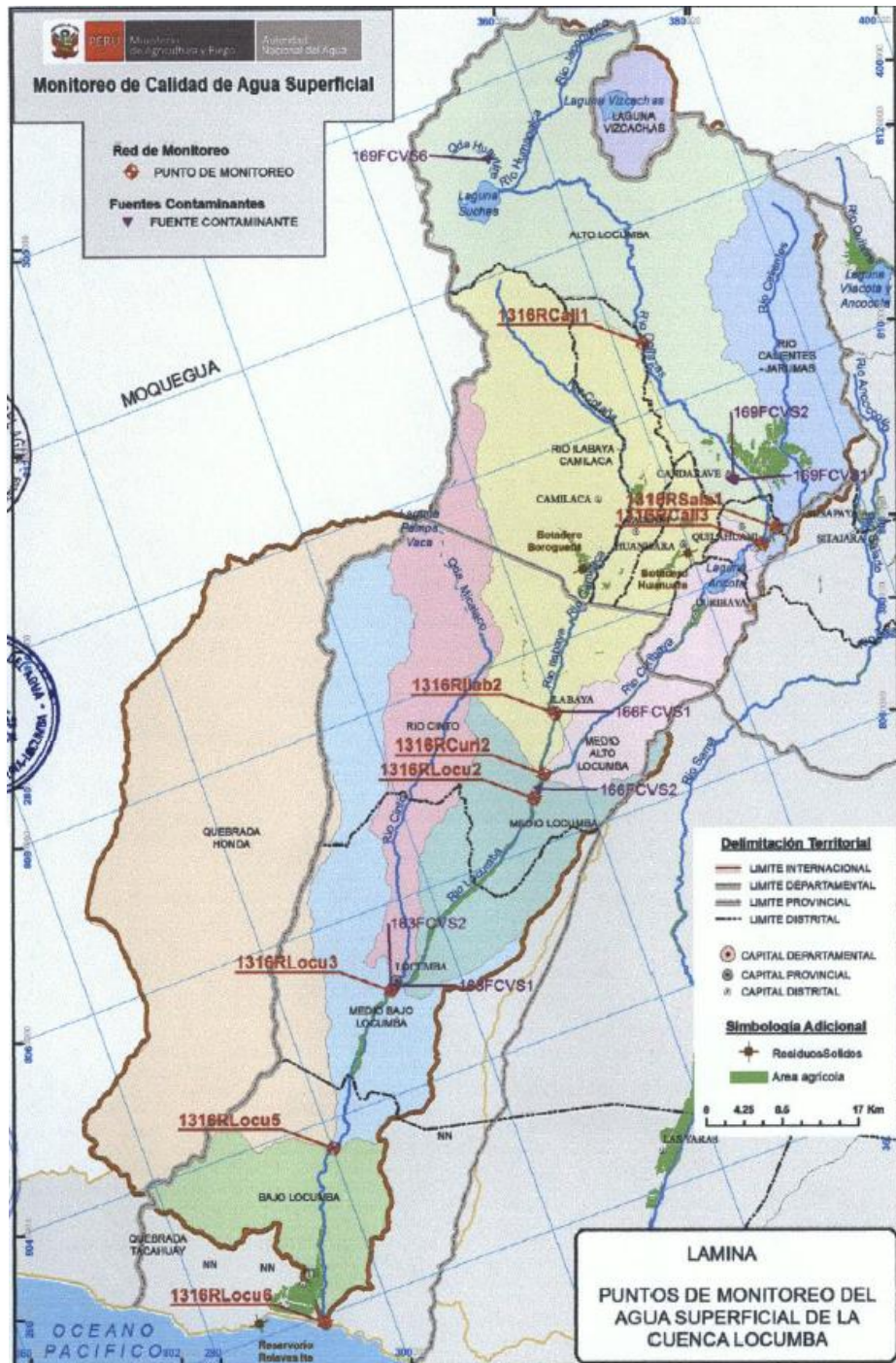


Figura 1. Puntos de monitoreo de la cuenca Locumba - ANA

Fuente: (ANA, 2016)

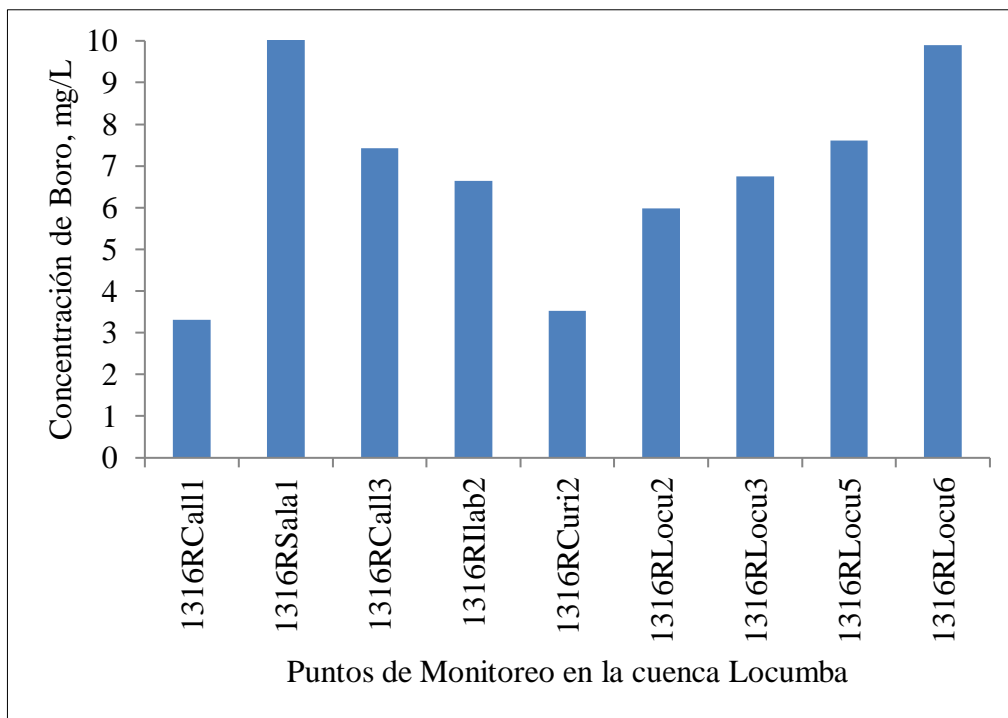


Figura 2. Resultados de Parámetros de la cuenca del río Locumba

Fuente: Elaboración propia con datos del ANA (ANA, 2016)

En la Figura 2 se observa que la concentración de boro en todo el recorrido de la cuenca Locumba, supera el límite máximo permisible de 1 mg/L para el regadío de cultivos, según el Decreto Supremo N° 008-2008-MINAM y su modificación D.S. N° 004-2017-MINAM.

De acuerdo con los monitoreos realizados por la Dirección Regional de Salud Tacna (DIRESA), a la Planta de tratamiento de agua potable del distrito de Ite, Provincia Jorge Basadre G, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 2

Resultados de monitoreos de calidad del agua de la planta de tratamiento de agua potable de ITE

Descripción	Parámetros			
	2016	2017	2018	2019
	Boro (mg/L)	Boro (mg/L)	Boro (mg/L)	Boro (mg/L)
Canal de ingreso a la planta.	9,02	9,94	10,20	8,21
Salida de filtros Planta de Tratamiento de Agua Potable.	-	10,10	10,10	7,95
Cisterna de almacenamiento de agua tratada R1.	7,79	9,92	10,70	8,51
Reservorio de distribución de agua tratada R2.	12,43	-	10,50	10,50
Caño de vivienda inicial.	7,36	9,70	10,10	8,38
Caño de vivienda final.	-	9,86	10,40	8,27

Fuente: Elaboración propia con datos de registros de la DIRESA (correspondiente a los años 2016 al 2019)

Según la Tabla 2, la planta de tratamiento de agua potable del distrito de Ite no está acondicionada para la remoción de boro,

debido a que no existe una variación significativa de la concentración inicial y final.

1.1.2. Problemática de la investigación

La cuenca Locumba, posee una calidad de agua que se encuentra afectado por metales pesados, por ejemplo; el río Callazas (posteriormente a la convergencia con el río Salado) presenta metales como el arsénico, hierro y boro; en Quebrada Honda (en la Parte alta de Pampa Sitana) presenta metales como el sodio y manganeso, provenientes de la liberación de las aguas residuales tratadas; en el río Ilabaya (previa a la convergencia con el río Curibaya), presenta una carga de coliformes termotolerantes; en el río Locumba se encuentran presentes metales como el aluminio, arsénico, antimonio y boro y finalmente en los vertimientos del distrito de Locumba aguas abajo se encuentran coliformes termotolerantes. Como consecuencia de las actividades antropogénicas y la geoquímica de la cuenca, en la Laguna de Suches se encuentran metales pesados como el nitrógeno, arsénico y zinc. (ANA, 2013).

En los sectores que no tienen mucha recarga natural (precipitación pluvial), como Quebrada Honda e Ite, se observan niveles que sobrepasan los límites máximos permisibles; esta

elevada concentración se debe a la presencia de una presa de tratamiento de relaves de la empresa minera Southern Perú, al parecer la presa no ha sido debidamente impermeabilizada y puede existir infiltración, ya que se observan surgencias en las pampas de Sitana con niveles altos de arsénico y boro, debajo de la presa. (INGEMMET, 2009).

Con respecto a la hidroquímica, existen sectores en los que los niveles de sales son muy altos, y los niveles de pH llegan a 3, lo que indica que es agua ácida. Estas características se encuentran ubicados generalmente por los volcanes Yucamane y Tutupaca, los cuales proporcionan al agua estas propiedades particulares; por otro lado, al existir contacto entre los flujos que emana el volcán con el agua, la contaminación con niveles de arsénico y boro son altos. (INGEMMET, 2009).

El grado del daño depende de la concentración del tóxico (boro), tiempo de exposición a éste, así como la sensibilidad del cultivo al compuesto y requerimientos hídricos de la planta. (Arca, 2015)

La presencia de boro está limitada a 0,5 mg/L, para agua potable, mientras que, en aguas de riego, la concentración óptima de boro se encuentra entre 0,3 mg/L y 0,75 mg/L, para cultivos

sensibles se considera limitante una concentración de 1 mg/L.
(Mujal, 2007)

Según el Decreto Supremo N° 008-2008-MINAM y su modificación D.S. N° 004-2017-MINAM, establece los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, en la categoría 3, D1 “Riego de vegetales”, indica que el límite máximo permisible de boro es de 1 mg/L.

La Provincia Jorge Basadre cuenta con tres (03) distritos; Ilabaya, Locumba e Ite. La cuenca Locumba es la fuente principal de abastecimiento de agua del distrito de Ite, según el informe técnico N° 057-2016-ANA-AAA.CO-ALA.CL-AT/CAJA resultados fisicoquímicos de monitoreo participativos de calidad de agua superficial 2016, ANA-ALA Locumba, la concentración promedio de boro en el distrito es de 8 mg/L; el distrito no cuenta con una planta de tratamiento acondicionada para la remoción de boro, limitando el tipo de cultivo en la zona, y la ampliación de su frontera agrícola. Siendo el objetivo de la presente tesis el estudio de remoción de boro utilizando la resina Amberlite IRA 743 en una columna de intercambio iónico y llevarlo a los límites máximos permisibles (Decreto Supremo N°004-2017-MINAM), para el riego de cultivos.

1.2. Formulación del problema

¿Permitirá el estudio en una columna de intercambio iónico utilizando la resina Amberlite IRA 743, la remoción de boro en agua destinada para la agricultura del distrito de Ite, a los valores máximos permisibles establecidos en la norma nacional para riego de cultivos?

1.3. Justificación

El boro es un elemento de traza esencial en organismos vegetales, para el crecimiento, y está implicado en procesos metabólicos fundamentales. La deficiencia de boro inhibe el desarrollo de la planta y un exceso de este elemento resulta tóxico para la misma. El intervalo entre los niveles de deficiencia y de toxicidad es tan solo de 1 o 2 mg/L, y cualquier oscilación podría provocar alteraciones fisiológicas importantes en la planta. Alguno de los principales indicios de toxicidad por boro en las platas, se observa con el cambio de color amarillento de las hojas (en las puntas y bordes), estos indicios avanzan hasta la parte central de la hoja (entre la nervadura), conforme se incrementa la concentración de boro en el tejido de la planta, afecta directamente a su desarrollo y rendimiento. (Mujal, 2007).

Tabla 3*Clasificación de cultivos según su tolerancia al boro*

Clasificación	Sensible	Semitolerante	Tolerante
Concentración de boro	0,30 – 1 mg/L	1 – 2,05 mg/L	2,05 – 4 mg/L
Especies	Manzano	Cebada	Espárrago
	Cerezo	Alfalfa	Algodón
	Limonero	Repollo	Pepino
	Naranja	Zanahoria	Gladiolo
	Peral	Lechuga	Sésamo
	Melocotonero	Cebolla	Tulipán
	Pomelo	Patata	Remolacha
	Aguacate	Calabaza	Haba
	Albaricoque	Espinaca	Pasto
	Higuera	Tabaco	Menta
	Vid	Olivo	Centeno
	Ciruelo	Rosal	
	Judías	Tomate	
		Trigo	

Fuente: (Muñoz, 2002)

Como se puede observar en la Tabla 3 la clasificación de cultivos según su tolerancia al boro es de 0,3 mg/L a 4 mg/L (de sensible a tolerante); según ANA (2016) indica que en la cuenca

Locumba, en la entrada del distrito de Ite la concentración de boro oscila entre 7 a 9,8 mg/L; según la DIRESA, la planta de tratamiento de agua potable del distrito de Ite mantiene constante al boro en un promedio de 8 mg/L en el año 2019; y según el Decreto Supremo N° 008-2008-MINAM y su modificación D.S. N° 004-2017-MINAM, establece los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, en la categoría 3, D1 “Riego de vegetales”, indica que el límite máximo permisible de boro es de 1 mg/L.

Actualmente existen diferentes tecnologías para la remoción de boro, presentes en aguas superficiales; los métodos más empleados y estudiados son el intercambio iónico y la ósmosis inversa; también existen otros procedimientos que se encuentran en fase experimental con este fin, entre ellas se tiene a la electrodiálisis y la ultrafiltración, igualmente se proponen nuevas técnicas como la adsorción realizada con una composición de hidrocalcita y carbón. (Chillón, 2009)

Por ello se hace necesario el estudio de una tecnología para la remoción de boro del agua destinada para la agricultura del distrito de Ite.

1.4. Alcances y limitaciones del estudio

1.4.1. Alcances

- El estudio del proyecto se realizó a escala de laboratorio, utilizando el agua superficial del distrito de Ite.
- Se realizaron análisis de laboratorio para agua superficial.
- Se realizaron análisis fisicoquímicos de pH, boro y turbiedad.
- Se contrastaron los análisis de laboratorio, con los de un laboratorio acreditado, SGS del Perú S.A.C. – Sede AREQUIPA

1.4.2. Limitaciones

- El estudio se realizó en el periodo sin precipitación fluvial, en esta época las características del agua de río de Locumba son constantes.
- Los análisis de boro, se realizaron utilizando el método de la Azometina H siguiendo el procedimiento de Portocarrero (2018), utilizando el espectrofotómetro UV-visible doble haz. Marca Thermo Scientific, modelo Genesys 10S; según Muñoz (2002) la confianza del método utilizado es alto y confiable.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Estudiar la remoción de Boro de un agua destinada para la agricultura en el Distrito de Ite, utilizando la resina Amberlite IRA 743, y propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la caracterización de la resina (tamaño de partícula, densidad, capacidad de intercambio entre otros).
- Determinar la curva de equilibrio y línea de operación.
- Determinar experimentalmente la curva de avance.
- Realizar la propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

El estudio y propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico para la remoción de boro utilizando la resina Amberlite IRA 743, permitirá reducir la concentración de boro, a los límites máximos permisibles establecidos por la normativa nacional para agua de riego de cultivo.

1.6.2. Hipótesis específicas

- La caracterización de la resina influye en el estudio y diseño de una columna de intercambio iónico para la remoción de boro.
- La determinación de la curva de equilibrio y línea de operación influyen en el estudio y diseño de una columna de intercambio iónico para la remoción de boro.
- La determinación experimental de la curva de avance influye en el estudio y diseño de una columna de intercambio iónico para la remoción de boro.
- Los resultados obtenidos a escala laboratorio permitirán elaborar el diseño de la columna de intercambio iónico, para una resina selectiva de boro.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento para la eliminación de boro en vertidos industriales

García (2000), realizó el estudio de la resina Amberlite IRA 743 en laboratorio con agua sintética, colocó en diferentes vasos precipitados diferentes concentraciones de boro hasta 20 mg/L, agregó un gramo de resina en cada vaso para construir la curva de equilibrio; así obtuvo con un coeficiente de separación de $2,89 \times 10^{-3}$ y con una correlación de 0,971, la resina tiende a un comportamiento de una isoterma de tipo Langmuir, indicando así que el proceso es altamente favorable para el intercambio (ver Figura 3), también realizó la caracterización de la resina donde obtuvo la capacidad útil de la resina de 0,23 meq boro /ml resina. Para la construcción de las curvas de avance, utilizó una columna de intercambio iónico, bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de boro de 50 mg/L, diámetro de columna 20 mm y 25 g de resina.

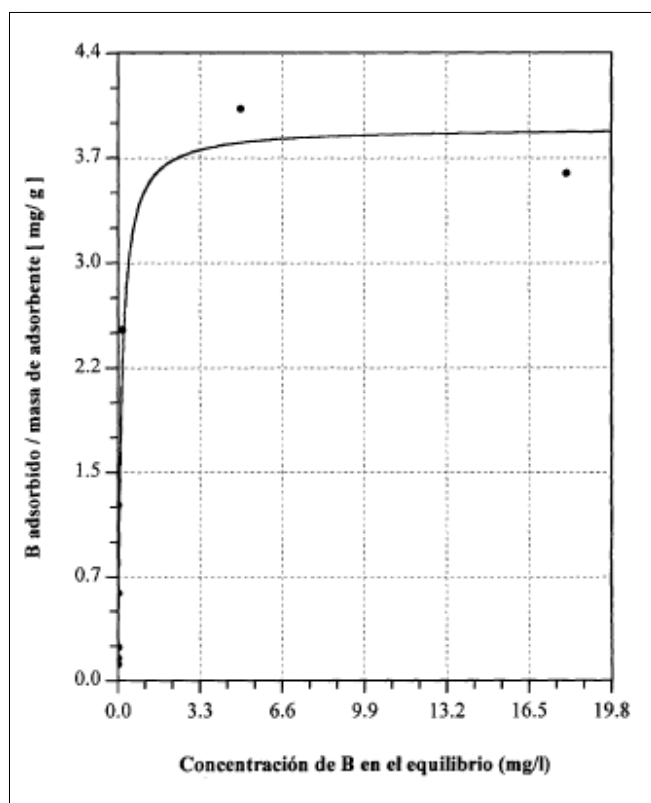


Figura 3. Isotherma de la muestra de 25 mg/L de Boro a 30°C

Fuente: (García, 2000)

Para la construcción de las curvas avance, varió el caudal de alimentación (5, 10 y 20 ml/min), trabajó bajo la suposición de la simetría de las curvas de avance (curvas de ruptura), permaneciendo simbolizado matemáticamente la zona calculada por medio del trazo discontinuo de la curva.

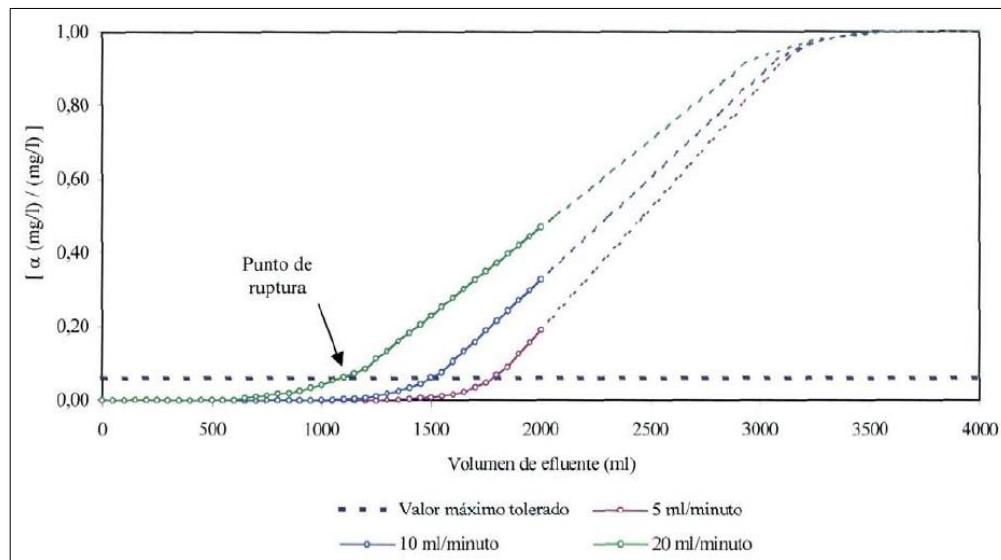


Figura 4. Evolución de las curvas de ruptura en función del flujo de alimentación

Fuente: (García, 2000)

2.1.2. Estudio de adsorción de boro con Amberlite IRA 743

Marín (2011), realizó el estudio del equilibrio y la cinética de adsorción de boro en forma de ácido bórico en medio acuoso, utilizando la resina Amberlite IRA 743, siendo esta un poliestireno copolimerizado con divinilbenceno; logró predecir los comportamientos para los distintos tipos de cinética, en diferentes concentraciones, utilizando la resina Amberlite IRA 743, logró alcanzar un modelo matemático cotejando los resultados de los datos experimentales, prediciendo así el comportamiento para los distintos tipos de cinética, en diferentes concentraciones, utilizando la resina Amberlite IRA 743.

Tabla 4

Tabla de valores constantes utilizados en el ensayo de 200 mg/L

Símbolo	Significado	Valor	Unidades
Q	Caudal	0,75	ml/min
Co	Concentración de entrada	200	mg/L
K'	Constante cinética	0,0005	L/mg
K	Constante Isoterma	0,065	L/mg
B	Constante Isoterma	0,0065	mg _B / mg _{ad}
m _{ad}	Masa adsorbente	5000	mg
V	Volumen	0,008	L
Δt	Incremento de tiempo	0,001	H
	Particiones	10	
ε	Porosidad	0,387	
Mi	Masa por bloque	500	Mg
Vi	Volumen por bloque	0,0031	L

Fuente: (Marín, 2011)

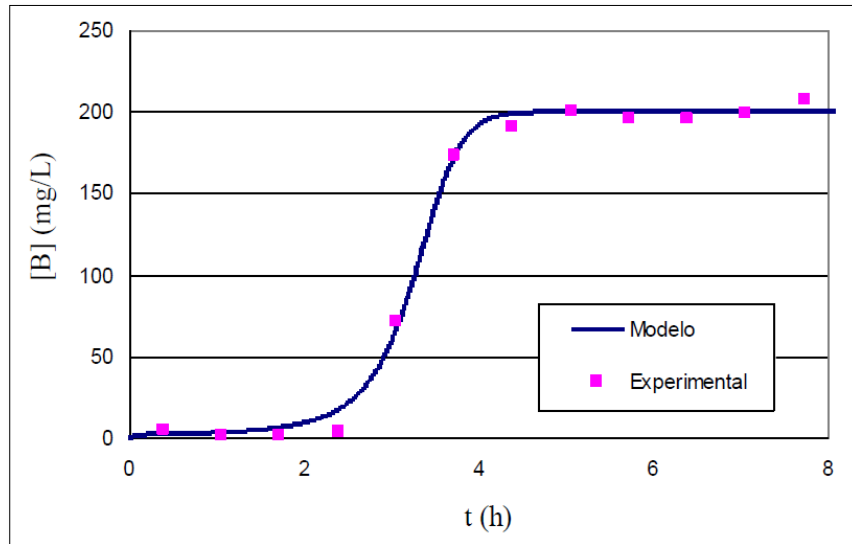


Figura 5. Curva de avance de los datos de la Tabla 5.

Fuente: (Marín, 2011)

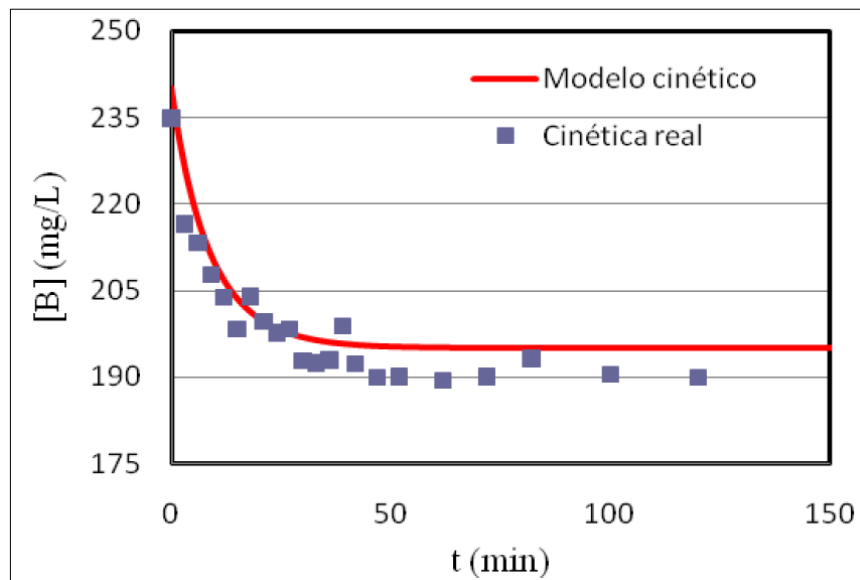


Figura 6. Comparación del modelo ajustado y los datos experimentales, curva de equilibrio.

Fuente: (Marín, 2011)

En el estudio que realizó, logró encontrar la ecuación de la isoterma que predice el comportamiento en los puntos de equilibrio de los ensayos realizados, teniendo como constantes a 0,065 y 0,0065 para la ecuación de la isoterma; sin embargo, sería poco preciso si se realizan ensayos a concentración de 300 mg/L. Al realizar el ensayo en batch con agitación, se obtuvo una constante cinética de 0,0005.

La diferencia de estos ensayos que realizó en columna y en batch con agitación; refiere que para un ensayo en columna el movimiento constante del fluido provoca la disminución de la capa límite situada en la resina, provocando el incremento de la velocidad de la transferencia de materia debido a la disminución de la resistencia de difusión. (Marín, 2011).

2.1.3. Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación

Chillón (2009), comparó las resinas Dow XU-43594.00, Amberlite IRA 743 y Purolite S-108, utilizándolas para un caudal de 160 L/h en una planta piloto de intercambio iónico; la resina Amberlite posterior a utilizar 900 L de efluente/L de resina, empieza su saturación, suponiendo una remoción de 1,3 g de boro /L resina. De igual forma para una retención de 1,5 g boro/L resina, utiliza

1200 L de efluente /L de resina, manteniendo por debajo de 0,5 mg/L la concentración de boro del agua tratada.

Para la regeneración de la resina, bajo los valores antes comentados se necesitó un tratamiento de 56 horas; para mantener la concentración por debajo de 0,5 mg/L, se trabajó 75 h. Por último, concluyó, que para los tres casos de las diferentes resinas la tendencia del comportamiento es muy similares bajo concentraciones de hasta 0,5 mg/L (Chillón, 2009)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Química del Boro

La tabla periódica sitúa en el grupo III-A al elemento boro, presentando algunas características como, por ejemplo, número atómico 5, no metal ligero, estado de oxidación +3, peso atómico de 10,811, entre sus isótopos estables se encuentran distribuidos naturalmente en ^{10}B (19,78 %) y el ^{11}B (80,22 %). También presenta algunas características particulares como ser insoluble en agua, en soluciones alcalinas y alcoholes, es insípido e inoloro; presenta una solubilidad en ácidos como el sulfúrico y nítrico, así como también en metales vinculados como el magnesio, cobre, aluminio, hierro y calcio. (Málave, 2005).

A. El boro en el agua

La distribución del boro en el mundo, se da en los medios acuáticos y terrestres, especialmente en su forma de borato; en la corteza terrestre la presencia del boro se encuentra con una concentración de 10 mg/kg, mientras tanto en los medios acuáticos (océano) tiene hasta un 4,5 mg/kg, no excediendo generalmente a las aguas continentales con una concentración de 7 mg/L. (WHO, 2004)

Generalmente en un medio acuático la presencia del boro se localiza en su forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$, conllevando al comportamiento de tipo ácido de Lewis, en el cual bajo una constante de disociación pka de 9,15, se da la reacción del ion hidrogeno y el ion hidróxido. El comportamiento del ácido bórico se sitúa en la admisión de un par de electrones de un ion OH^- ingresante, para esta particularidad la hibridación sp^2 pasa a sp^3 , con respecto al boro. (Málave, 2005)

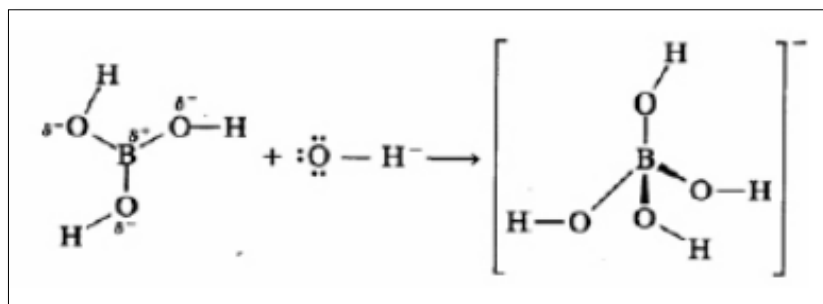


Figura 7. Comportamiento del ácido bórico como ácido de Lewis

Fuente: (Málave, 2005)

En el medio acuático, específicamente en el océano, el equilibrio de alcalinidad lo aporta el boro. Con un 5% de presencia del borato (B(OH)), en el balance alcalino total del océano a pH 8,2; de igual manera para los cálculos cuantitativos de la alcalinidad de deben tener en cuenta a los derivados del boro.(Zeebe R., Sanyal A., Ortiz J., & Wolf-Gladrow, 2001).

La disociación del ácido bórico, comportándose como ácido de Lewis, se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:



A continuación, se puede apreciar las diferentes distribuciones especies de boro conforme a su pH.

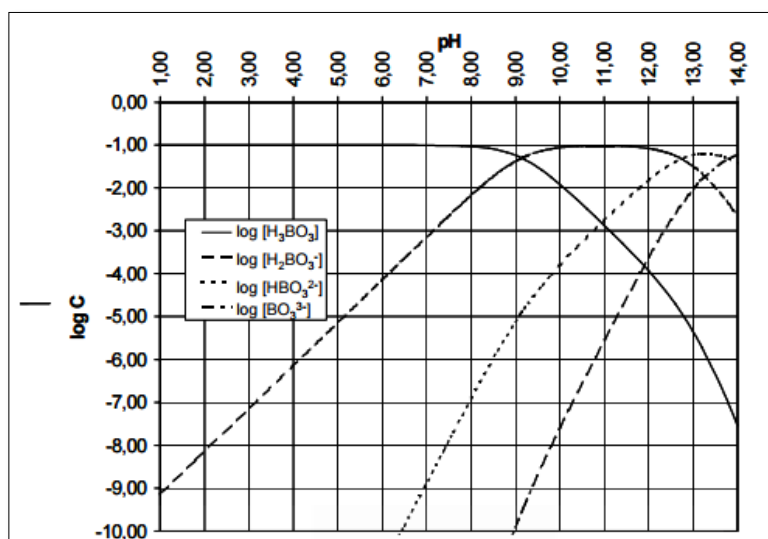
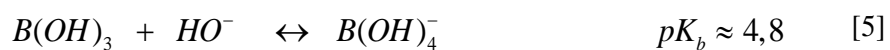
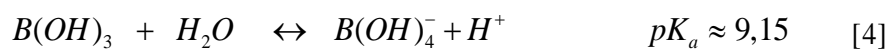


Figura 8. Distribución de los diferentes compuestos de boro

Fuente: (Chillón, 2009)

La disociación del ácido bórico en un medio acuático, conlleva a la formación tetraédrica del ion borato, favoreciendo a esto la existencia del grupo hidroxilo. La reacción [1] se reescribe obteniendo la reacción [5].



Según, (Hyung & Kim, 2006), las constantes pK_b y pK_a no son semejantes; su comportamiento se rige bajo su fuerza iónica y la temperatura (Bartels, Franks, Rybar, Schierach, & Wilf, 2005), para valores presente entre 8,7 – 9,7 de pK_a las temperaturas oscilan entre 10 y 45 °C (Su C., & Suarez, 1995).

Por otro lado, para valores entre 5,2 y 4,4 de pK_b las temperaturas oscilan en el mismo intervalo (Redondo, Busch, & De Witte, 2003).

B. Toxicidad

La tendencia del boro en los tejidos animales y vegetales es de acumularse, constituyendo así un potencial riesgo a la salud de las personas o animales que se alimenten de estas plantas, cultivos o cuerpos de agua con elevadas concentraciones de boro (Metcalf & Eddy, 1995).

C. Efecto sobre el hombre

La toxicología general del boro implica infecciones en las mucosas gástricas y en los ojos, igualmente los derivados del boro no son metabolizables, y no tienden a la acumulación en los organismos, salvo unos depósitos ligeros en los huesos (García, 2000).

Pese a los escasos estudios en seres humanos referidos a las consecuencias de exponerlos a compuestos de boro; indican que la exposición a compuesto de boro, implica infecciones en los ojos y vías respiratorias de leve durabilidad, indicando así efectos leves y tratables. En la realización de un estudio con exposición al boro de

un tiempo prolongado de siete años, no se lograron identificar algún efecto en la salud (WHO, 2004).

D. Efectos sobre las plantas

Uno de los elementos principales para el desarrollo de las plantas, es el boro, se tiene una incertidumbre si con una concentración mayor a 0,5 mg/L en el medio terrestre puede ser perjudicial para las plantas. La absorción del boro del medio terrestre hacia las plantas, se realiza mediante la adsorción de pequeñas cantidades de boro hacia las hojas directamente hacia los contornos de ella, finalmente el agua se evapora por transpiración. La absorción de boro hacia la planta continua su proceso, logrando así una mayor concentración del elemento en el tejido de la planta, logrando así dañar principalmente al tejido de las hojas, esto se puede observar en el color amarillento de las hojas. Algunos nutrientes de las plantas no son absorbidos debido a que los compuestos de boro son de tipo foliar. La variación de las concentraciones de absorción depende de algunas características propias del lugar, lluvia, drenaje, suelo y drenaje (Domy, 1986).

La Tabla 5 presenta la clasificación de agua de riego de acuerdo a su concentración de boro en mg/L.

Tabla 5*Clasificación de las aguas de riego*

Clase	Cultivos sensibles	Cultivos semisensibles	Cultivos tolerantes
1 Excelente	< 0,33	<0,67	<1
2 Buena	0,33 a 0,67	0,67 a 1,33	1 a 2
3 Permisible	0,67 a 1	1,33 a 2	2 a 3
4 Problemática	1 a 1,25	2 a 2,5	3 a 3,75
5 Inadecuada	>1,25	>2,5	>3,75

Fuente: (Domy, 1986)

Chillón (2009), plantea una clasificación de las concentraciones de boro para agua de riego, teniendo así cultivos sensibles, semisensibles y tolerantes; para una concentración de boro menor a 0,7 mg/L, no existen problemas ni restricciones en su uso; para una concentración de boro entre 0,7 y 2 mg/L, se ve un ligero problema teniendo una restricción moderada y finalmente para una concentración de boro mayor a 2 mg/L, presenta un problema agudo teniendo una limitación extrema de su uso.

Habitualmente la deficiencia de boro en tejidos vegetales presenta la carencia de vitalidad y debilidad de las hojas, provocando así deformaciones, carencias de color, manchas y conllevando a la muerte de la planta (Domy, 1986).

Por otra parte, un aumento de concentración de boro en los tejidos de la planta provoca quemaduras y clorosis, volviendo oscuro sus hojas, deformación de sus frutos y provocando así la dificultad de mantener a sus frutos (Keren & Bingham, 1985).

2.2.2. Técnicas de eliminación de Boro

Actualmente las técnicas más utilizadas para la remoción de boro son la ósmosis inversa y el intercambio iónico, igualmente, se han estudiado nuevas técnicas de remoción de boro, entre las que destacan la electrodiálisis y la ultrafiltración, siendo ambas de procesos de membranas; la adsorción con derivados del carbón como la hidrocalcita (Chillón, 2009).

A. Ósmosis inversa

El apogeo de esta técnica en la última década se ha masificado, especialmente para los sectores de industria nuclear, alimentarios, recubrimientos superficiales, entre otros.

La técnica consiste en la inyección de un flujo de agua a una alta presión denominada osmótica, que atraviesa una membrana semipermeable, la presión que realiza el flujo de agua y la acumulación que estimula la membrana se encuentran en un intervalo de 2070 a 10350 KPa. La eficiencia de remoción del elemento contaminante se viene dada por factores específicos, entre

ellos tenemos el estado de oxidación de los iones, la dimensión de la molécula contaminante que usualmente tiene un intervalo de 0,04 a 600 nm; esta particular técnica produce agua desmineralizada, por lo tanto, no muestra una selectividad específica al elemento boro (Marinas, 1991).

Para lograr una adecuada remoción de boro es necesario conocer el comportamiento del contaminante bajo condiciones forzadas y naturales, es por ello que el boro en un intervalo de pH 9 a 11 maximiza su remoción hasta un 90 %, y entre un intervalo de pH 9 a 7, la disminución se da hasta un 30% debido a la creación de puentes de hidrógeno (Marinas, 1991).

Sin embargo, para la industria de elaboración de membranas necesitan materiales con intervalo de pH de 4,0 – 7,5 para la disminución en las reacciones de hidrólisis. Algunos materiales poliméricos heterocíclicos son los nuevos centros de estudios para la fabricación de membranas para la remoción de boro (Rodionov, Voitova, & Romanov, 1991).

B. Intercambio iónico

Es una de las principales operaciones unitarias de transferencia de masa, que facilita a una solución acuosa intercambiar iones que se encuentren situados sobre una película superficial de un sólido. Alguno de los usos de esta técnica se encuentra en operaciones de desmineralización, ablandamiento, purificación, etc. (Schweitzer, 1996).

La resina de intercambio más utilizada para la remoción de boro es la Amberlita IRA-743, o también llamada Amberlita XE-243, esta resina posee la particularidad de un intercambiador de aniones de base débil, esto debido a su grupo amino terciario que ayuda a adherir un ion en medio ácido. (Sekerka & Lechner, 1990).

C. Otras técnicas de eliminación de Boro

Existen otras técnicas de remoción de boro como la ultrafiltración y la electrodiálisis; para la electrodiálisis se tienen en cuenta algunos factores que determinan la remoción de boro, por ejemplo, la concentración de boro en el efluente, pH, membrana, salinidad (Yazicigil & Oztekin, 2006).

Ayildiz & Kara (2005), Para la electrodiálisis, indican que para una alimentación de agua superior a una concentración de 4,5 mg/L de boro, la remoción disminuye hasta al intervalo de 0,3 a 0,5 mg/L,

también precisa que para un pH de 9,5 de alimentación se produce un aumento del rechazo de boro, al alcanzar este límite.

Para la ultrafiltración es necesario tener la formación de un complejo entre el alcohol polivinílico y el borato, algunos estudios indican que es posible la remoción de boro por adsorción en carbón activado; en ensayos de laboratorio utilizando columnas, y una alimentación proveniente de la desalación a un pH 9, la remoción de boro fue superior al 90% (Sinton, 1987).

Algunas de las técnicas de adsorción que se han estudiado utilizan derivados de hidrocalcita como compuestos de adsorción (Mg-Fe(HTFe) y Mg-Al (HTAl)), para ello, la retención del boro también se realiza en forma de borato (Pastor Ferreira, Gomes de Moraes, Durán, & Cornejo, 2006).

Tabla 6*Comparación de métodos de eliminación de boro*

Método	Conc. Inicial de Boro	Eficacia	Sofisticación del equipo	Proceso	Costos relativos
Adsorción Me (OH) _x	Alta	Muy Alta	Baja	Discontinuo	Bajos
Adsorción sobre arcillas	Alta	Muy Alta	Media baja	Discontinuo	Bajos
Electrodiálisis	Baja	Alta	Alta	Continuo	Altos
Evaporación / cristalización	Muy alta	Baja	Media	Discontinuo	Muy Altos
Extracción	Baja	Alta	Media Alta	Continuo	Altos
Intercambio iónico	Baja	Muy Alta	Media	Continuo (regeneración)	Altos
Ósmosis inversa	Baja	Alta	Alta	Continuo	Altos
Precipitación alcalina	Muy alta	Baja	Baja	Discontinuo	Muy bajos

Fuente: (García, 2000)

2.2.3. Resina Selectiva Amberlite IRA 743

Esta resina en particular es de forma esférica, no requiere un pretratamiento y se encuentra seco, En el anexo I (ficha técnica) se puede observar que la estructura del polímero se sostiene en el proceso de la reacción, también al tener contacto con el agua destilado no presenta ninguna contracción, hinchamiento o variación importante. En la figura 9 se puede apreciar la cadena del poliestireno copolimerizado, su comportamiento en la reacción e intercambio y la selectividad de los centros activos al boro de N-metilglucosamina (Marín, 2011).



La Figura 10 presenta un esquema de regeneración que muestra la reacción de intercambio a un pH 9.

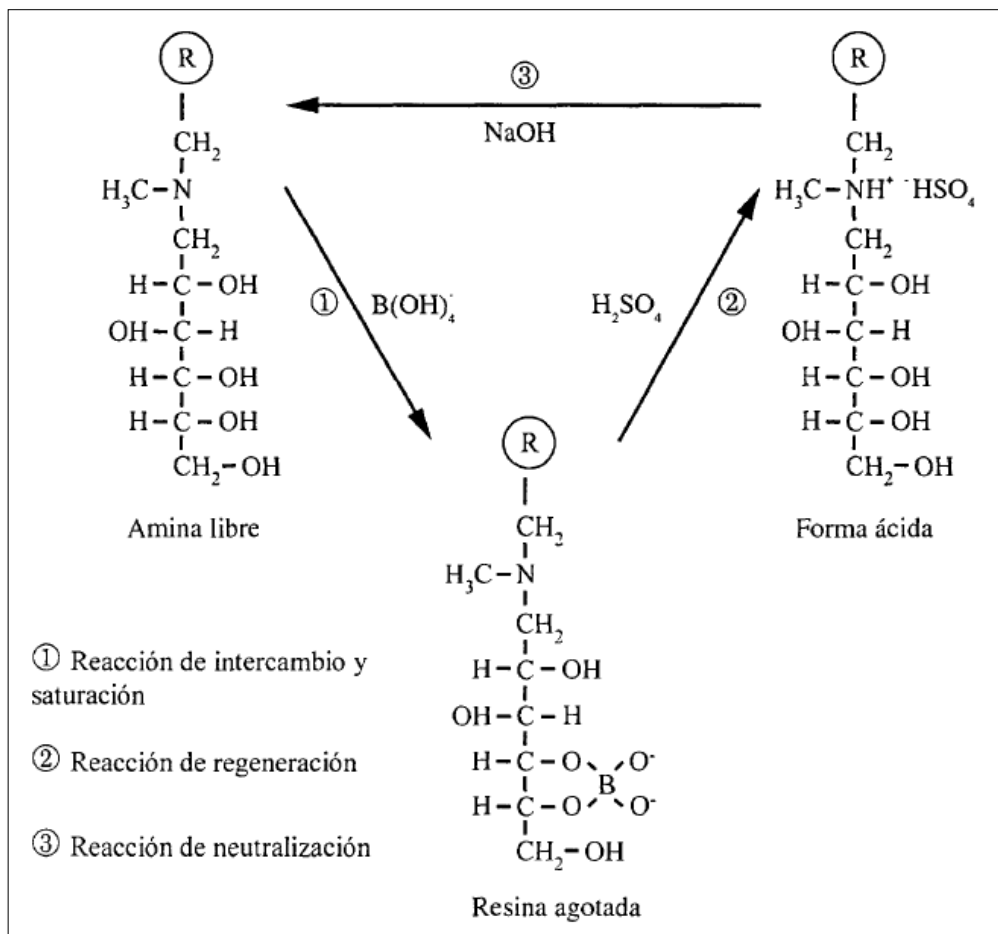


Figura 10. Esquema de regeneración de la resina Amberlite IRA-743

Fuente: (García, 2000)

2.2.4. Adsorción

La adsorción consiste en la transferencia de un material desde la fase fluida hasta una superficie sólida, en la cual se enlazan mediante fuerzas intermoleculares, también se aprovechan las cualidades de ciertos sólidos, que tienen la capacidad de fijar un determinado elemento o sustancia en la capa superior laminar de el mismo; gracias a estas características se logra separar diferentes componentes unos de otros, en soluciones líquidas, sólidas o gaseosas; el intercambio iónico es una operación importante realizada principalmente entre sólido – líquido, permite el intercambio de iones específicos en ciertos sólidos, también poseen un intercambio reversible (regenerativo) (Treybal, 1988).

A. La onda de adsorción

Considerando una solución binaria (líquido – gas), en la cual se encuentra una concentración de soluto inicial C_0 ; esta sustancia a traviesa constantemente una columna con un lecho parcialmente profundo, en el cual está libre de adsorbato inicialmente. En el sólido, la película de la superficie superior al inicio (a) adsorbe al soluto rápidamente y el efluente se encuentra libre de soluto, como se observa en la Figura 11 para c_a , la capa superior del lecho prácticamente saturada. Entretanto la zona de adsorción se traslada

hacia la parte inferior de la columna, manteniendo el flujo continuo de la solución, con una rapidez usualmente mucho menor que la velocidad lineal entre el lecho y el fluido. La mitad del lecho posterior a un determinado tiempo, se encuentra saturada de soluto (b, como se ve en la figura 11), no obstante, para C_b la concentración es casi nula. Se dice que se ha alcanzado el “punto de ruptura”, conforme en la figura 11 parte (c), cuando indica que alcanzó el fondo la zona de adsorción y se encuentra incrementando bruscamente la concentración del soluto hasta un valor de c_c . Posterior a ello el efluente se incrementa rápidamente debido a la concentración del soluto, en la figura 11 en (d), se logra obtener un valor final c_0 . La “curva de ruptura” se observa en el intervalo del posicionamiento entre (c) y (d); finalmente el equilibrio se mantiene constante con la solución de alimentación para todo el lecho (Treybal, 1988).

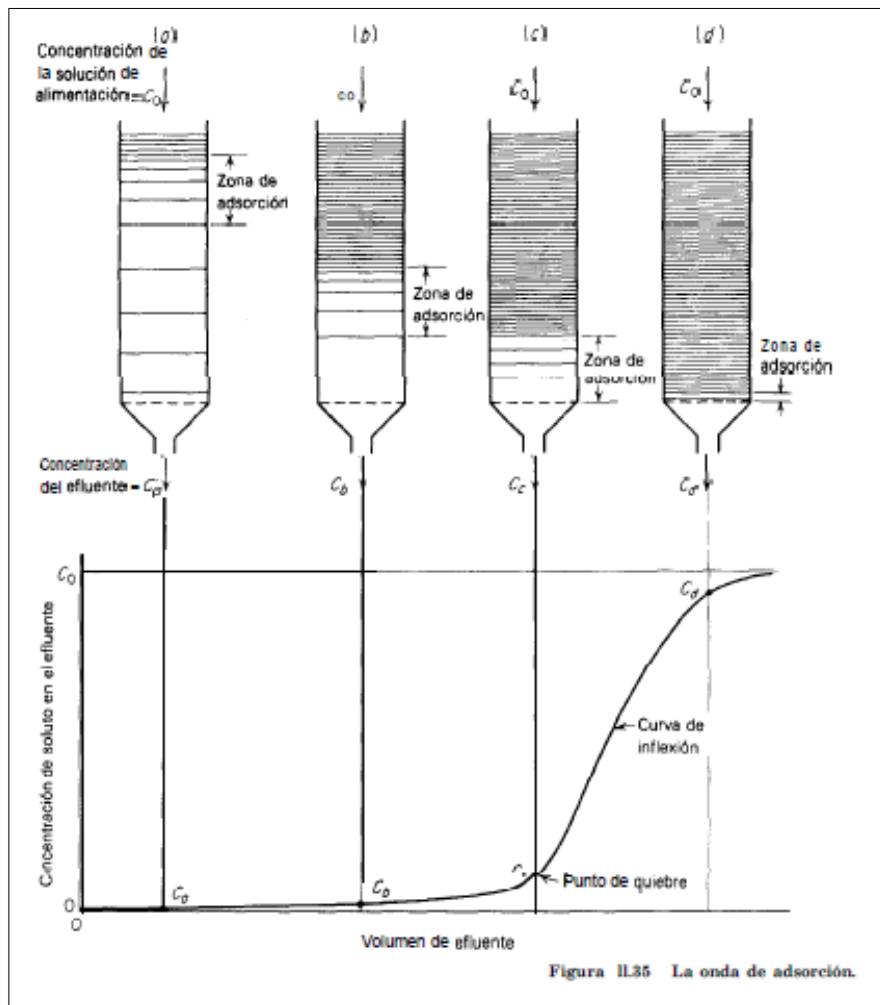


Figura 11. Onda de Adsorción

Fuente: (Treybal, 1988)

La formación de las curvas de ruptura o avance, se observan generalmente en una apariencia en forma de S; el tiempo y la formación de la curva de ruptura o avance influyen sobre el método de operación utilizados (lecho fijo). Sin embargo, la apariencia de esta curva puede ser distorsionada, plana o presentar una pendiente

elevada. Para un caso en el cual la rapidez de adsorción sea infinitamente rápida, se observaría una tendencia lineal de la curva de avance. Algunos factores que determinan la forma de la curva son la velocidad del fluido, el tipo de adsorción, la concentración de alimentación del soluto, la altura de lecho empacado (zona de adsorción) (Treybal, 1988).

El punto de ruptura se encuentra descrito en algunos casos, y otros no, por ejemplo, para lograr la disminución del tiempo de ruptura se debe, tener un mayor tamaño en las partículas, reducir la zona de adsorción del lecho, aumentar la concentración del soluto inicial y el flujo del fluido (Treybal, 1988).

B. Rapidez de adsorción en lechos fijos

En la figura 12, se observa la idealización de una curva de ruptura, se aprecia que, mediante la fluidización de un disolvente gaseoso por medio de un lecho adsorbente, a un flujo de su área por G_s kg/s; para ello la concentración del soluto inicial (Y_0) del disolvente gaseoso. Se tiene que para cualquier situación el efluente del soluto es ω masa/área de sección transversal del lecho. Al tener una curva de avance elevada, se observa un incremento rápido de la concentración de soluto del efluente hasta la concentración del gas

del entrante. Aleatoriamente para la concentración en el punto de ruptura se elige un valor de Y_B ; se estima que la saturación del adsorbente se da al aumentar la concentración del efluente, escogiendo aleatoriamente el valor e , de Y_E semejante a Y_0 . Se tiene que ω_B refleja en el punto de ruptura la cantidad del efluente y el comportamiento de la curva por medio de ω_B y ω_E . Teniendo en cuenta la presencia de la curva de ruptura, el total del efluente retenido se expresa por $\omega_a = \omega_E - \omega_B$. Se denomina Z_a , a la altura constante de la zona de adsorción, en este punto en cualquier instante cambia la concentración de Y_B a Y_E (Treybal, 1988).

Treybal (1988), indica, para tiempo de movimiento requerido de la zona de adsorción a su propia altura (el valor de θ_a), de manera descendente por el tramo de la columna, posterior al establecimiento de la zona de adsorción.

Entonces

$$\theta_a = \frac{W_a}{G_s} \quad [6]$$

Donde G_s es la velocidad de masa del gas no adsorbido, basada en la sección transversal.

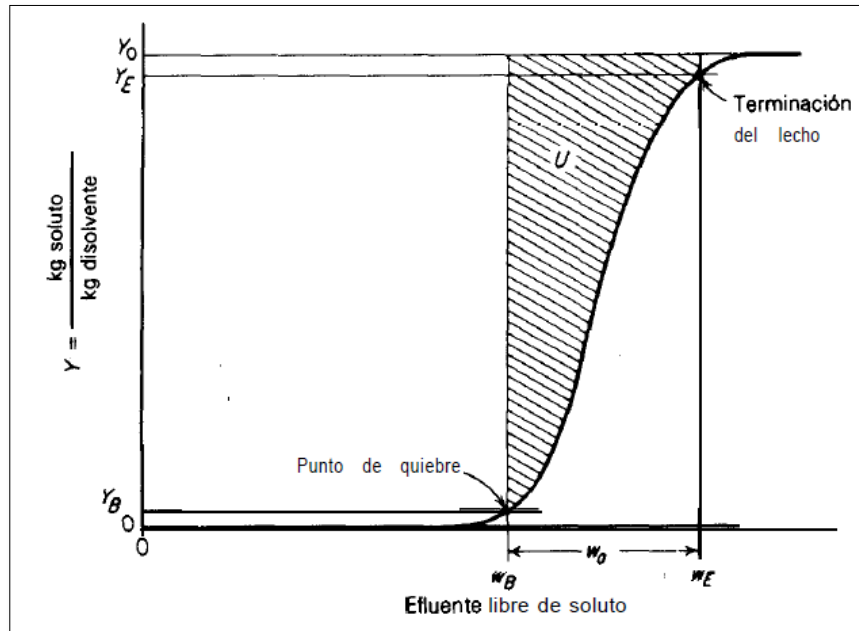


Figura 12. Curva de ruptura idealizada

Fuente: (Treybal, 1988)

Sea θ_E , el tiempo requerido para lograr el agotamiento del lecho.

Entonces

$$\theta_E = \frac{W_E}{G_s} \quad [7]$$

Para un valor de Z de la altura del lecho adsorbente y para un valor θ_F del periodo necesario para la formación de la zona de adsorción, la altura de la zona de adsorción viene dada por:

$$Z_a = Z \frac{\theta_a}{\theta_E - \theta_F} \quad [8]$$

En el área sombreada de la figura 12, se simboliza el valor de U (masa del soluto/ área de la sección transversal del lecho) para separación del gas del soluto en la zona de adsorción desde el punto de ruptura hasta el de agotamiento (Treybal, 1988).

$$U = \int_{w_B}^{w_E} (Y_0 - Y) dw \quad [9]$$

No obstante, si la saturación del adsorbente en la zona estuviese dada con soluto, se tendría $Y_0 w_a$.

$$Y_0 w_a [=] \frac{\text{masa soluto}}{\text{masa disolvente}} \times \frac{\text{masa disolvente}}{\text{área sección transversal del lecho}}$$

Por consiguiente, si el adsorbente presente un poder fraccionario en la zona de adsorción, esto es debido a que la zona todavía se encuentra adentro de la columna, por lo tanto, el punto de ruptura es: (Treybal, 1988).

$$f = \frac{U}{Y_0 w_a} = \frac{\int_{w_B}^{w_E} (Y_0 - Y) dw}{Y_0 w_a} \quad [10]$$

Para un valor de $f = 0$, se tiene básicamente la saturación del adsorbente en la zona, para un valor de θ_F indica el periodo de aparición en la parte superior de la zona del lecho, para un valor de θ_a se realizará en el mismo periodo en el cual la zona viaja a una distancia similar a su propia altura.

Para un valor de $f = 1$, se indica que en la zona el sólido no presenta adsorbato, el periodo de aparición de la zona será muy breve (cero) (Treybal, 1988). Se expresa mediante:

$$\theta_F = (1-f)\theta_a \quad [11]$$

De [2.11]: $\theta_E - \theta_F = \theta_E - (1-f)\theta_a$ y reemplazando en [8]:

$$Z_a = Z (\theta_a) / (\theta_E - \theta_F)$$

$$Z_a = Z \frac{\theta_a}{\theta_E - (1-f)\theta_a} = Z \frac{w_a}{w_E - (1-f)w_a} \text{ puesto que: } w \propto \theta \quad [12]$$

La columna de adsorción, de altura Z y área de sección transversal unitaria, contiene una masa: $Z (1) \rho_s [=] \text{ m}^3 \cdot \text{kg adsorbente} / \text{m}^3$, de adsorbente, en la cual la densidad aparente empacada del sólido se define por ρ_s . Suponiendo el equilibrio de esta masa de sólido con el gas entrante, se tendría totalmente saturado una concentración de adsorbato X_T masa de adsorbato/masa sólido adsorbente, la masa del adsorbato sería $Z\rho_s X_T$. La saturación en el fondo de la columna $Z - Z_a$, para el punto de ruptura la zona de adsorción se da por la altura Z_a . Es por ello que el soluto adsorbido en el punto de ruptura es: $(Z - Z_a)\rho_s X_T + Z_a \rho_s (1-f) X_T$.

La saturación fraccionaria en el punto de ruptura, es:

Grado de Saturación:

$$GS = \frac{(Z - Z_a)\rho_s X_T + Z_a \rho_s (1 - f) X_T}{Z \rho_s X_T} = \frac{Z - f Z_a}{Z} \quad [13]$$

C. Equilibrio de adsorción

La adsorción positiva en un sistema sólido-líquido se produce al separar el soluto de la solución y su concentración en la superficie sólida hasta que se mantiene un equilibrio dinámico entre la concentración de soluto en la superficie y el soluto que queda en la solución. La concentración de soluto en la superficie de un sólido. En el estado de equilibrio, existe una cierta distribución de solutos entre las fases líquida y sólida. La relación de distribución es una medida de la posición de equilibrio en el proceso de adsorción y puede ser una función de la concentración de soluto y la naturaleza del soluto competidor (Weber, 1979).

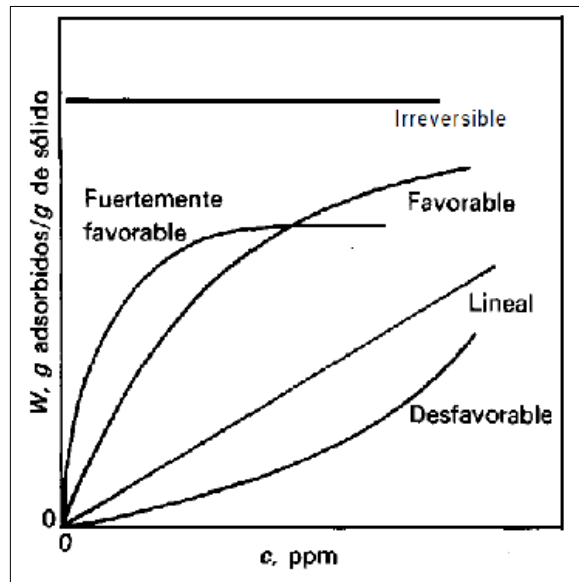


Figura 13. Tipos de Isotermas de adsorción.

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 1993)

El método preferido para expresar esta distribución es expresar la relación entre la cantidad de q_e y C a una temperatura fija; q_e es la cantidad de soluto adsorbido por el adsorbente sólido por unidad de peso, y C es la concentración de soluto que se encuentra en la solución en un estado de equilibrio. Este tipo de expresión se denomina isoterma de adsorción, que es función del cambio en la concentración del soluto en la masa principal de la solución a temperatura constante. Generalmente, la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente aumenta con el aumento de concentración, pero es una relación lineal. (Weber, 1979)

D. Isotermas de Adsorción

i. Ecuaciones de Langmuir y Bet

El modelo de adsorción de Langmuir es eficaz para la adsorción de una sola capa, mientras que el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET) representa una isoterma que refleja la adsorción aparente de múltiples capas. Ambas ecuaciones están limitadas por el supuesto de que la energía de adsorción se distribuye uniformemente en la superficie. (Weber, 1979)

Gráficamente, la isoterma de Langmuir tiene la forma que se muestra en la Figura 14a, y la isoterma BET más común se muestra en la Figura 14b; en ambas figuras, a una temperatura dada, se simboliza con C_s . Cuando el límite de adsorción es de una sola capa, la isoterma BET (isoterma generalmente usado) se simplifica al modelo de Langmuir (Weber, 1979).

Las isotermas de Langmuir y BET pueden derivarse de consideraciones cinéticas o termodinámicas de adsorción. Aunque las suposiciones cinéticas no son tan buenas como la cinética, la derivación termodinámica es un poco más complicada porque se hacen menos suposiciones (según el mecanismo propuesto, las dos velocidades de reacción son iguales) (Weber, 1979).

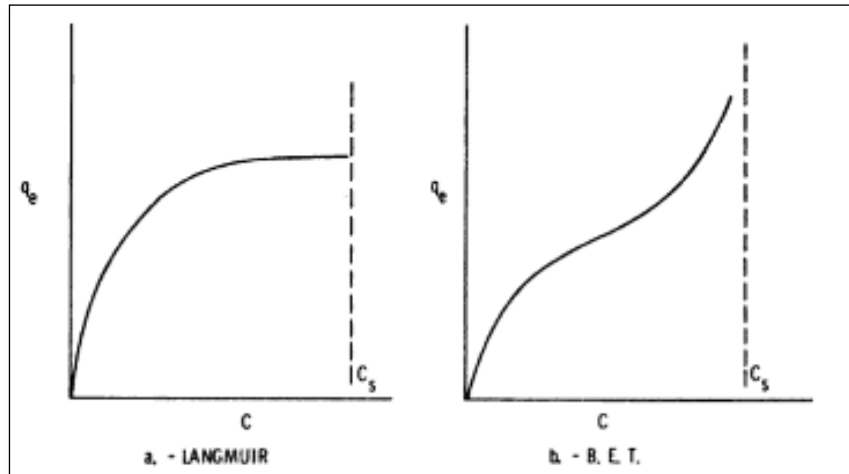


Figura 14. Isothermas típicas para los modelos de adsorción de Langmuir y BET.

Fuente: (Weber, 1979)

La ecuación de Langmuir se basa en consideraciones cinéticas y se utiliza para describir la adsorción de gases en sólidos. Esta ecuación se deriva para sistemas líquido / sólido. El modelo se basa en tres supuestos: la adsorción ocurre en una sola capa de adsorbente; la adsorción ocurre en una sola capa de adsorbente. La energía de adsorción se distribuye uniformemente en toda la superficie del adsorbente y no hay interacción lateral entre las moléculas adsorbidas. (Tapia, 2002).

$$q = \frac{q_{\max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad [14]$$

Donde:

q_{\max} = es la máxima capacidad de adsorción bajo las condiciones dadas.

b = es el coeficiente relativo de afinidad entre el sorbato y el sorbente.

Puede ser linealizada graficando $1/q$ vs $1/C_{eq}$ en la ecuación:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{bq_{\max}} + \frac{1}{bq_{\max}}(1/C_{eq}) \quad [15]$$

o (C_{eq}/q) vs C_{eq} en la ecuación:

$$\frac{C_{eq}}{q} = \frac{1}{bq_{\max}} + \frac{1}{bq_{\max}}(C_{eq}) \quad [16]$$

ii. Ecuación de Freundlich

Otro modelo de isoterma de adsorción es la ecuación de Freundlich o Van Bemmelen, que se ha utilizado ampliamente durante muchos años. Esta ecuación es un caso especial de energía superficial heterogénea, en el que el término energético b, de la ecuación de Langmuir cambia con el cambio de la superficie recubierta, estrictamente debido al cambio del calor de adsorción. (Weber, 1979)

La ecuación de Freundlich general.

$$q_e = K_F C^{1/n} \quad [17]$$

En donde K_F y n son constantes y $n > 1$ ($K_F \propto RTnbe^{\Delta H/RT}$)

La ecuación de Freundlich es básicamente empírica, pero es una herramienta útil para describir datos. Los datos generalmente se ajustan a la forma logarítmica de la ecuación. (Weber, 1979):

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C) \quad [18]$$

Las constantes K_F y $1/n$ corresponden al intercepto y la pendiente, respectivamente. Representando se en una línea recta con pendiente $1/n$ y ordenada en el origen igual al valor de K_F para $C = 1$ ($\log C = 0$) (Weber, 1979).

E. La capacidad de operación

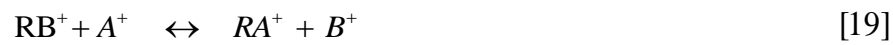
Es una medida de las propiedades útiles que puede obtener un material de intercambio iónico cuando opera en condiciones específicas. Está determinada por la capacidad total de la resina, el nivel de regeneración, la composición de la solución de tratamiento, el caudal a través de la columna cromatográfica, la temperatura, el tamaño de partícula y otros factores. (Weber, 1979).

Capacidad = n° iones intercambiables /unidad de masa de la resina

$$\left(\frac{meq}{l} \right) \text{ o } \left(\frac{keq}{m^3} \right)$$

F. Equilibrio iónico

Rousseau (1987), indica que las reacciones de intercambio iónico son reversibles, lavando la resina con electrolitos en exceso, la resina puede convertirse en el modo deseada de sal.



La constante de equilibrio viene dada por:

$$K = \frac{[RA^+][B^+]}{[RB^+][A^+]} \quad [20]$$

Donde $[A^+]$ y $[B^+]$ son las concentraciones de los iones A y B en la disolución y $[RA^+]$ y $[RB^+]$ las de los iones A y B en la resina.

Puesto que la solución y el sólido permanecen eléctricamente neutros durante el proceso de intercambio se puede escribir:

$$K = \frac{q}{q_0 - q} \frac{C_0 - C^*}{C^*}$$

[21]

Siendo

C_0 = Concentraciones inicial de A^+ en la solución

C^* = Concentración de A^+ en la solución en el equilibrio con la concentración de A en la resina.

q_0 = Concentración de A en la resina en el equilibrio

q = concentración de A en la resina si todo el A^+ se reemplazase al B^+

2.2.5. Diseño de un adsorbedor de lecho fijo

Los siguientes criterios se utilizan para calcular la altura del área de intercambio. Estándar de diseño para la altura del área de intercambio.

Geankoplis (1998) señaló que, como se muestra en la Figura 15a, la máxima adsorción ocurre dentro de un segundo cualquiera de un área relativamente estrecha de adsorción o transferencia de masa. A medida que el sustituto continúa fluyendo, la parte de transferencia de masa en forma de S descende de la columna cromatográfica.

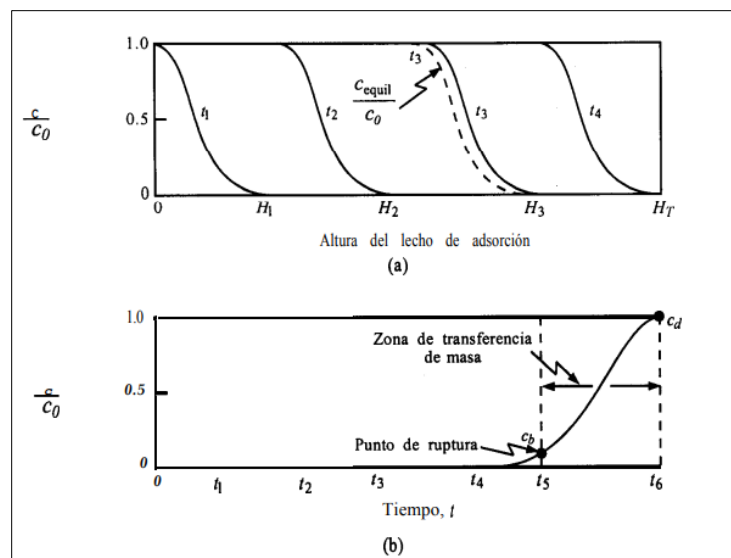


Figura 15. Perfiles de concentración para la adsorción en un lecho fijo.

Fuente: (Geankoplis, 1998)

Durante el tiempo t_3 en la Figura 15a, cuando casi la mitad del lecho está saturado con soluto, la concentración de salida permanece aproximadamente cero, como se muestra en la Figura 15b. Esta concentración de salida permanece casi cero hasta que la zona de transferencia de masa comienza a alcanzar la salida de la torre en el tiempo t_4 , luego la concentración de salida comienza a aumentar y alcanza C_b en t_5 , lo que se denomina ruptura puntual (Geankoplis, 1998).

Después de alcanzar el punto de ruptura, la concentración C se eleva rápidamente al punto C_d , que es el final de la curva de avance, momento en el que el lecho pierde su eficacia. La concentración del punto de ruptura es el valor máximo que puede eliminarse. Para C_b / C_q , generalmente es 0.01-0.05. Se considera que el valor de C_d / C_o es el punto en el que C_d es aproximadamente igual a C_o . En la región de transferencia de masa estrecha, la curva hacia adelante es muy empinada y la mayor parte de la capacidad del lecho se ha utilizado para el punto de separación. Esto permite un uso eficiente del adsorbente y reduce los costos de energía para la regeneración. (Geankoplis, 1998).

A. Capacidad de la columna y el método de diseño para su aumento de escala

El ancho y la forma de la zona de transferencia de masa dependen de la isoterma de adsorción, la tasa de flujo, la tasa de transferencia de masa de las partículas y la difusión en los poros. Se han publicado varios métodos teóricos para predecir la zona de transferencia de masa y la distribución de la concentración en el lecho. Debido a las muchas incertidumbres causadas por los patrones de flujo y las correlaciones, los resultados de la predicción pueden ser inexactos, lo que hace imposible predecir la difusión y transferencia de más fluidos. (Geankoplis, 1998).

Por lo tanto, se requieren experimentos a escala de laboratorio para confirmar los resultados. Se puede ver que cuando todo el lecho alcanza el equilibrio durante la alimentación, la capacidad total o estequiometría de la torre de lecho empacado es proporcional al área entre la curva y la línea recta con $C / C_o = 1.0$, como se muestra en la figura siguiente. (Geankoplis, 1998).

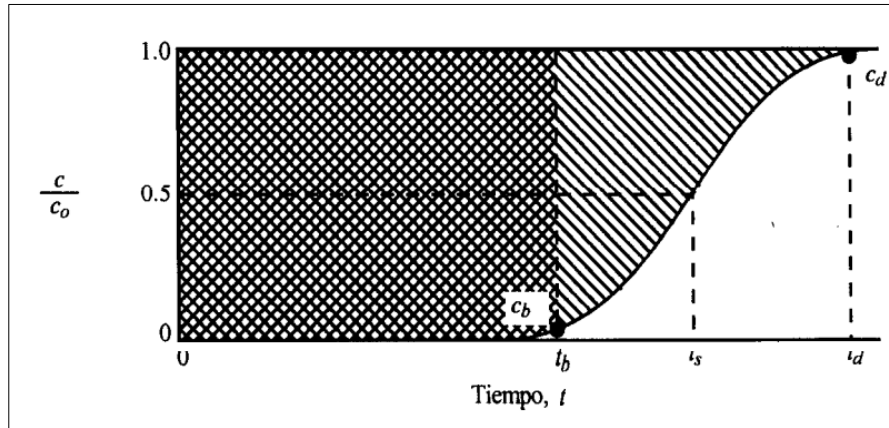


Figura 16. Determinación de la capacidad de una columna a partir de la curva de avance

Fuente: (Geankoplis, 1998)

El área total sombreada representa la capacidad total estequiométrica del lecho como sigue:

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad [22]$$

Donde:

t_t : es el tiempo igual a la capacidad total o capacidad estequiométrica.

La capacidad útil total de la cama hasta el momento del punto de ruptura T_b , es el área cuadrada.

$$t_t = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad [23]$$

Donde:

t_u : es el tiempo igual a la capacidad disponible o el tiempo para que la concentración de aguas residuales alcance su nivel máximo permitido.

El valor de t_u suele estar muy cerca del valor de t_b , y la relación de t_u / t_t es la fracción de la capacidad o longitud total del lecho hasta el punto de ruptura. Entonces, para la longitud de la cama de HT.

$$H_B = \frac{t_u}{t_t} H_T \quad [24]$$

Donde:

H_B : es la longitud del lecho utilizada hasta el punto de ruptura

H_T : longitud total del lecho

Luego se multiplica la longitud del lecho no utilizado H_{UNB} por la fracción no utilizada por la longitud total.

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_T \quad [25]$$

H_{UNB} , representa la parte o área de transferencia de masa, depende de la velocidad del fluido y es básicamente independiente de la longitud total de la columna cromatográfica. Esta es la razón por la que el valor H_{UNB} se puede medir a la velocidad diseñada en una columna de laboratorio de pequeño diámetro equipada con el adsorbente requerido. Luego, simplemente calculando primero la longitud del lecho requerida para alcanzar la capacidad disponible H_B requerida para alcanzar el punto de ruptura, se puede diseñar un lecho de adsorción a gran escala. El valor de H_B es proporcional a t_b .

Por lo tanto, la longitud de la sección de transferencia de masa H_{UNB} solo se suma a la longitud H_B requerida para obtener la longitud total H_T (Geankoplis, 1998).

$$H_T = H_{UNB} + H_B \quad [26]$$

B. Longitud de lecho no utilizado

Para un sistema con una buena isoterma, la curva de concentración en la zona de transferencia de masa pronto mostrará una forma y un ancho característicos, y no cambiará al pasar por el lecho. Por lo tanto, las pruebas que utilizan diferentes longitudes de lecho dan una curva de ruptura de la misma manera, pero en lechos más largos, la zona de transferencia de masa ocupa una proporción menor, por lo que se utiliza una proporción de lecho mayor. En el punto de ruptura, los sólidos entre la entrada del lecho y el comienzo de la zona de transferencia de masa están completamente saturados (equilibrados con la alimentación). (McCabe, 2001).

En la zona de transferencia de masa, el sólido cambia de casi saturado a casi libre de adsorbatos y se puede suponer aproximadamente la mitad de la saturación. Esto equivale a saturar completamente la mitad de los sólidos en la zona de transferencia de masa, mientras que la otra mitad no se usa. La razón del

escalamiento es que el número de sólidos no utilizados o la longitud del lecho no utilizado no cambia con la longitud total del lecho. (McCabe, 2001).

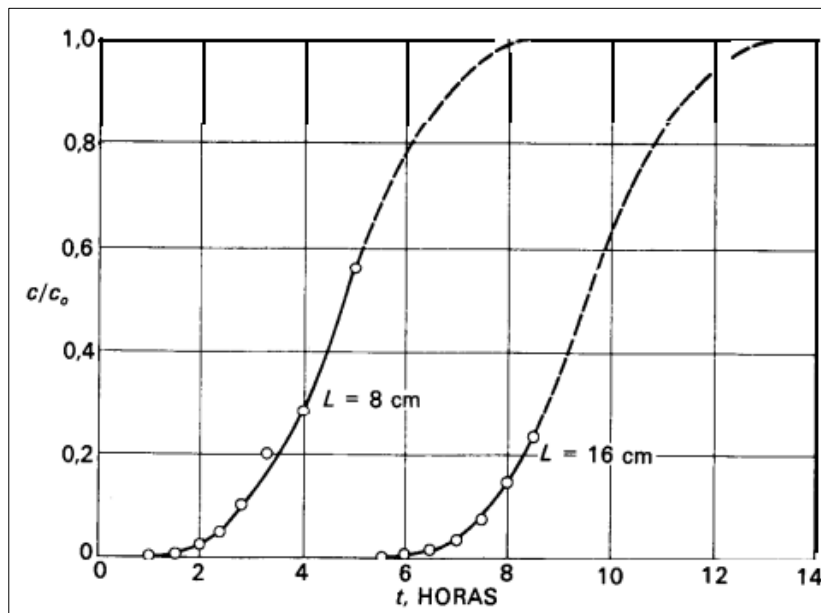


Figura 17. Curvas de avance con diferentes alturas de lecho

Fuente: (McCabe, 2001)

2.2.6. Pérdida de carga, fluidificación y expansión del lecho durante el lavado

Según Weber (1979), para el diseño de columnas de intercambio iónico, se plantean las siguientes dos preguntas: ¿Cuál es la caída de presión a lo largo del lecho fluidizado, el lecho, o para alcanzar el grado de expansión deseado?

Con respecto a la primera pregunta, a medida que aumenta el flujo de lavado, la caída de presión aumenta linealmente hasta que ocurre algún movimiento o reorientación de las partículas. Para caudales ligeramente más altos, el lecho se fluidiza y la caída de presión permanece constante, para caudales más altos, independientemente del porcentaje de expansión del lecho. La caída de presión ejercida por el agua de lavado sobre el medio se equilibra con una gravedad constante. Por lo tanto, el aumento de flujo solo expandirá el lecho hasta que la velocidad del vacío se reduzca para mantener la misma fricción y la caída de presión siga siendo la misma. La caída de presión es igual al peso del medio filtrante (Weber, 1979).

$$\Delta P = D(1 - \varepsilon)(G_{s,m} - G_{s,w}) \quad [27]$$

Donde:

ΔP : caída de presión a lo largo del lecho fluidizado, m de agua.

D: altura de lecho no expandido, m

ε : Porosidad del lecho no expandido, m

$G_{s,m}$: peso específico del medio de intercambio, g/cm^3

$G_{s,w}$: peso específico del agua, g/cm^3

Weber (1979), dio una respuesta parcial a la segunda pregunta, indicando que ha desarrollado un método razonable para

predecir la expansión del lecho de resina de tamizado. Los únicos datos requeridos para utilizar este modelo son: densidad de resina y viscosidad del agua de lavado, lecho no expandido porosidad, tamaño efectivo de la resina y coeficiente de uniformidad de la resina. Calculó la velocidad mínima de fluidización v_f de acuerdo con la ecuación empírica homogénea.

$$v_f = \frac{0,6198(d_{60\%})^{1,82} [\omega_s (\omega_m - \omega_s)]^{0,94}}{\mu^{0,88}} \quad [28]$$

Donde:

$d_{60\%}$: Abertura del tamiz que deja pasar el 60 % de la resina, mm
(Tamaño efectivo x coeficiente de uniformidad).

ω_m : peso específico de la resina, g/cm³.

ω_s : peso específico del agua, g/cm³.

μ : viscosidad del agua, centipoise.

El número de Reynolds adimensional

$$Re_f = \frac{\rho_l v_f d_{60\%}}{\mu} \quad [29]$$

Weber (1979), indica las siguientes recomendaciones para los cálculos del diseño; correspondiente a una velocidad de fluidización mínima y a la altura de tamiz antes mencionada, se puede calcular, si

el número de Re_f es mayor a 10, el valor de v_f debe multiplicarse por un factor de corrección K_R .

$$K_R = 1,775 Re_f^{-0,272} \quad [30]$$

La velocidad de decantación no frenada, v_s , de la partícula promedio hipotética se calcula, entonces, a partir de la siguiente expresión.

$$v_s = 8,45 v_f \quad [31]$$

El número de Reynolds para esta partícula, basado en una decantación no-frenada.

$$Re_o = \frac{\rho_1 v_f d_{60\%}}{\mu} \quad [32]$$

Se utiliza entonces para calcular el coeficiente de expansión, n_e , definido por:

$$n_e = 4,45 Re_o^{-0,1} \quad [33]$$

El valor de n_e se utiliza en la ecuación [34] para encontrar el valor de la constante K_e del sistema particular, si se conocen los valores de la velocidad y porosidad para la velocidad de fluidización

mínima v_f , ecuación
$$\left(v_f = \frac{0,6198(d_{60\%})^{1,82} [\omega_s (\omega_m - \omega_s)]^{0,94}}{\mu^{0,88}} \right) \text{ y } \varepsilon$$

(porosidad del lecho no expandido), obtenemos: (Weber, 1979)

$$v = K_e (\varepsilon)^{n_e} \quad [34]$$

Donde:

v : Velocidad de flujo superficial del agua por encima de la resina.

ε : Porosidad del lecho no expandido.

La ecuación para n_e es válida para $1 < Re_o < 500$ y cuando la relación del diámetro de la partícula y la columna de fluidización es despreciable. Estas condiciones se aplican generalmente durante el lavado de la columna de intercambio (Weber, 1979).

La altura de lecho expandido se calcula a partir de:

$$\frac{D_e}{D} = \frac{(1 - \varepsilon)}{(1 - \bar{\varepsilon})} \quad [35]$$

Donde:

D : altura del lecho expandido, m.

D_e : Altura de lecho expandido, m.

2.2.7. Pérdida de carga en el lecho de intercambio al inicio del proceso de intercambio

Bonnet (2001), utiliza la ecuación de Carmen Kozeny para el cálculo de pérdida de carga.

$$\frac{h}{L} = \frac{150v(1 - \varepsilon)^2 V}{g \varepsilon_o^3 C_e^2} \sum \frac{x_i}{D_i^2} \quad [36]$$

Donde:

h: pérdida de carga total, m.

L: espesor del medio filtrante, m.

v: Viscosidad cinemática del agua, m^2/s .

g: aceleración de la gravedad, m/s^2 .

ϵ_0 : porosidad media del medio filtrante limpio.

V: velocidad de aproximación, m/s.

C_e : coeficiente de esfericidad, adimensional.

x_i : fracción en peso, del material granular retenido entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica.

D_i : tamaño promedio geométrico de las aberturas de las mallas j y k, m.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Boro

El boro es un no metal ligero con un número atómico de 5, inodoro e insípido, insoluble en agua, alcohol y soluciones alcalinas; es soluble en ácido nítrico y ácido sulfúrico. El boro no se ve afectado por el aire a temperatura ambiente, pero no es afectados por él a altas temperaturas (Hermanek, 1992); por otro lado, el boro suele tener tendencia a acumularse en los tejidos animales y

vegetales, lo que representa un riesgo potencial para la salud de las personas que ingieren alimentos con alto contenido de boro. (Keren & Bingham, 1985).

2.3.2. Adsorción

En la interfaz del sistema, la concentración de la sustancia en la superficie (ya sea líquida o gaseosa) es mayor que la concentración en el volumen total. Este fenómeno se llama adsorción, y la sustancia en la que ocurre este fenómeno (ya sea líquida o gaseosa) se llama adsorbente. La adsorción contiene varios fenómenos, el más importante de los cuales es la absorción y la adsorción. La adsorción es la etapa de eliminación de impurezas (líquido, gas, materia en suspensión, coloide, molécula, átomo e iones disueltos) (la interfaz entre los dos) en la superficie del adsorbente (incluidos los poros o la superficie interna) mediante la adhesión. Para las plantas potabilizadoras, este proceso es muy necesario e indispensable. (Ponce, 2005).

2.3.3. Intercambio iónico

La operación de intercambio iónico es básicamente una reacción de sustitución química entre el electrolito en la solución y el electrolito insoluble en contacto con la solución.

El mecanismo de estas reacciones y la tecnología utilizada para lograr estas reacciones son muy similares a la adsorción, por lo que para la mayoría de los propósitos de ingeniería, el intercambio iónico puede considerarse simplemente como un caso especial de adsorción. (Treybal, 1988).

2.3.4. Resina de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos sólidos e insolubles en agua, que aparecen en forma de esferas o perlas con un tamaño efectivo de 0,3 a 1,2 mm. (Harris, 2007).

Capítulo III

Marco Metodológico

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Para definir dónde se ubica el tipo de investigación, se clasificó según el tipo de diseño.

- Es prospectivo.
- Es transversal.
- Es experimental.

El trabajo de investigación actual se basa en pruebas experimentales, en las que existe una relación causal. Se analiza el efecto de controlar un factor (caudal de alimentación) sobre el factor de respuesta (tiempo y concentración final de boro) y se mantienen constantes diferentes parámetros. Utilice diferentes métodos para obtener la curva de equilibrio y la curva de avance.

3.2. Población y muestra



Figura 18. Ubicación del punto de muestreo

Fuente: Google earth Pro 2019

Se tomó muestras representativas de la salida del filtro de la Planta de Tratamiento de agua Potable del distrito de Ite, Provincia Jorge Basadre, Tacna, cuya ubicación es UTM WGS 84 Zona 19 291849 E y 8024164 S. Se considera tomar el agua de la salida del filtro debido a que la turbiedad pueda saturar a los poros de la resina y dañarla; manteniendo una turbiedad a la salida del filtro por debajo de los 5 NTU.

La recolección de muestras para el presente trabajo se realizó en temporada sin precipitación fluvial (agosto a noviembre), ya que debido a esta precipitación varían sus características fisicoquímicas, y existe una dilución de parámetro a remover; la recolección de muestras se realizó de manera aleatoria, siguiendo el protocolo establecido en la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, "Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales".

3.3. Operacionalización de variables

Para la demostración y comprobación de la hipótesis formulada, se manipulan las variables independientes (VI), y es así como a través de la relación causa – efecto, se evaluaron las variables dependientes (VD).

Se tienen diferentes variables y parámetros constantes para las diferentes hipótesis.

Curva de Equilibrio

Tabla 7

Operacionalización de variables para la curva de equilibrio

Variables	Dimensión	Indicador
Remoción de Boro (VD)	Concentración final de Boro	Análisis de Boro (mg/L)
Boro inicial (VI)	Concentración inicial de Boro	Análisis de Boro (mg/L)

Fuente: Elaboración propia.

Para estas variables se mantienen constantes los siguientes parámetros:

- pH de la muestra de agua.
- Turbiedad, de la muestra de agua.
- 1 gramo de resina Amberlite IRA 743
- Temperatura constante de ambiente.
- Volumen de agua constante para todas las muestras, 500 ml.

Curva de Avance

Tabla 8

Operacionalización de variables para la curva de avance

Variab les	Dimensión	Indicador
Remoción de Boro (VD)	Concentración final de Boro	Análisis de Boro (mg/L)
Caudal de entrada (VI)	Cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en determinado sistema	Bomba peristáltica, (ml/min)

Fuente: Elaboración propia.

- Para estas variables se mantienen los siguientes parámetros constantes:
- pH de la muestra de agua.
- Turbiedad, de la muestra de agua.
- 15 gramos de resina Amberlite IRA 743
- Temperatura constante de ambiente.

3.4. Técnicas e instrumento para recolección de datos

La recolección de las muestras de agua se realiza de manera aleatoria, teniendo en cuenta los siguientes instrumentos, materiales, reactivos y técnicas de recolección y análisis.

3.4.1. Instrumentos, equipos, materiales y reactivos

A. Equipos e instrumentos

- 01 pH metro de PH-2 pH-metro portátil marca HANNA.

- 01 balanza analítica AS 60/220.R2
- 01 turbidímetro Hach 2 100p (2 100Q portable, rango 0-1 000 NTU).
- 01 espectrofotómetro UV-visible doble haz. Marca Thermo Scientific, modelo Genesys 10S.
- 01 bomba peristáltica, Masterflex Peristaltic Pump, Electric, 1/2 Hp.
- 01 termómetro digital marca HANNA.
- 01 agitador magnético digital con calefacción 11 C.

B. Materiales

- 500 goteros de polipropileno (muestreador) de 10 ml
- 20 frascos de polipropileno de 70 ml.
- 20 frascos de polipropileno de 250 ml.
- 01 frasco de polipropileno de 1 L.
- 02 pipetas de polipropileno de 5 ml
- 02 pipetas de polipropileno de 1 ml.
- 01 bidón muestreador de 7 galones.
- 01 Cooler.
- 12 vasos precipitados de 100 ml
- 06 vasos precipitados de 250 ml.
- 01 vaso precipitado de 1 L

- 01 embudo de vidrio
- 01 bagueta
- 01 fiola de 50 ml
- 01 fiola de 1000 ml.
- 03 pro pipetas.
- 01 tubo de vidrio de 30 cm de largo con 2,5 cm de diámetro.
- 01 manguera de plástico transparente, 7 metros de largo, 1,5 cm de diámetro.
- 08 conectores de intravenosa (válvulas).
- 04 tapones de jebe acondicionado con entrada para un tubo de 2,5 cm de diámetro.
- 01 embudo de vidrio.
- 01 probeta de 50 ml.
- 01 probeta de 250 ml.

C. Reactivos

- 05 refrigerantes
- 500 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- 20 ml de ácido nítrico.
- 500 g de hidróxido de sodio.
- 750 g de resina Amberlite IRA 743.
- 1L de ácido acético.

- 500 g de acetato de amonio.
- 10 g de Azometina H.
- 500 g de ácido ascórbico
- 250 g de EDTA.
- 01 solución estándar de boro de 1000 mg/L.
- 30 L de agua destilada

3.4.2. Técnicas de recolección de datos

A. Determinación de Boro en el agua – Método de espectrofotométrico de la Azometina H

- Para la metodología de la determinación de boro, se utilizó procedimiento establecido según Portocarrero (2018).

Procedimiento

i. Azometina – H 0,9 % en ácido ascórbico 2 %

- Se disolvió 0,9 g de Azometina – H y 2 g de ácido ascórbico en un vaso precipitado de 150 ml con 100 ml de agua destilada y se agitó hasta completar la disolución en un sistema de agitación magnética.
- Una vez disuelto se dispuso la solución en un frasco plástico y se guardó refrigerado y protegido de los rayos de luz, la duración de la solución es 15 días.

ii. Solución tampón pH 5,9

- Se disolvió 32 g de acetato de amonio y 1,9 g de EDTA en 125 ml de agua destilada.
- Se agregó ácido acético glacial y se mezcló hasta ajustar el pH a 5,9; finalmente, se colocó en un recipiente de plástico.

iii. Solución estándar de boro 10 mg/L

- A partir de una solución estándar de boro de 1000 mg/L, se preparó una solución estándar de 10 mg/L.
- Se diluyó 1,0 ml de la solución estándar de boro en una fiola de 100 ml y se enrasó agua destilada, seguidamente se colocó un envase de plástico.
- De la solución estándar se transfirió 0,5; 1; 2; 3 y 4 ml a fioles de 10 ml y se enrasó con agua destilada, finalmente, se colocó en envases de plástico.

iv. Curva de calibración

- Se tomó una alícuota de 2 ml de cada uno de los estándares de calibración medidos con pipeta volumétrica de polipropileno y se colocó en tubos de polipropileno, se preparó un blanco utilizando agua destilada.
- Se agregó 2,0 ml de la solución tampón medido con una pipeta volumétrica de polipropileno y se homogenizó.

- Se agregó 1,0 ml exactos de la solución de Azometina – H con una pipeta volumétrica de polipropileno y se homogenizó.
- Se dejó reposando por 30 minutos y posterior a ello se realizó la medición.
- Se determinó las absorbancias de las soluciones estándares y blanco en un espectrofotómetro UV/Visible a 420 nm de longitud de onda.

B. Caracterización del material de intercambio (resina)

Las técnicas de recogida de datos utilizadas en el trabajo son técnicas específicas para cada momento de investigación; Guevara (2006), indica la metodología para la caracterización de la resina, la cual se muestra a continuación.

i. Determinación de la densidad aparente

Procedimiento

- Se pesó cuidadosamente una muestra de 10 gramos.
- En una probeta de 25 ml se colocó la muestra y se llena con agua destilada, se agitó para retirar el aire que queda entre las partículas de la resina.
- Finalmente, se midió el volumen ocupado por la resina, y se realiza el mismo procedimiento para 15 y 20 gramos.
- La densidad será igual a:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [37]$$

ρ : Densidad aparente

m: peso de la resina

V: volumen ocupado por la resina

ii. Densidad verdadera o Absoluta

Procedimiento

- Se pesó 1 gramo de resina húmeda (la muestra se filtró para separar el agua).
- Se pesó cuidadosamente un tubo vacío, evitando el contacto con los dedos para no provocar errores en la medición.
- Seguidamente se colocó tapón de goma en la parte inferior y superior del tubo para evitar fugas de agua.
- Colocar la resina dentro del tubo y añadir agua destilada y pesar.
- La densidad absoluta será:

$$\rho_R = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{Volumen de la muestra}} \quad [38]$$

La secuencia de cálculo es la siguiente:

Peso del tubo vacío W_1

Peso del tubo + muestra + agua W_2

Peso de la muestra W_3

Densidad del agua W_4

Masa del agua ($W_2 - W_1 - W_3$) W_5

Masa de la muestra: ($W_1 - W_5$)

$V_R = V_a - V_b$ [39]

V_R : volumen del tubo

V_a : volumen de la muestra

V_b : volumen de agua (W_5 / W_4)

iii. **Determinación de la porosidad**

Procedimiento

- Se colocó 20 gramos de la resina en un tubo de vidrio de 30 cm de largo y 2,5 cm de diámetro, y se llenó hasta la mitad con agua destilada.
- Se agitó a fin de extraer el aire y que no queden burbujas, se llenó el tubo completamente y colocó un tapón de goma.
- Se rotó el tubo rápidamente en 180°.
- Cuando la resina sedimentó en el fondo del tubo, se volvió a rotar a 180° y se colocó en un soporte para poder marcar el borde superior de la resina.
- Se removió la resina y el agua del tubo.

- Se añadió agua hasta la marca que se hizo en el tubo y se midió el volumen en probeta.

- La porosidad en porcentaje es igual a:

$$P = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de la muestra}} \times 100$$

- El volumen de vacíos puede hallarse por diferencia entre el volumen medido en el cilindro graduado (volumen total) menos el volumen de la muestra (peso de la muestra, 50 gramos por su densidad).

- La secuencia de cálculo es la siguiente:

- Volumen total hasta la marca hecha en el tubo M_1

- Peso de la muestra M_2

- Densidad de la muestra (medido previamente) S

- Volumen de la muestra (M_2/S)

- Volumen de vacíos (M_1/M_3) M_4

$$\text{Porosidad} = \frac{M_4}{M_1} \times 100 \quad [40]$$

iv. **Determinación de la capacidad útil**

Procedimiento

- Se determinó la concentración de boro del agua muestreada, luego se colocó 500 ml de agua en una botella plástico.

- Se pesó 1 gramo de resina húmeda y se le añadió a la botella con agua.
- Después de un tiempo (24 horas), donde la resina ha intercambiado todo, se procedió a determinar la concentración de boro en la botella.
- La capacidad útil se calcula de la siguiente manera:
- Para 1 gramo de resina y 500 ml de agua.
- C_i : concentración inicial, meq de boro presentes en el agua.
- C_r : concentración residual, meq de boro presentes en el agua después de un tiempo determinado.
- $C_{\text{útil}}$: capacidad útil, meq de boro por gramo de resina.

$$C_{\text{útil}} = C_i - C_r \quad [41]$$

v. Determinación de la granulometría del lecho de intercambio

Procedimiento

- Se tomó una muestra representativa del material granular (10 gramos), la cual se pesó y se colocó en la serie de tamices seleccionados.
- Colocada la muestra, los tamices se someten a vibración intensa, para que el material se clasifique en ellos según su tamaño.

- Luego se extrajo el contenido retenido en cada uno de ellos y se pesó cuidadosamente. Se anotó el número de tamiz o zaranda, el tamaño de la abertura en nanómetros y su peso retenido por tamiz.
- Los resultados se expresan en términos de tamaño efectivo (TE) y coeficiente de uniformidad (CU).

$$CU = \frac{\text{Abertura de tamiz que deja pasar el 60\% (nm)}}{\text{Abertura de tamiz que deja pasar el 10\% (nm)}} \quad [42]$$

$$TE = \text{Apertura del tamiz que deja pasar el 10\% (nm)} \quad [43]$$

- Para calcular estos parámetros se acumula el peso retenido por el tamiz y luego se obtiene el peso pasado. Reste el peso retenido acumulado del peso de la muestra. A continuación, grafique la apertura del tamiz y el porcentaje del peso acumulado del material granular que lo atraviesa, obteniendo así la curva de distribución del material. En esta curva, se determinan CU y TE.

C. Resultados de la caracterización del material de intercambio (resina)

i. Determinación de la densidad aparente

Conforme al procedimiento y la secuencia de cálculo, descrito anteriormente y utilizando la ecuación [37], se tiene el siguiente resultado.

Tabla 9

Resultados de la densidad aparente a diferentes pesos de resina

Peso de la Resina, g	Volumen ocupado, ml	Densidad aparente, g/ml
10	14,5	0,6896
15	21,75	0,6896
20	28,75	0,6956
Densidad aparente, g/ml		0,6916

Fuente: Elaboración propia.

ii. Densidad verdadera o absoluta

Siguiendo el procedimiento y la secuencia de cálculo, descrito anteriormente y utilizando la ecuación [38], se tiene el siguiente resultado.

Densidad verdadera o absoluta: 1,05 g/ml

iii. Determinación de la porosidad

Conforme al procedimiento y la secuencia de cálculo, descrito anteriormente y utilizando la ecuación [40], se obtiene:

Porosidad = 34,7 %

iv. Determinación de la capacidad útil

Conforme al procedimiento y la secuencia de cálculo, descrito anteriormente y utilizando la ecuación [41] se tiene el siguiente resultado.

Tabla 10

Resultados de la capacidad útil de la resina

Conc. inicial de Boro, mg/L	Conc. final de Boro, mg/L	meq B/ L Sol. (inicial)	meq B/ L Sol (final)	meq B / g de resina	meq B / ml de resina
10	8,52	2,7	2,3	0,4	0,2726

Fuente: Elaboración propia.

$C_{\text{útil}} = 0,4 \text{ meq de boro / g de resina} \approx 0,2766 \text{ meq de Boro / ml de resina.}$

v. Determinación de la granulometría del lecho de intercambio

Conforme al procedimiento y la secuencia de cálculo, descrito anteriormente y utilizando la ecuación [42] y [43] se tiene el siguiente resultado.

Tamaño efectivo (TE)= 0,42 mm

Coefficiente de uniformidad (CU)= 1,47

Tabla 11

Resultado de análisis de Mallas

N° de serie	Tamaño de abertura (mm)	% Retenido	% acumulado
20	0,841	2,95	2,95
40	0,420	88,61	91,56
70	0,210	8,44	100,00

Fuente: Elaboración propia.

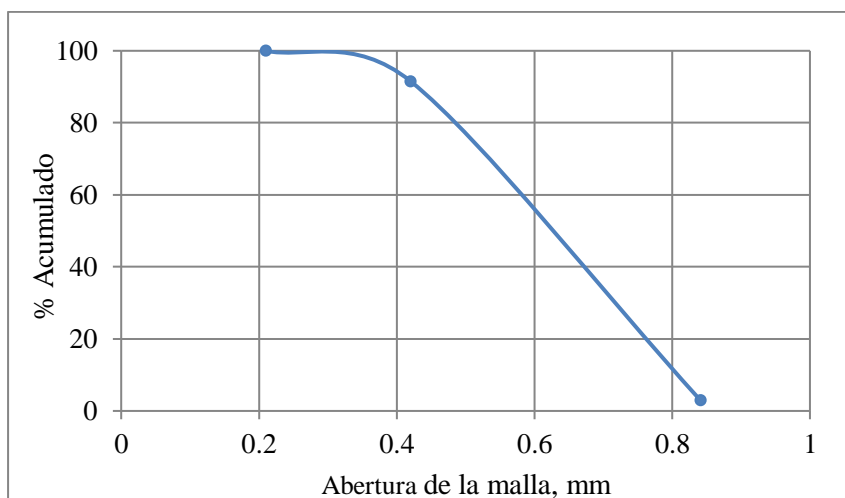


Figura 19. Curva Granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

D. Diseño de la columna de intercambio iónico

Para la metodología del diseño de la columna de intercambio iónico, se siguen los siguientes criterios:

Geankoplis (1998), indica que, para cálculo de la altura de la zona de intercambio, se deben seguir las siguientes consideraciones.

Consideraciones para el diseño

i. Caudal de intercambio

La columna de intercambio iónico trabajará a tres caudales dentro del rango recomendado por la hoja de especificaciones del producto, ver anexo 1.

ii. Área de intercambio

Se ha considerado una sección transversal, es decir la columna de intercambio será tubular.

El criterio tomado para elegir el área del intercambiador, es el recomendado Muñoz (2002), el cual recomienda un área mínima para evitar el efecto pared durante el proceso de intercambio. Empíricamente se ha establecido que la relación entre el tamaño máximo de la resina y el diámetro de la columna de intercambio no debe ser menor de 1 a 50 veces. Entonces si se utiliza un lecho de intercambio cuyas partículas tienen 0,45 mm de diámetro, el tubo donde se coloque no debe ser menor de 1,5 cm.

iii. Volumen de la resina

Para este cálculo se trabajará con una concentración de boro conocida, expresada en meq/L, proveniente de la salida del filtro de la planta de tratamiento de agua potable del distrito de Ite, y se utilizará la capacidad útil de la resina, la cual se encuentra en la hoja de especificaciones del producto, ver anexo 1.

iv. Masa de la resina

La masa de la resina se calculó a partir del producto del volumen por la densidad aparente de la resina.

v. Cálculo de la altura del lecho de resina

La columna se diseñó para trabajar con una altura de lecho máximo de 12 cm.

Para este cálculo se utilizó la siguiente relación.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h \quad [48]$$

$$h = \frac{4V}{\pi D^2} \quad [49]$$

Donde:

V: volumen de resina, L.

D: diámetro de la columna de intercambio, m.

h: altura del lecho de intercambio, m.

vi. Tiempo de intercambio

Se calcula el tiempo de intercambio t_i , entre la resina y el agua; proyectando para un volumen de agua a tratar en L y un caudal en ml/s.

vii. Cálculo de la pérdida de carga al inicio del intercambio

Se utilizará la ecuación [36], mencionada en el segundo capítulo, este cálculo será realizado para una altura de lecho de 12 cm.

viii. Cálculo de la velocidad de lavado para una expansión determinada

Se calculará la velocidad de lavado necesaria para alcanzar una expansión requerida del 50 % para lo cual se utilizaron las ecuaciones mencionadas en el punto **2.2.6.** del segundo capítulo.

ix. Cálculo de la pérdida de carga en el lecho de resina durante el lavado

Para este cálculo se utiliza la ecuación [27], mencionada en el segundo capítulo; este cálculo será hecho para una altura de lecho de 12 cm.

x. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de regenerante

Se utilizó como referencia para este cálculo la tabla de regenerante para el intercambio, de la hoja de especificación del producto, ver anexo 1.

xi. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de enjuague

Para este cálculo se utilizará como base de cálculo los datos de la hoja de especificaciones del producto, anexo 1.

xii. Cálculo de la altura del lecho expandido

Para un lecho de 0,12 m de altura, se proyecta expandir el lecho, en un máximo de 50 %.

Se utilizará la siguiente relación para el cálculo de la altura del lecho expandido.

$$L_e = (\varepsilon + 1)L \quad [46]$$

Dónde:

ε : Expansión del lecho filtrante.

L: altura del lecho sin expandir, m.

Le: altura del lecho expandido, m

xiii. Altura de la columna de intercambio

Para este cálculo de la columna de intercambio (CI), se tomó en cuenta:

- La altura del lecho de resina, (H_R).

- Altura de la expansión al 50 %, (H_E).
- La altura de la carga hidráulica, (H_A).
- La suma nos da la altura de la columna de intercambio.

$$H_{CI} = H_R + H_E + H_A \quad [47]$$

Se considera la altura máxima de lecho de intercambio para el cálculo de la columna, además se dio un borde libre adicional del 15 % como seguridad.

E. Cálculos

i. Caudal de intercambio

Se utilizó tres caudales de intercambio, esto se determinó en función a la hoja de especificaciones del producto (anexo 1) y la capacidad de alimentación de la bomba.

De la hoja de especificación se tiene la condición de operación, flujo de 4 a 30 BV/h.

El caudal se expresa en volúmenes por hora (Vol/h o BV/h), es decir en litros de solución por litro de resina por hora.

Entonces, se proyecta el flujo en base a la cantidad de resina que se utilizó, siendo 15 gramos de resina Amberlite IRA 743; teniendo un volumen de la resina de 21,75 ml.

Entonces

Flujo mínimo de trabajo:

$$4 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 4 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 21,75 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 1,45 \text{ ml / min}$$

Flujo máximo de trabajo

$$30 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 30 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 21,75 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 10,875 \text{ ml / min}$$

Se escoge 3 caudales de alimentación, dentro de las recomendaciones de la hoja del producto.

$$Q_1 : 3 \text{ ml / min}$$

$$Q_2 : 7 \text{ ml / min}$$

$$Q_3 : 11 \text{ ml / min}$$

ii. Área de intercambio

El diámetro es de 1,5 cm, por lo tanto, el área de intercambio es de: $0,1767 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 1,767 \text{ cm}^2$

iii. Volumen de resina

- Como se trabajó con una masa de 15 g de resina, con ayuda de su densidad, se obtiene el volumen de resina de 21,75 ml.
- Se calculó el volumen de agua a utilizar, teniendo en cuenta:
 - Los meq de boro presentes en el agua son: 2,2 meq Boro/L.
 - La capacidad útil: 0,7 meq / ml resina.
- **Volumen de resina: 21,75 ml \approx 0,02175 L**

Entonces, se multiplica el volumen de la resina por la capacidad útil y luego se divide entre los meq de boro presente en el agua, así se obtiene el volumen de agua a tratar.

$$21,75 \text{ ml resina} \times \frac{0,7 \text{ meq boro}}{\text{ml de resina}} = 15,23 \text{ meq boro}$$

$$15,23 \text{ meq boro} \times \frac{\text{L de Solución}}{2,2 \text{ meq Boro}} = 6,92 \text{ L de solución}$$

Entonces el volumen de agua a tratar es 6,92 Litros

iv. Masa de la resina

- Se trabaja con una masa de 15 gramos de resina Amberlite IRA743.

v. Cálculo de la altura del lecho de resina

Reemplazando en la ecuación [45], se tiene:

- Volumen de la resina: $21,75 \text{ cm}^3$
- Diámetro del lecho de intercambio: 1,5 cm

$$h = \frac{4 V}{\pi D^2} = \frac{4 (21,75 \text{ cm}^3)}{\pi (1,5 \text{ cm})^2} = 12,32 \text{ cm} \approx 0,13 \text{ m}$$

En la práctica se trabaja con una altura de 0,15 m

vi. Tiempo de intercambio

Para determinar el tiempo de intercambio en la columna se trabajó con un volumen de 6,92 L, a diferentes caudales.

Entonces:

- Para un caudal de 3 ml / min:

$$6,92 \times \frac{1000 \text{ ml}}{\text{L}} \times \frac{\text{min}}{3 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 38,44 \text{ h} \approx 2306,4 \text{ min}$$

- Para un caudal de 7 ml / min: 16,48 h \approx 988,57 min
- Para un caudal de 11 ml / min: 10,49 h \approx 629,09 min
- A continuación, se muestra una tabla con el resumen del diseño de la columna de intercambio iónico.

Tabla 12

Datos teóricos para la columna de intercambio iónico

Volumen de agua a tratar, L		6,92
meq boro, presentes en el agua a tratar		2,2
Volumen de la resina en, ml		21,75
Cantidad de resina, g		15
Capacidad de la resina, meq/ml		0,7
Altura de lecho de intercambio, m		0,15
	Q: ml/ min	Tiempo, h
Tiempo de intercambio	3	38,44
	7	16,48
	11	10,49

Fuente: Elaboración propia.

vii. Cálculo de la pérdida de carga al inicio del intercambio

Se utilizará la ecuación de Carmen Kozeny, teniendo en cuenta los siguientes datos:

- Porosidad inicial: 0,347
- Coeficiente de esfericidad: 1
- Temperatura, °C: 19
- Viscosidad cinemática, $m^2/s = 1,054 \times 10^{-6} = 1,054 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/s$.
- Aceleración de la gravedad, cm/s^2 : 981
- Altura del lecho, m: 0,15
- Los cálculos realizados por etapas se muestran en el anexo 2.

Tabla 13

Pérdida de carga al inicio del intercambio

Caudal ml/min	Carman Kozeny 0,15 m
3	0,021
7	0,048
11	0,076

Fuente: Elaboración propia.

viii. Cálculo de la velocidad de lavado para una expansión determinada

Para efectuar el lavado, se requiere un caudal que pueda fluidizar los gránulos de resina y así poder eliminar sólidos en suspensión y posibles aglomeramientos formadas durante el servicio.

La secuencia de cálculo se muestra en el anexo 3.

Velocidad de levantamiento o velocidad de lavado, es 15,6 ml/min

ix. Cálculo de la pérdida de carga en el lecho de resina durante el lavado

Para este cálculo se utiliza la ecuación [27] descrita en el capítulo II.

Para una altura de 0,15 m.

$$\begin{aligned}\Delta P &= D(1-\varepsilon)(G_{s,m} - G_{s,w}) \\ \Delta P &= 0,15(1-0,347)(1,05-1) \\ \Delta P &= 0,005 \text{ m}\end{aligned}$$

x. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de regenerante

Para el caudal de regeneración se calculó a partir de la hoja de especificación del producto ver anexo 1, se tiene:

- Regeneración con ácido sulfúrico o ácido clorhídrico.
- Flujo recomendado: 1,5 a 2 BV/h,
- Flujo mínimo

$$1,5 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 1,5 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}}$$

$$1,5 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 21,75 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 0,54 \text{ ml / min}$$

- Flujo máximo

$$2 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 2 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}}$$

$$2 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 21,75 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 0,725 \text{ ml / min}$$

- La regeneración se trabajó con el flujo máximo, 0,73 ml/min.
- Área transversal de la columna, $0,1767 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \approx 1,767 \text{ cm}^2$
- Tiempo de regeneración, 30 a 60 min.
- Volumen de regenerante, ml: 82,2 ml de regenerante.
- Concentración del regenerante: H₂SO₄ al 5 %

xi. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de agua de enjuague

Para este cálculo se consideró lo siguiente:

Retrolavado con Hidróxido de sodio

- Concentración de 2,5 %.
- Tiempo de contacto, 45 min
- Flujo de retrolavado, 2 a 3 BV/h $\approx 0,725 \text{ ml/min}$ a 1,08 ml/min; se utiliza el flujo máximo.
- Volumen del hidróxido de sodio, ml: 48,6.
- Área transversal de la columna, $0,1767 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \approx 1,767 \text{ cm}^2$

Lavado de la resina con agua destilada

- Caudal de enjuague 2 BV/h $\approx 0,725 \text{ ml/min}$

- Tiempo de lavado, min: 40.
- Volumen, ml: 29.
- Área transversal de la columna, $0,1767 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \approx 1,767 \text{ cm}^2$

xii. Cálculo de la altura del lecho expandido

Para el cálculo de la expansión del lecho se utilizó la ecuación [46], para una altura de 0,15 m.

Entonces:

$$L_e = (\varepsilon + 1)L$$

$$L_e = (0,50 + 1)0,15 = 0,23\text{m}$$

xiii. Altura de la columna de intercambio

Utilizando la ecuación [47], se tiene:

- Altura de lecho de resina: 0,15 m
- Altura del 50 % de expansión= 0,08 m
- Altura de la carga hidráulica= 0,55 m

Entonces

$$H_{CI} = H_R + H_E + H_A$$

$$H_{CI} = 0,15 + 0,08 + 0,55$$

$$H_{CI} = 0,78$$

Se dará un borde libre de seguridad del 15 %, con esto se tiene:

$$H_{Cl} = 0,90 \text{ m}$$

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Construcción y descripción de la columna de intercambio iónico

A. Selección de los materiales a usar

La selección de los materiales a usar para la construcción de un equipo es una de las partes más importante del diseño del mismo, ya que del tipo de materiales utilizados dependerá la operatividad, resistencia y prestaciones que brinde el servicio.

i. Columna de intercambio iónico

La columna de intercambio iónico será de vidrio de borosilicato, con un diámetro de 1,5 cm y una longitud de 90 cm (calculada en el ítem 3.4.2. parte E xiii).

El vidrio es un material resistente para los fines que se utilizó, siendo transparente, lo que facilitará la observación de los cambios hidrodinámicos, entre estos el proceso de lavado, el nivel de expansión del lecho de resina, la distribución del agua de lavado y el nivel de agua de alimentación.

Para la construcción de la columna se utilizaron 2 tubos de vidrio con una altura de 22 cm y 82 cm respectivamente, un diámetro interno de 1,5 cm y con un espesor de 0,2 cm; ambos tubos fueron

conectados con una goma de 3,5 cm de altura, un diámetro interno de 1,5 cm y un espesor de 0,5 cm para darle más firmeza se cubrió la parte de conexión del tubo con cinta aislante, finalmente la construcción se ubicó en una estructura metálica.

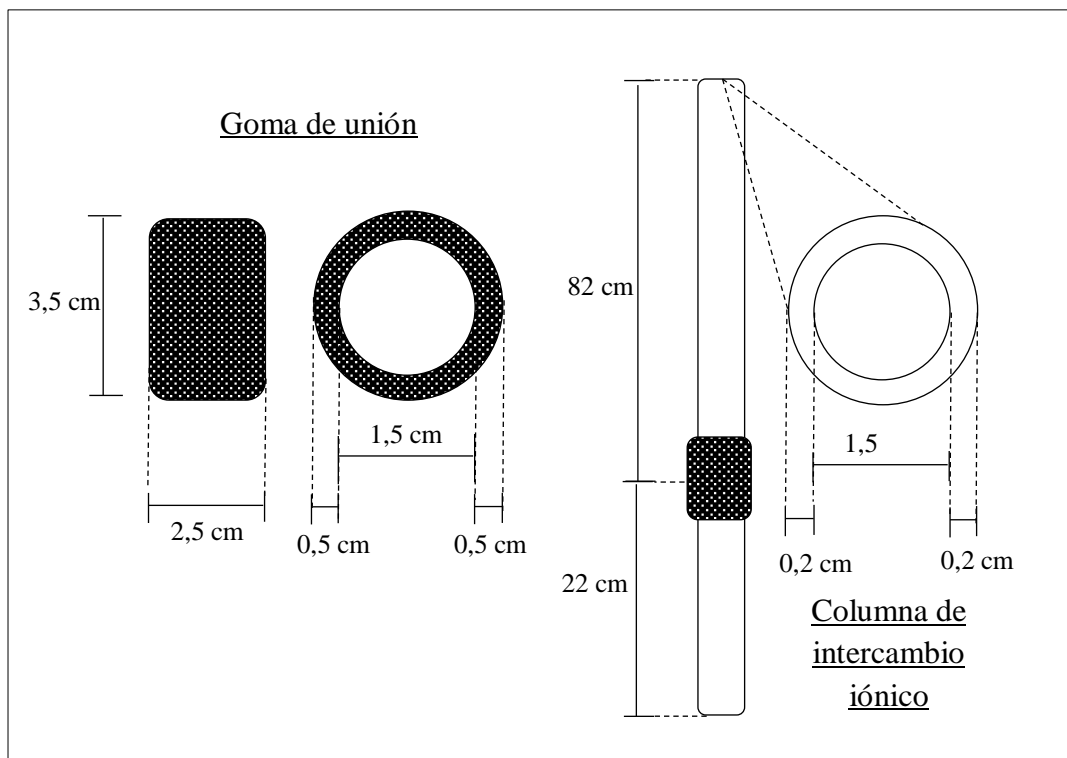


Figura 20. Columna de intercambio iónico y goma de unión

Fuente: Elaboración propia.

ii. Sistema de drenaje parte inferior de la columna

El sistema de drenaje es un tapón circular, fabricado de goma de 0,4 cm de espesor, diámetro interno de 1,5 cm y 3,4 cm de altura. Asimismo, la goma tiene 2 salidas con un espesor de 0,33 cm y 2

diámetros interno de 0,65 cm; en el interior de la goma descansa una rejilla que va sellada al tapón y es sellada con silicona.

En la salida del diámetro menor de la goma se conecta un tubo de vidrio en forma de cruz, con un diámetro interno de 0,4 cm, un espesor de 0,2 cm y una altura homogénea en todos sus lados de 4 cm; en la segunda salida se conecta un tubo de vidrio de 0,4 cm de diámetro interno y un espesor de 0,2 cm.

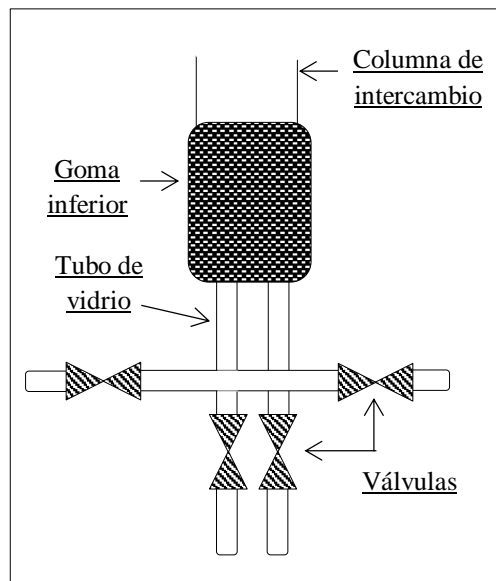


Figura 21. Sistema de drenaje parte inferior de la columna de intercambio

Fuente: Elaboración propia.

iii. Tapón parte superior de la columna

El tapón de la goma de la parte superior cuenta con unas dimensiones, de 0,5 cm de espesor, 1,5 cm de diámetro interno y una altura de 3,5 cm; tiene 1 salida en la parte izquierda de diámetro 0,65

cm; en la cual es conectado con un tubo de vidrio de 0,4 cm de diámetro interno y 0,2 cm de espesor; asimismo, este tubo es conectado a una válvula con un diámetro interno de 0,4 cm.

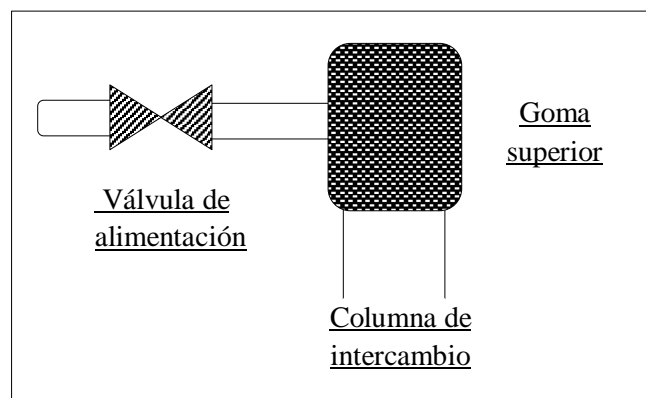


Figura 22. Tapón de la parte superior de la columna de intercambio

Fuente: Elaboración propia

iv. Construcción de la rejilla

Se utilizó una malla de acero inoxidable con aberturas de 0,10 mm de diámetro para evitar que la resina pase al sistema de tuberías, se coloca esta malla en el tapón de la parte inferior de la columna, fijándola con silicona, el diámetro de la malla es de 1,5 cm.

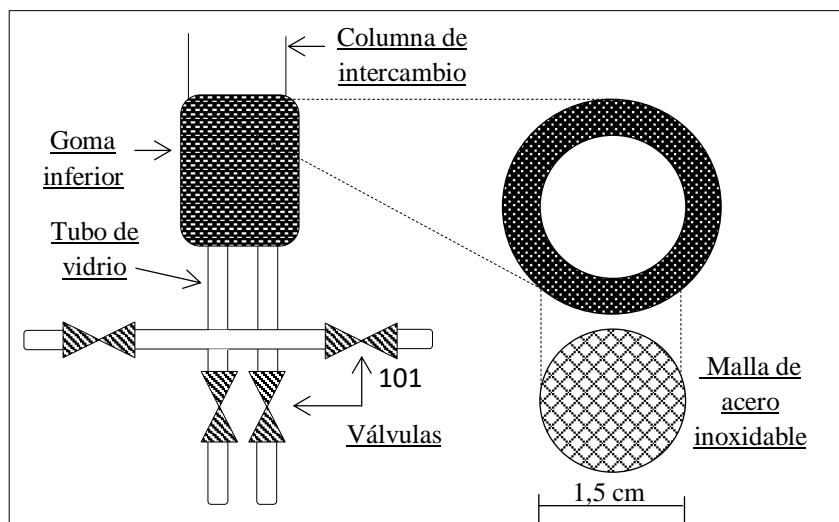


Figura 23. Construcción de la rejilla inferior

Fuente: Elaboración propia.

v. Otros

Se utilizó mangueras de polipropileno transparentes, con un diámetro interno de 1 cm y un espesor de 0,1 cm para el proceso de intercambio, alimentación, agua de lavado, regeneración y enjuague; se utilizaron válvulas de plástico con un diámetro interno de 0,4 cm.

Se utilizaron 5 recipientes de vidrio, el recipiente (R-1) sirve para almacenar el agua de alimentación con una capacidad de 4 L, el recipiente (R-2) es utilizado para la recepción del agua tratada del intercambio iónico con una capacidad de 4 L, el recipiente (R-3) es utilizado para la alimentación del lavado con una capacidad de 1 L, el recipiente (R-4) es utilizado para la alimentación de la regeneración de la resina con una capacidad de 1 L y el recipiente (R-5) es utilizado para el lavado de la resina con una capacidad de 4 L.

Se usó una bomba peristáltica (B) para bombear el agua de alimentación de los diferentes recipientes a la columna de intercambio.

B. Descripción del proceso y del equipo

i. Alimentación

El agua almacenada en el recipiente (R-1) es bombeada a la columna de intercambio iónico, utilizando la bomba peristáltica utilizando los caudales establecidos.

ii. Proceso de intercambio

El agua a tratar se bombea desde la alimentación, para ellos se cierran las válvulas V-2, V-3, V-4, V-5 y se regula la válvula V-6 ya que esta controla el flujo de agua tratada y también mantiene el nivel del agua encima del lecho filtrante constante, asimismo, en esta válvula es de donde se toman las muestras.

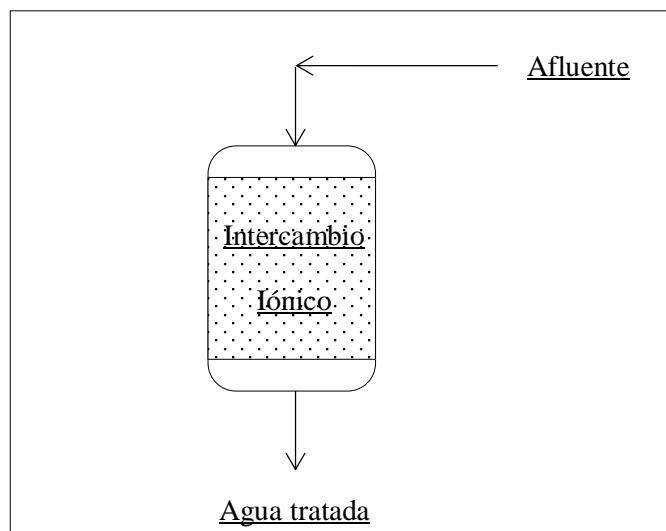


Figura 24. Esquema del proceso de intercambio

Fuente: Elaboración propia.

iii. Proceso de lavado o retrolavado

En esta parte se cierran las válvulas V-1, V-4, V-5 y V-6 y se abren las válvulas V-3 y V-2, se utiliza la bomba peristáltica para lograr el flujo ascendente a través de la columna hasta alcanzar una expansión del lecho de intercambio del 50 %, esta bomba es alimentada por el recipiente R-3.

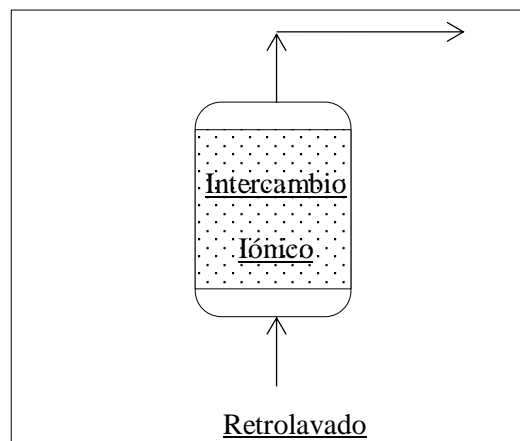


Figura 25. Esquema del proceso de lavado o retrolavado

Fuente: Elaboración propia.

iv. Proceso de regeneración

Se cierran las válvulas V-1, V-3, V-5 y V-6, y se mantienen abiertas las válvulas V-4 y V-2, se utiliza la bomba peristáltica para

alimentar la solución regenerante del recipiente R-4 a la columna de intercambio.

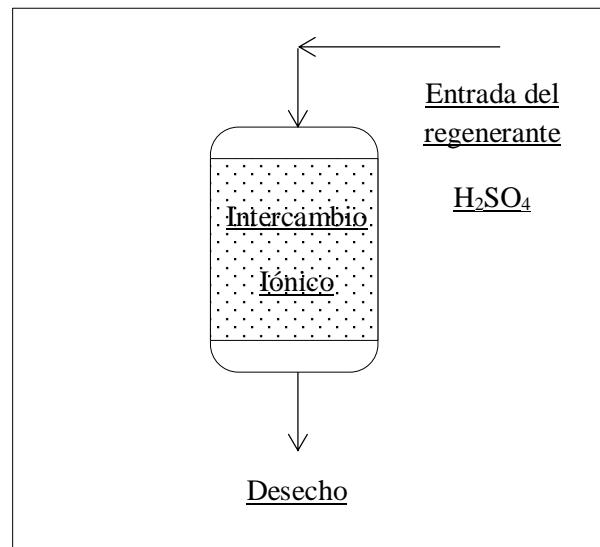


Figura 26. Esquema del proceso de regeneración

Fuente: Elaboración propia.

v. **Proceso de enjuague**

Se cierran las válvulas V-1, V-3, V-4 y V-6, y se mantienen abiertas las válvulas V-5 y V-2, se utiliza la bomba peristáltica para alimentar el agua destilada del recipiente R-5 a la columna de intercambio.

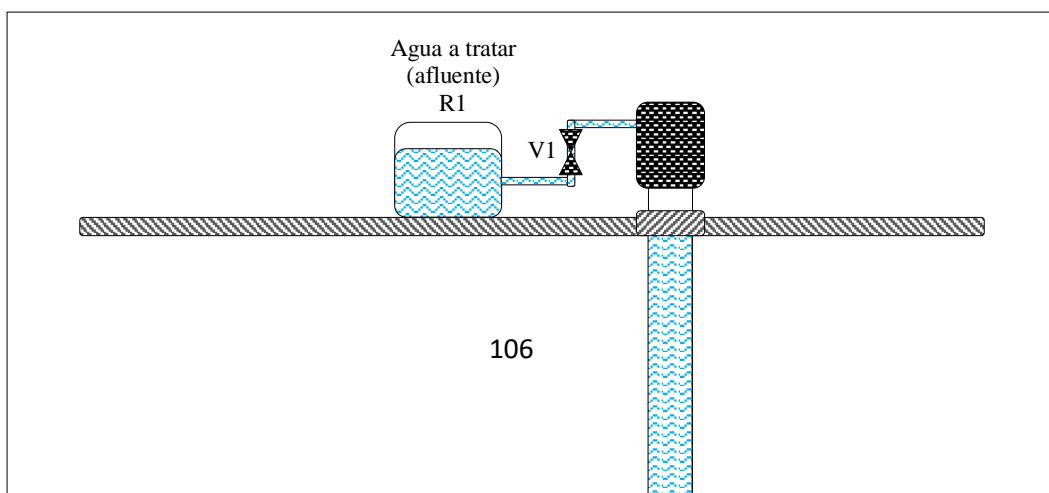
En la tabla adjunta se resumen la operación de la columna de intercambio iónico.

Tabla 14

Instrucciones de operación

Operación	Cerrar válvulas	Abrir válvulas
Intercambio	V-2, V-3, V-4, V-5	V-1, V-6
Lavado o retrolavado	V-1, V-4, V-5, V-6	V-2, V-3
Regeneración	V-1, V-3, V-5, V-6	V-2, V-4
Enjuague	V-1, V-3, V-4, V-6	V-2, V-5

Fuente: Elaboración propia.



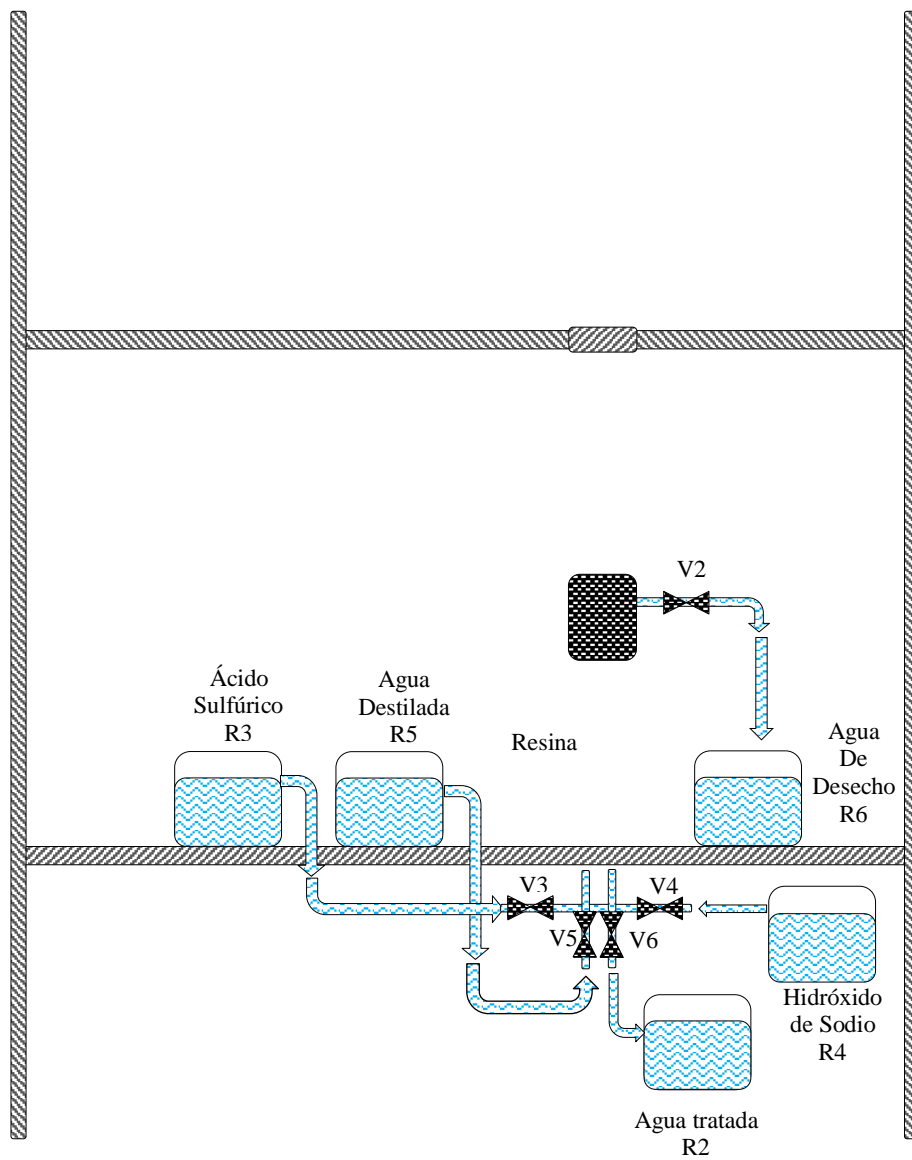


Figura 27. Esquema del sistema de Intercambio iónico

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

4.1. Estudio de la columna de intercambio iónico

4.1.1. Evaluación de la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio

Procedimiento

- Se realizó el procedimiento normal para el intercambio, pero en este caso se le conectó una jeringa a la goma inferior de la columna (justo debajo del lecho filtrante), y esta jeringa se extiende con una manguera a la misma altura de la columna y así se pudo medir la pérdida de carga.
- Se utilizó una wincha para medir la diferencia de altura entre el nivel de agua de la columna de intercambio y la altura de agua correspondiente.
- Se realizó el mismo procedimiento para los tres caudales.

4.1.2. Evaluación del caudal de lavado para una expansión del 50 %

Procedimiento

- Para esta evaluación se trabajó con la altura del lecho ya diseñada, se midió la altura que deberá alcanzar el lecho expandido en un 50 % y se marcó la altura que alcanzará.
- Se procedió a cerrar y abrir las válvulas para realizar el proceso de retrolavado como se muestra en la Tabla 14 (instrucciones de operación).
- Se procedió a encender la bomba para realizar el lavado hasta que alcance la marca previamente establecida para la expansión del 50 %.
- Una vez establecida la expansión, se midió el flujo a la salida del sistema de recolección de agua de lavado, para lo cual se utiliza un vaso precipitado de 2 L, cronómetro y una probeta.
- Teniendo estos datos se calculó la velocidad de lavado y se expresa en ml/min.

4.1.3. Curva de equilibrio y línea de operación

Procedimiento

- Se determinó la concentración de boro del agua de Ite (Salida del filtro) y a partir de esta concentración se preparó 6 disoluciones y se vaciaron en botellas plásticas de 500 ml.

- Una vez que se preparó las 6 diluciones se determinó la concentración real de cada botella; esta se hizo para corroborar la concentración inicial.
- Se pesó 1 gramo de resina húmeda y se le agregó en cada botella; luego se etiquetó con su concentración y fecha de inicio.
- Se dejó que la resina realice el intercambio por un tiempo de 7 días, durante este tiempo se agitaron las botellas diarias para mejorar el proceso de intercambio de la resina.
- Se determinó la concentración de boro después de 7 días de intercambio (tiempo suficiente según pruebas previas realizadas donde ya no existía diferencia significativa de intercambio).
- Se realizaron dos pruebas en simultaneas (A y B) y se escogieron las mejores curvas de equilibrio o isotermas.

4.1.4. Determinación experimental de las curvas de avance

Procedimiento

- Se realizó el proceso de intercambio, que consiste en hacer pasar flujo de agua por la columna de intercambio, después de abrir y cerrar las válvulas indicadas en la Tabla 14 para el proceso de intercambio, se procedió a trabajar con los tres caudales de diseño proyectado.

- Una vez establecido el caudal, se empezó alimentar la columna con agua cruda del distrito de Ite (salida del filtro).
- Se determinó los periodos de tiempo en los que se va tomar muestras, esto depende del volumen de agua a tratar y el caudal de alimentación.
- Se tomó las muestras a diferentes tiempos, y al final del tiempo calculado, se procedió a calcular la concentración de boro en las muestras.
- Una vez que se establece el punto de agotamiento de la resina, esto indica que la resina ya no puede intercambiar más, por lo tanto, la concentración de salida de la columna es igual a la concentración de entrada.
- Teniendo los datos experimentales se construyeron las curvas de avance para los diferentes caudales.

4.1.5. Determinar la longitud (altura) o profundidad de la zona de intercambio

La longitud o profundidad de la zona de intercambio es calculada a partir de las ecuaciones del capítulo II, [22], [23], [24] y [25].

4.1.6. Determinar la masa de la zona de intercambio

- Para este cálculo se utilizó la altura de la zona de intercambio.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [48]$$

$$m = \rho v \quad \longrightarrow \quad m = \rho Ah \quad [49]$$

Dónde:

m: masa de la resina en gramos.

ρ : densidad de la resina, g/cm³.

A: área de la resina, cm².

h: altura de la zona de intercambio, cm

4.1.7. Determinar el coeficiente global de transferencia de masa

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de masa, se utilizó como referencia bibliográfica a los autores Geankoplis (1998) y Weber, (1979); para los tres caudales de trabajo.

4.2. Resultados

4.2.1. Evaluación de la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio

Según con el procedimiento del ítem 4.1.1., se tienen los siguientes datos:

Tabla 15

Pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio (experimental)

Altura del lecho (m)	Caudal de alimentación (ml/min)	Pérdida de carga (m)
0,15	3	0,03
0,15	7	0,06
0,15	11	0,15
0,15	3	0,03

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Evaluación del caudal de lavado para una expansión del 50 %

- Siguiendo el procedimiento detallado en el ítem 4.1.2. de este mismo capítulo se obtuvo.
- **La velocidad de lavado es de 20 ml/min**

4.2.3. Curva de equilibrio y línea de operación

- Siguiendo el procedimiento detallado en el ítem 4.1.3.
- Para las dos pruebas simultaneas realizadas A y B, se analizaron los miliequivalentes de boro presentes en la solución y se obtienen sus correspondientes miliequivalentes de boro presentes en la resina.
- En esta oportunidad se logró contrastar los resultados con el laboratorio acreditado de SGS del Perú S.A.C., teniendo los

siguientes datos según el informe de ensayo MA1933031 que se adjuntan en el anexo 4:

Tabla 16

Datos de la curva de equilibrio, concentración inicial y final en mg/L

N° de muestras	C _i (mg de boro/ L), Según análisis realizados por el Tesista	C _T (mg de boro/ L), Según SGS del Perú S.A.C.
1	1	0,006
2	3	0,006
3	5	0,006
4	10	0,697
5	20	8,279

Fuente: Elaboración propia.

- Con los resultados obtenidos se calculan los miliequivalentes, y se procede a obtener por diferencia la concentración residual de meq presentes en la resina, con la siguiente ecuación:

$$C_R = C_i - C_T \quad [50]$$

Dónde:

C_R: concentración residual, meq de boro presentes en la resina.

C_i : concentración inicial, meq de boro presentes en la solución.

C_T : concentración después del tiempo de intercambio, meq de boro presentes en la solución.

- Reemplazando los valores y las concentraciones respectivas para el número de muestra se tiene:

Tabla 17

Datos de la curva de equilibrio, concentración inicial y final, meq de boro / L solución

N° de muestras	C_i (meq de boro/ L solución)	C_T (meq de boro/ L solución)
1	0,28	0,0017
2	0,83	0,0017
3	1,39	0,0017
4	2,77	0,1934
5	5,55	2,2973

Fuente: Elaboración propia.

Entonces:

$$C_R = C_i - C_T$$

$$C_R = 0,28 - 0,0017$$

$$C_R = 0,2758 \text{ meq boro / g de resina}$$

Tabla 18*Datos experimentales de la curva de equilibrio*

N° de muestras	C _i (meq de boro/ L solución) (1)	C _T (meq de boro/ L solución) ≈ q (2)	C _R (meq de boro/ g de resina) ≈ C (3)
1	0,28	0,0017	0,2758
2	0,83	0,0017	0,8308
3	1,39	0,0017	1,3858
4	2,22	0,1934	2,5815
5	5,55	2,2973	3,2525
1	0,28	0,0017	0,2758

Fuente: Elaboración propia.

- La isoterma se ajustó con la ecuación de Langmuir.

$$q = \frac{q_0 k C}{1 + k C} \quad [51]$$

Para realizar el ajuste de la ecuación de Langmuir, se procede a dividir la columna (2) entre la columna (3), siendo el resultado de esto la ordenada y la columna (3) la abscisa, todo correspondiente a la Tabla 18, como se muestra en la siguiente figura.

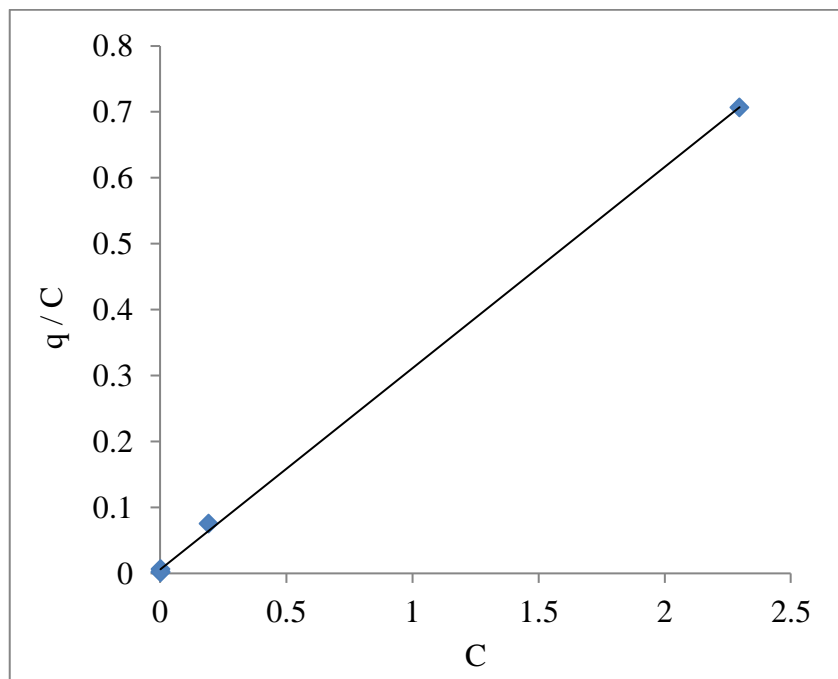


Figura 28. Datos experimentales de la curva de equilibrio ajustados a la ecuación de Langmuir

Fuente: Elaboración propia

- Se obtiene la siguiente ecuación lineal:

$$Y = 0,3053x + 0,0057 \longrightarrow q = 0,3053C + 0,0057$$

$$R = 0,999$$

- Entonces de la ecuación lineal obtenida se obtienen los valores para la ecuación [51]:

$$q_0 = \frac{1}{0,3053} = 3,2754 \quad ; \quad k = \frac{1}{3,2754 \times 0,0057} = 53,5614$$

- Entonces la ecuación [51] quedaría:

$$q = \frac{q_0 k C}{1 + k C} \longrightarrow q = \frac{175,4386 C}{1 + 53,5614 C} \quad [52]$$

Con la ecuación [52] se procede a realizar el ajuste de Langmuir para los datos experimentales y ver su comportamiento.

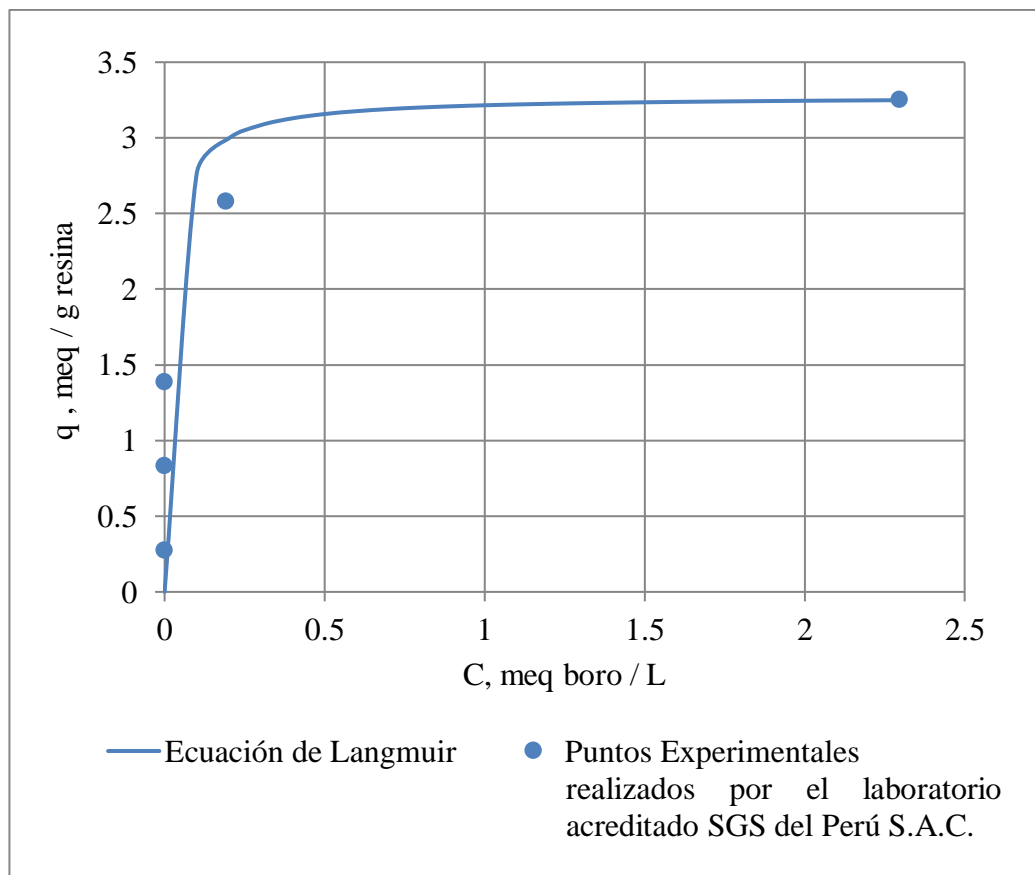


Figura 29 Ajuste de la isoterma de Langmuir

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar la isoterma de Langmuir tiene un buen ajuste a los datos experimentales, por lo tanto, se optó por trabajar con esta ecuación por ser representativa de los datos experimentales.

Tabla 19*Datos para trazar la línea de operación y la curva de equilibrio*

Nº	C meq/L (1)	q meq/g resina (2)	q _e meq/g resina (3)
1	0,000	0,000	0,000
2	0,142	0,072	2,895
3	0,284	0,145	3,073
4	0,426	0,217	3,138
5	0,568	0,290	3,171
6	0,710	0,362	3,192
7	0,852	0,434	3,205
8	0,994	0,507	3,215
9	1,136	0,579	3,223
10	1,278	0,652	3,228
11	1,420	0,724	3,233
12	1,562	0,796	3,237
13	1,704	0,869	3,240
14	1,846	0,941	3,243
15	1,988	1,014	3,245
16	2,130	1,086	3,247
17	2,272	1,158	3,249
18	2,414	1,231	3,250
19	2,556	1,303	3,252
20	2,698	1,376	3,253
21	2,840	1,448	3,254
22	2,982	1,521	3,255
23	3,124	1,593	3,256
24	3,266	1,665	3,257
25	3,408	1,738	3,258
26	3,550	1,810	3,258
27	3,692	1,883	3,259
28	3,834	1,955	3,260
29	3,976	2,027	3,260
30	4,118	2,100	3,261
31	4,260	2,172	3,261
32	4,402	2,245	3,262
33	4,544	2,317	3,262
34	4,686	2,389	3,262
35	4,828	2,462	3,263
36	4,970	2,534	3,263
37	5,112	2,607	3,264
38	5,254	2,679	3,264
39	5,396	2,751	3,264
40	5,550	2,805	3,264

Fuente: Elaboración propia.

- Para trazar la curva de equilibrio se determinó los miliequivalentes de boro en solución y los miliequivalentes adsorbidos por la resina (meq boro/ g de resina).
- En la columna (1) se listan los valores de C (meq de boro /L), se trabajó en el rango de:
 C_0 : (meq/L) (concentración inicial) = 5,550
 C : (meq/L) (concentración final) = 0
- En la columna (2) se listan los valores de, q (meq boro/ g de resina) para la línea de operación que pasa por el origen y el punto de intercepción con la curva de equilibrio.

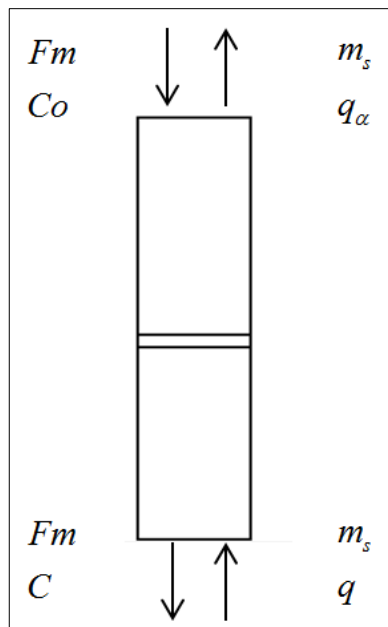


Figura 30. Balance de materia para el soluto a lo largo de toda la columna.

Fuente: (Treybal, 1988)

- La línea de operación se determina a partir del balance de material para el soluto a lo largo de toda la columna, que es el siguiente:

$$F_m C_0 + m_s q = F_m C + m_s q_\alpha$$

$$F_m (C_0 - C) = m_s (q_\alpha - q)$$

$$F_m C_0 = m_s q_\alpha$$

- Cuando la línea de operación pasa a través del origen

$$F_m C = m_s q$$

Donde:

F_m : flujo másico de la velocidad de saturación del adsorbente

C : concentración de soluto (meq boro/L) a la salida del intercambiador.

m_s : velocidad másica superficial de la velocidad de saturación del adsorbente.

q : la concentración de soluto en el adsorbente.

- La línea de operación se construyó considerando lo siguiente:
- Todo el soluto se separa del efluente en la columna.
- Para el primer punto la línea de operación pasa por el origen y el segundo punto será determinado por la concentración inicial del soluto (meq de boro /L), este punto se proyecta hacia la curva de equilibrio obteniendo el, q_α , la cantidad de soluto retenida en el adsorbente (meq de boro/ g de resina).
- Para el segundo punto se tiene:

$$F_m C_0 = m_s q_\alpha$$

Dónde:

F_m y m_s : son las velocidades de masa del fluido

C_0 : es la concentración de soluto en la alimentación (meq boro/L)

q_α : es la concentración de soluto en el adsorbente a la salida de la columna (meq de boro / g de resina).

Línea de operación o trabajo

Primer punto

$$C \text{ (meq/L)} = 0$$

$$q \text{ (meq/ g de resina)} = 0$$

Segundo punto

$$C_0 \text{ (meq/L)} = 5,55$$

$$q_\alpha \text{ (meq / g de resina)} = 2,805$$

- En la columna (3) se listan los valores de, q_e , (meq boro/ g de resina) calculados a partir de una ecuación empírica donde a y b son constantes, para este cálculo se utilizó la columna (2). Se preparó una curva donde la columna (1) está como ordenada y la columna (3) como abscisa.

$$q = \frac{q_0 k C}{1 + k C} \longrightarrow q = \frac{175,4386 C}{1 + 53,5614 C}$$

A continuación, se muestra la curva de equilibrio y la línea de operación.

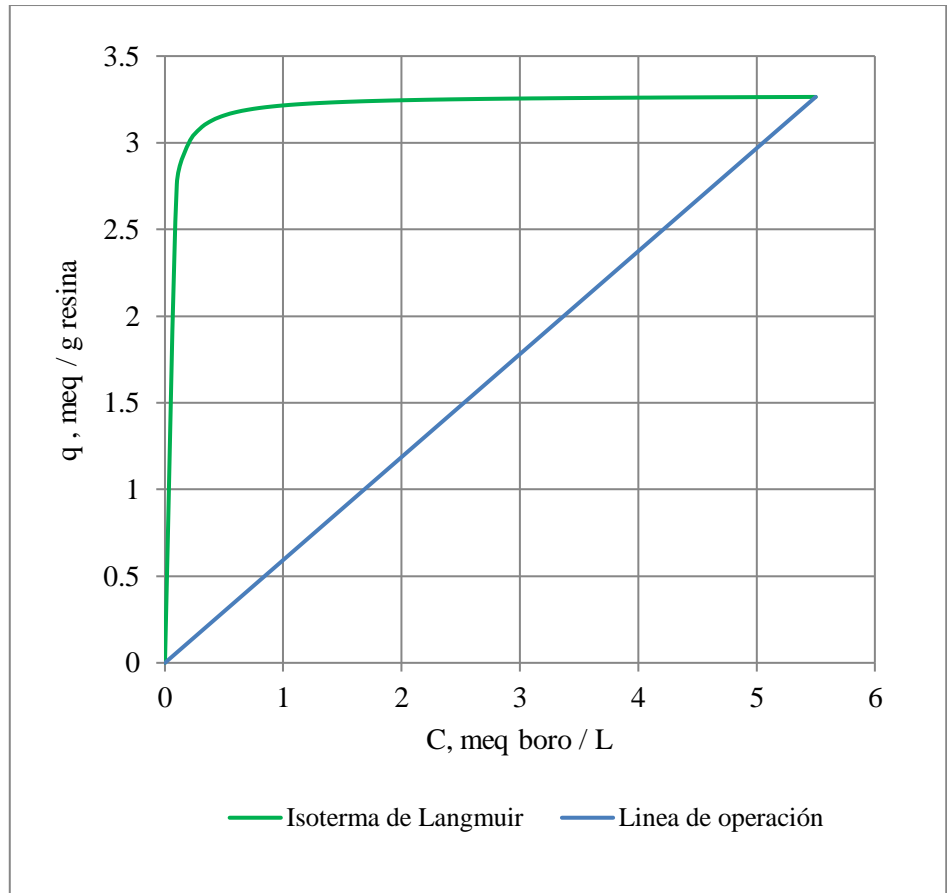


Figura 31. Línea de operación e isoterma de adsorción

Fuente: Elaboración propia.

- Para predecir el comportamiento que pueden tener las curvas de avance se realizaron los siguientes cálculos.

Tabla 20*Datos para calcular la curva de saturación*

C	Ce	1/(C-Ce)	$\int_{C_e}^C (C-C_e)^{-1} dC$	$(w-w_b)/(w_e-w_b)$	C/Co	1- (C/Co)
(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0,278	0,001	3,616	0,161	0,000	0,050	0,950
0,411	0,002	2,440	0,596	0,197	0,074	0,926
0,545	0,002	1,841	0,761	0,251	0,098	0,902
0,679	0,003	1,479	1,024	0,338	0,122	0,878
0,813	0,003	1,235	1,135	0,375	0,146	0,854
0,947	0,004	1,061	1,324	0,437	0,171	0,829
1,080	0,005	0,930	1,407	0,464	0,195	0,805
1,214	0,005	0,827	1,554	0,513	0,219	0,781
1,348	0,006	0,745	1,621	0,535	0,243	0,757
1,482	0,007	0,678	1,742	0,575	0,267	0,733
1,616	0,008	0,622	1,797	0,593	0,291	0,709
1,749	0,009	0,575	1,900	0,627	0,315	0,685
1,883	0,010	0,534	1,947	0,643	0,339	0,661
2,017	0,011	0,498	2,036	0,672	0,363	0,637
2,151	0,012	0,468	2,078	0,686	0,388	0,612
2,285	0,013	0,440	2,156	0,712	0,412	0,588
2,418	0,015	0,416	2,193	0,724	0,436	0,564
2,552	0,016	0,394	2,264	0,747	0,460	0,540
2,686	0,018	0,375	2,297	0,758	0,484	0,516
2,820	0,020	0,357	2,361	0,779	0,508	0,492
2,954	0,021	0,341	2,391	0,790	0,532	0,468
3,087	0,024	0,326	2,450	0,809	0,556	0,444
3,221	0,026	0,313	2,477	0,818	0,580	0,420
3,355	0,029	0,301	2,531	0,836	0,604	0,396
3,489	0,032	0,289	2,557	0,844	0,629	0,371
3,623	0,036	0,279	2,607	0,861	0,653	0,347
3,756	0,040	0,269	2,631	0,869	0,677	0,323
3,890	0,045	0,260	2,677	0,884	0,701	0,299
4,024	0,050	0,252	2,699	0,891	0,725	0,275
4,158	0,057	0,244	2,743	0,906	0,749	0,251
4,292	0,065	0,237	2,764	0,913	0,773	0,227
4,425	0,076	0,230	2,805	0,926	0,797	0,203
4,559	0,089	0,224	2,825	0,933	0,821	0,179
4,693	0,106	0,218	2,864	0,946	0,846	0,154
4,827	0,130	0,213	2,883	0,952	0,870	0,130
4,961	0,166	0,209	2,920	0,964	0,894	0,106
5,094	0,224	0,205	2,938	0,970	0,918	0,082
5,228	0,336	0,204	2,975	0,982	0,942	0,058
5,362	0,638	0,212	2,994	0,988	0,966	0,034
5,495	4,224	0,787	3,029	1,000	0,990	0,010

Fuente: Elaboración propia.

- En la columna (4) se listan los valores de C (meq boro/g resina). El punto de saturación se elige arbitrariamente para un valor bajo, C_b , de la concentración del soluto en el efluente, con frecuencia se toma un valor de 0,05. El adsorbente se considere esencialmente agotado para una concentración arbitraria, C_x ; elegida muy cerca de C_o , la fracción media de soluto separado desde el comienzo hasta el final, el punto de agotamiento es con frecuencia 0,99.
- El significado de la simbología C_b , C_x y C_o está descrito en el capítulo II.
- Los rangos de trabajo se calcularon de la siguiente manera:

Fracción de trabajo

$$F \text{ inicial} = 0,05$$

$$F \text{ final} = 0,99$$

- Para determinar los valores de C_b y C_x se multiplican la fracción por la concentración C (meq boro/L).

Dónde:

$$C_b = 5,55 \times 0,05 = 0,2775$$

$$C_x = 5,55 \times 0,99 = 5,4945$$

- En la columna (5) se listan los valores de C_e que es la concentración de equilibrio de soluto en la solución correspondiente a una concentración adsorbida q.

- La concentración de equilibrio se calculó de la siguiente manera.
- Ecuación de la isoterma de Langmuir:

$$q = \frac{q_0 k C}{1 + k C} \longrightarrow q = \frac{175,4386 C}{1 + 53,5614 C}$$

$$q_0 = 3,2754$$

$$k = 53,5614$$

Ecuación de la línea de operación: $q = aC$

$$a = 0,5935$$

Se hace una igualación y se despeja C_e , teniendo:

$$q_e = q$$

$$\frac{q_0 k C_e}{1 + k C_e} = a C$$

$$C_e = \frac{a C}{k(q_0 - a C)}$$

- En la columna (6) se listan los valores de $(C - C_e)^{-1}$, el término $(C - C_e)$ representa la diferencia entre una línea de operación y la curva de equilibrio o (isoterma de adsorción).
- La columna (3) se calcula a partir de las columnas 1 y 2.
- En la columna (7) se listan los valores de $\int_{C_b}^C (C - C_e)^{-1} dC$, se integran gráficamente entre C_b y cada valor de C .

- En la columna (8) se listan los valores de $\frac{W - W_B}{W_E - W_B}$, dividiendo los datos de la columna (7) por el último valor de esta columna.
- En la columna (9) se listan los valores de C/C_o , dividiendo los datos de la columna (8) por el valor de $C=5,550$. La cual se representa gráficamente en función de los datos de la columna (8).

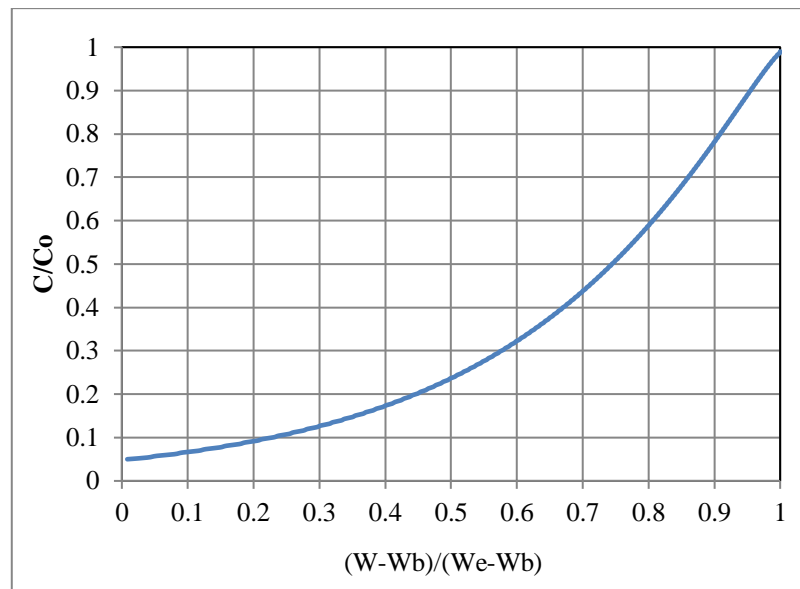


Figura 32. Curva calculada de saturación

Fuente: Elaboración propia

- En la Figura 32 se observa el comportamiento de saturación de la resina, desde el inicio de la adsorción hasta llegar a su saturación completa.
- En la columna (10) se listan los valores de $(1 - (C/C_o))$, este valor se calcula utilizando la columna (9).

- Todos estos cálculos son necesarios para poder predecir el comportamiento de la curva de avance, calcular la capacidad fraccionaria y las unidades de transferencia.
- Para facilitar los cálculos se utilizó un programa en Excel y a continuación se muestran las siguientes gráficas:

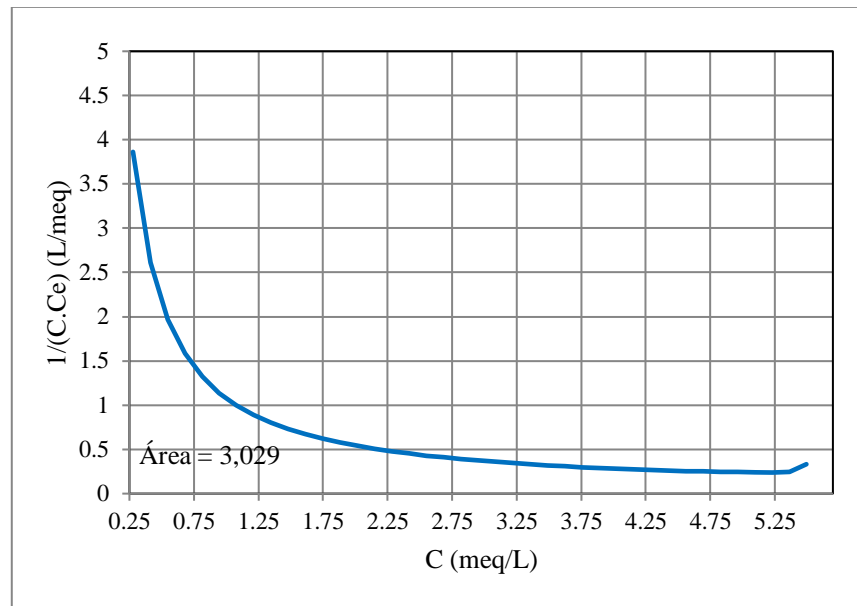


Figura 33. Área bajo la curva (unidades de transferencia)

Fuente: Elaboración propia.

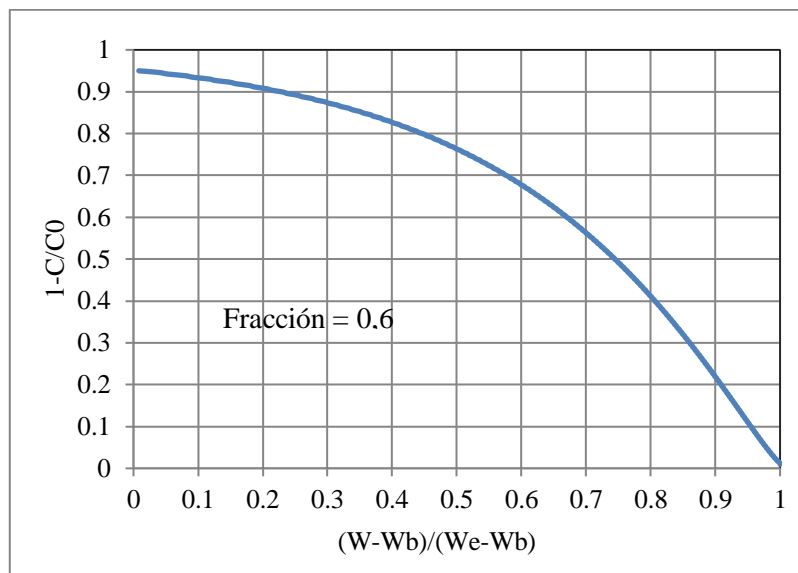


Figura 34. Fracción adsorbida en la zona de intercambio

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Curvas de avance

Para los caudales de 3, 7 y 11 ml/min se escogieron las 3 mejores curvas de avance; se obtuvo un promedio de las tres curvas y se ajustó con una ecuación empírica. Para ajustar las curvas de avance se utilizó el software Sigma Plot, con el cual se probaron varias ecuaciones y se escogió la que mejor se ajustaba a los datos experimentales, teniendo un coeficiente de correlación muy cercano a uno.

La ecuación que se utilizó para ajustar las curvas de avance es del tipo logística, con cuatro parámetros.

$$Y = y_o + \left[\frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_o} \right)^b} \right]$$

Dónde:

a, b, x_o, y_o : son constantes

x: tiempo (min)

A continuación, se muestran las gráficas de las curvas de avance para los caudales de trabajo y su comparativa con los datos experimentales y los datos del laboratorio acreditado SGS del Perú S.A.C. En el anexo 5 se muestran los valores obtenidos experimentalmente para cada curva de avance.

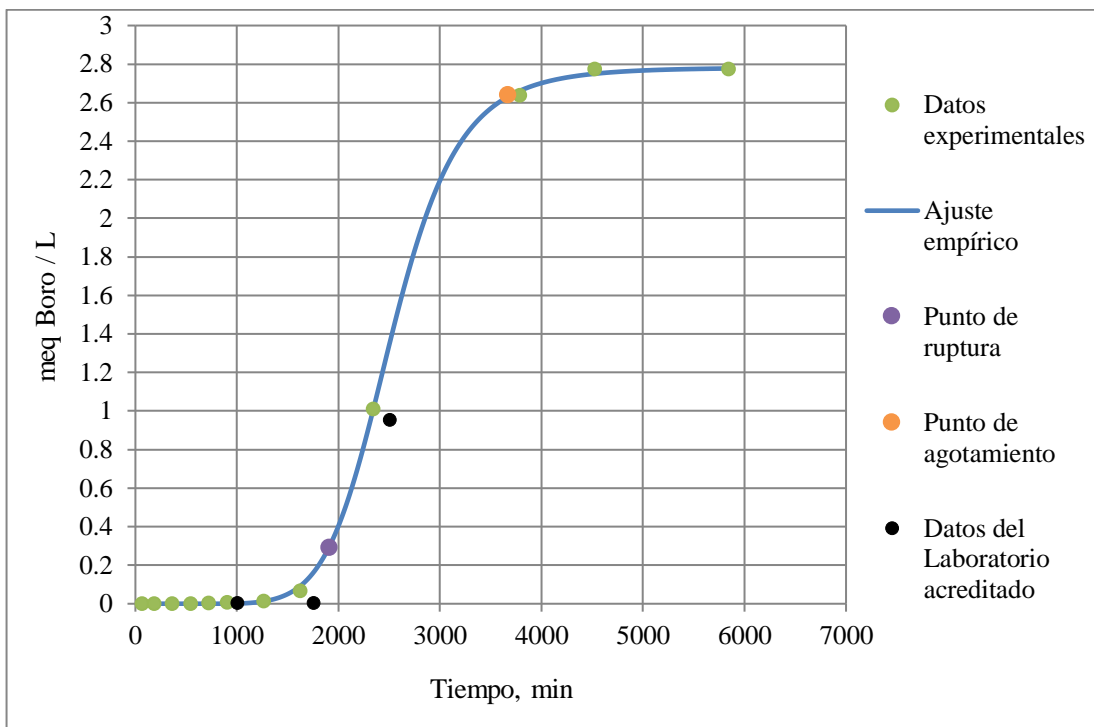


Figura 35. Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 3 ml/min

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta gráfica de la curva de avance se puede determinar lo siguiente:

- Tiempo de operación: 5840 min / 97 h 33 min
- Cantidad de agua a tratar, L: 17,52
- Tiempo hasta el punto de ruptura, min: 1910 min / 31 h 50 min
- Agua producida, hasta el punto de ruptura, L: 5,73

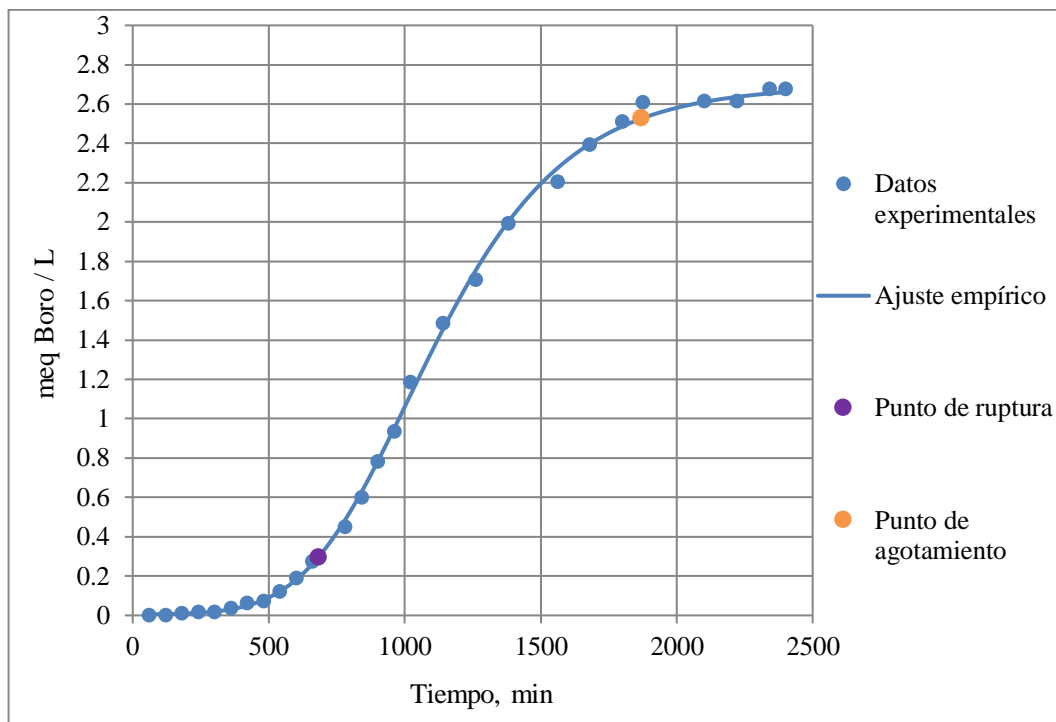


Figura 36. Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 7 ml/min

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta gráfica de la curva de avance se puede determinar lo siguiente:

- Tiempo de operación: 2410 min / 40 h 17 min
- Cantidad de agua a tratar, L: 16,870
- Tiempo hasta el punto de ruptura, min: 682 min / 11 h 22 min
- Agua producida, hasta el punto de ruptura, L: 4,774

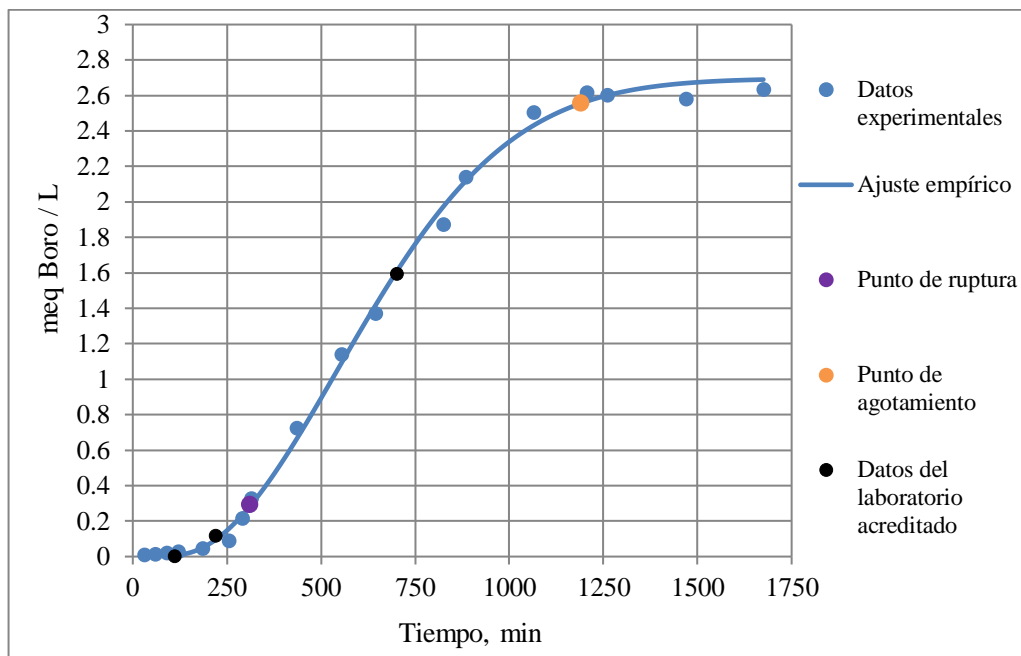


Figura 37. Curvas de avance experimental y curva de avance ajustada para un caudal de 11 ml/min

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta gráfica de la curva de avance se puede determinar lo siguiente:

- Tiempo de operación: 1675 min / 27 h 55 min
- Cantidad de agua a tratar, L: 18,425
- Tiempo hasta el punto de ruptura, min: 312 min / 5 h 12 min
- Agua producida, hasta el punto de ruptura, L: 3,432

4.2.5. Determinación de la longitud y profundidad de la zona de intercambio

Para los cálculos se utilizaron las ecuaciones del capítulo II [22], [23], [24]. [25] y [26].

Para el cálculo de estas ecuaciones se utilizó el software Excel, en el anexo 6 se muestran los datos ajustados de las curvas de avance.

i. Cálculo de la altura de la zona de intercambio con un caudal de trabajo de 3 ml/min

- El tiempo equivalente a la capacidad total o estequiometrica t_d .

Donde:

t_d : 3670 min (tiempo de agotamiento)

$$t_i = \int_0^{t_d} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt$$

$t_i = 2542,24$ min

- El tiempo equivalente a la capacidad utilizable, o el tiempo en el cual la concentración del efluente alcanza su máximo nivel permisible t_u .

Donde:

t_b : 1910 min (tiempo de ruptura)

$$t_t = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt$$

$$t_t = 1875,13 \text{ min}$$

- Las integrales gráficas de estas ecuaciones se resolvieron con ayuda del software Excel, en el anexo 4 se muestran los datos ajustados de las curvas de avance.
- Cálculo de la longitud del lecho utilizado hasta el punto de ruptura

H_B .

$$H_B = \frac{t_u}{t_t} H_T$$

Donde:

H_T : es la longitud total del lecho; 0,15

t_t : tiempo equivalente a la capacidad total; 2542,24 min

t_u : tiempo equivalente a la capacidad utilizable; 1875,13 min

$$H_B = \frac{1875,13}{2542,24} (15)$$

$$H_B = 11,06 \text{ cm}$$

- Cálculo de la longitud del lecho no usado H_{UNB}

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_T$$

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{1875,13}{2542,24}\right)(15)$$

$$H_{UNB} = 3,94 \text{ cm}$$

- Cálculo de la longitud total del lecho H_T .

$$H_T = H_{UNB} + H_B$$

$$H_T = 3,94 + 11,06$$

$$H_T = 15 \text{ cm}$$

ii. Cálculo de la altura de la zona de intercambio con un caudal de trabajo de 7 ml/min

- Siguiendo la misma secuencia se puede calcular los demás datos para los diferentes caudales de trabajo, que se muestran a continuación:

- Rangos de integración:

t_b : tiempo del punto de ruptura; 682 min.

t_d : tiempo del punto de agotamiento; 1870 min.

- El tiempo equivalente a la capacidad total o estequiometrica $t_t = 1100,32$ min.
- El tiempo equivalente a la capacidad utilizable $t_u = 676,74$ min
- Cálculo de la longitud del lecho utilizado hasta el punto de ruptura

$$H_B = 9,23 \text{ cm}$$

- Cálculo de la longitud del lecho no usado $H_{UNB} = 5,77$ cm
- Cálculo de la longitud total del lecho $H_T = 15$ cm

iii. Cálculo de la altura de la zona de intercambio con un caudal de trabajo de 11 ml/min

- Rangos de integración:
- t_b : tiempo del punto de ruptura; 312 min.
- t_d : tiempo del punto de agotamiento; 1190 min.
- El tiempo equivalente a la capacidad total o estequiometrica $t_t = 634,87$ min.
- El tiempo equivalente a la capacidad utilizable $t_u = 316,34$ min
- Cálculo de la longitud del lecho utilizado hasta el punto de ruptura
 $H_B = 7,47$ cm
- Cálculo de la longitud del lecho no usado $H_{UNB} = 7,53$ cm
- Cálculo de la longitud total del lecho $H_T = 15$ cm
- En la siguiente tabla se muestran los datos de la altura de la zona de intercambio para los tres caudales de trabajo.

Tabla 21

Altura de la zona de intercambio para los caudales de trabajo

Caudales de Trabajo	3 ml/min	7 ml/min	11 ml/min
t_t (min)	2542,24	1100,32	634,87
t_u (min)	1875,13	767,74	316,34
H_B (cm)	11,06	9,23	7,47
H_{UNB} (cm)	3,94	5,77	7,53
H_T (cm)	15	15	15

Fuente: Elaboración propia.

4.2.6. Determinar la masa de la zona de intercambio

- Cálculo de la masa de la zona de intercambio para una altura de, $H_{UNB} = 3,94$ cm. Utilizando la ecuación [49].

$$m = \rho \times A \times h$$

Dónde:

ρ : Densidad de la resina, g/cm^3 : 0,6916

A: área de la resina, cm^2 : 1,767

h: altura de la zona de intercambio cm: 3,94

$$m = 0,6916 \times 1,767 \times 3,94$$

$$m = 4,81 \text{ g}$$

- Para una $H_{UNB} = 5,77$ cm, la masa de la altura de la zona de intercambio es 7,06 g.
- Para una $H_{UNB} = 7,52$ cm, la masa de la altura de la zona de intercambio es 9,20 g.

4.2.7. Determinación del coeficiente global de transferencia de masa

- Weber (1979), indica que el coeficiente de transferencia de masa global se puede determinar con la siguiente ecuación:
- Para un caudal de 3 ml/min

$$m = \frac{\rho_p \rho_1 Q}{k^o \alpha} \int_{c_1}^{c_2} \frac{dC}{(C - C_e)}$$

$$k^o = \frac{\rho_p \rho_1 Q}{\alpha m} \int_{c_1}^{c_2} \frac{dC}{(C - C_e)}$$

Dónde:

m: masa de la zona de intercambio, 4,81 g

ρ_p : densidad de relleno de la resina en la columna, 0,6916 g/cm³

ρ_1 : densidad de la fase fluida, 1 g/cm³.

α : área superficial de la resina por unidad de volumen de lecho, cm⁻¹

$$\alpha = \frac{1,767}{21,75} = 0,081$$

Q: caudal, 0,18 L/h.

$$\int_{c_1}^{c_2} \frac{dC}{(C - C_e)} = 3,2647$$

k^o : Coeficiente global de transferencia de masa, L g resina /h cm²

$$k^o = \frac{(1)(0,6916)}{0,081} \left(\frac{0,18}{4,81} \right) x 3,2647$$

$$k^o = 0,0258 \text{ L g resina / h cm}^2$$

- Para un caudal de 7 ml/min (0,42 L/h) se tiene un coeficiente global de transferencia de masa.

$$k^o = \frac{(1)(0,6916)}{0,081} \left(\frac{0,42}{7,06} \right) x 3,2647$$

$$k^o = 0,021 \text{ L g resina / h cm}^2$$

- Para un caudal de 11 ml/min (0,66 ml/s) se tiene un coeficiente global de transferencia de masa.

$$k^o = \frac{(1)(0,6916)}{0,081} \left(\frac{0,66}{9,20} \right) x 3,2647$$

$$k^o = 0,013 \text{ L g resina / h cm}^2$$

4.2.8. Comparación de la curva regenerada con la curva de resina nueva

Siguiendo el procedimiento de la Tabla 14, para el lavado, regeneración y enjuague de la resina; y teniendo las especificaciones calculadas en el capítulo 3, punto 3.4.2. E x, xi y xii; se realiza la regeneración de la resina; se realiza una prueba con el agua cruda que se está trabajando (proveniente del distrito de Ite) para un flujo de 11 ml/min,

para comparar si su capacidad de adsorción se mantiene; obteniendo el siguiente resultado:

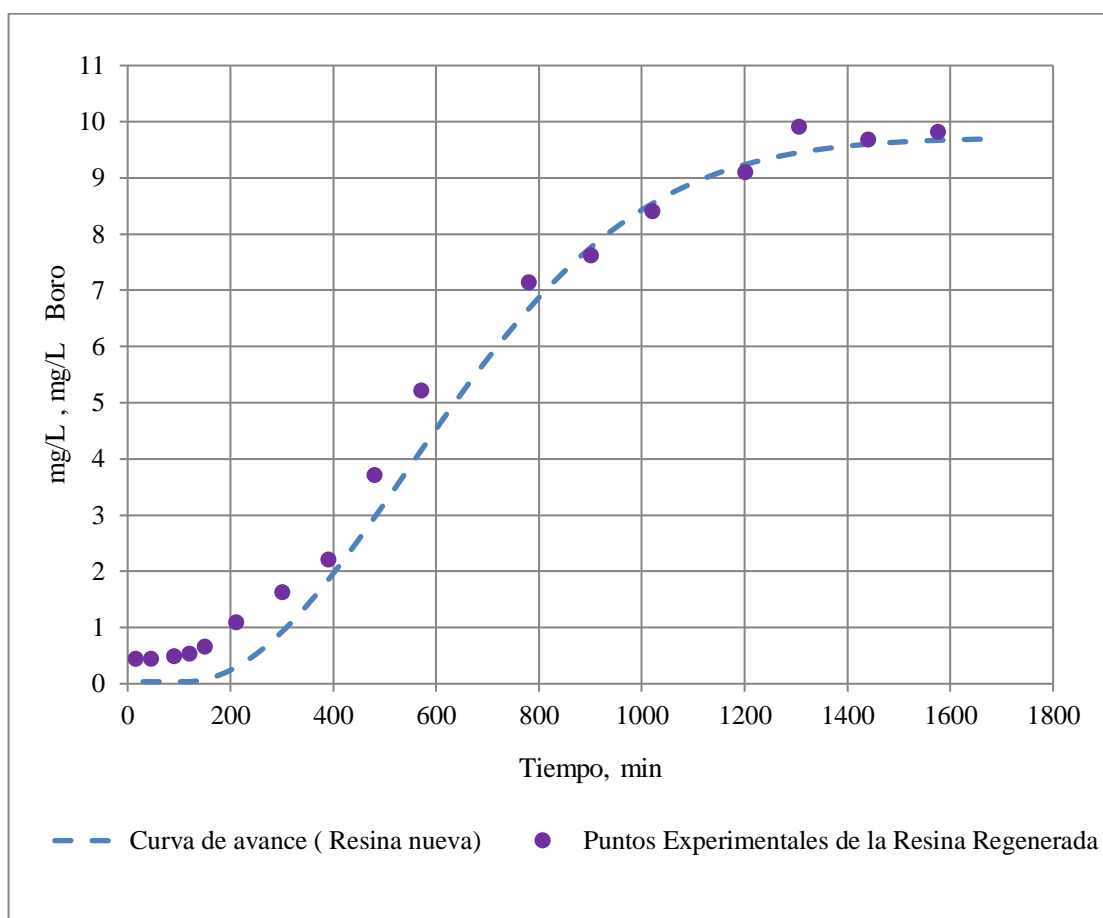


Figura 38. Comparación curva de avance regenerada y curva de avance nueva

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 39, la resina regenerada, mantiene su tendencia de adsorción sin mucha variación; según García (2000), la resina Amberlite IRA 743, puede ser regenerada hasta 1000 veces manteniendo su

capacidad de adsorción sin una variación significativa, siendo esto un factor primordial para su sostenibilidad y factibilidad económica en el tiempo.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Sobre la calidad de la resina

En la parte experimental, la capacidad útil de la resina es de 0,277 miligramos de boro / ml de resina equivalente, lo que concuerda con García (2000), que obtuvo un valor de 0,23 miligramos de boro equivalente / ml de resina; y el valor de la capacidad de intercambio especificado por el fabricante. (0,7 mg al comparar el equivalente boro / ml de resina), el resultado de capacidad obtenido es aproximadamente el 40% del valor teórico, este dato se considera bueno, ya que el tipo de cambio de capacidad suele ser aproximadamente el 50% del valor teórico.

Con respecto a la granulometría de la resina, el valor encontrado para el coeficiente de uniformidad experimental es 1,47, un valor muy cercano al del valor especificado por el fabricante que es 1,6, teniendo una porosidad de 0,347.

Con respecto a la densidad aparente calculada, 0,6916 g/ml, este dato obtenido concuerda con García (2000) quien obtuvo $0,68 \text{ g/cm}^3 \approx 0,68 \text{ ml}$; al comparar la densidad aparente con el especificado por el fabricante que

oscila entre 0,64 a 0,78 g/cm³ ≈ g/ml, se tiene la densidad experimental dentro del rango establecido por el fabricante.

4.3.2. Sobre la velocidad de retrolavado para una expansión del 50 %

A continuación, se muestra un cuadro donde resumen los cálculos teóricos en el ítem (3.2.2.viii) y el valor encontrado en la columna de intercambio iónico.

Tabla 22

Comparación de las velocidades de lavado teórica y experimental

Teórica	Experimental
15,6 ml/min	20 ml/min

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 22, el valor teórico difiere del valor experimental, esto puede explicarse debido a que el lecho no es uniforme y se estratifica durante el retrolavado, quedando las partículas pequeñas en la parte superior del lecho del intercambiador iónico y las más grandes cerca al fondo, existiendo aparentemente una interferencia de las partículas pequeñas al no dejar que las grandes se expandan libremente.

Por consiguiente, esto trae como consecuencia una menor expansión de las partículas grandes; este suceso es mayor pronunciado si el

coeficiente de uniformidad es mayor; esto quiere decir que el lecho de intercambio tiene mayor variedad de tamaño de partículas.

4.3.3. Sobre la pérdida de carga al inicio del proceso de intercambio

A continuación, se muestra los datos teóricos proyectados y los datos obtenidos en la columna de intercambio iónico.

Tabla 23

Comparativo entre las pérdidas de carga iniciales teóricas y experimentales

Caudal ml/min	Altura del lecho (m)	h, Kozeny (m)	h, Experimental (m)
3	0,15	0,021	0,03
7	0,15	0,048	0,06
11	0,15	0,076	0,15

Fuente: Elaboración propia.

Como se observan en la Tabla 23, los datos experimentales son más altos que los valores teóricos, como se puede apreciar en la Tabla 11 del capítulo III, el lecho de intercambio no es uniforme, la pérdida de carga experimental es alta debido a que no tiene un lecho de intercambio homogéneo, ocasionando esto una mayor caída de presión y una interferencia en el paso del flujo, estos valores se acercarán más cuando se utilizan medios granulares uniformes en el lecho de intercambio.

4.3.4. Sobre el diseño de la columna de intercambio iónico

A continuación, se muestra los valores experimentales del volumen total de agua para la construcción de las curvas de avance a diferentes flujos; también se muestra la cantidad de agua que se obtiene en cada curva hasta llegar al límite máximo permisible de 1 mg/L y su respectivo tiempo de operación.

Tabla 24

Comparativo de los tiempos y volúmenes de agua a tratar, y experimentales

Caudales, ml/min	3	7	11	
Experimental	Volumen			
	de agua a tratar, L	17,52	16,87	18,42
	Tiempo de operación (h)	97,33	40,17	27,55
Volumen de agua obtenida hasta el punto de ruptura, L		5,73	4,75	3,43
Tiempo de operación hasta el punto de ruptura, h		31 h 83 min	11 h 37 min	5 h 2 min
Cantidad de resina, g			15	

Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos realizados en el capítulo III sobre el diseño del intercambiador se realizaron con la capacidad útil teórica.

Como se puede observar en la Tabla 24, los valores experimentales son altos en comparación con los de la Tabla 12, esto es debido a que para los cálculos teóricos se utilizó la capacidad útil de la hoja de información del producto que es un valor ideal. Por lo tanto, no es lo mismo agregar una pequeña cantidad de resina en un vaso precipitado con agua y dejar que el proceso de intercambio se realice, al tener la resina en una columna de intercambio iónico, y que el agua pase por el lecho de la resina, esto traerá como consecuencia menos tiempo de contacto y por lo tanto, menos eficiencia de intercambio, debido a que el agua no rodea toda la superficie de la partícula de la resina, y no logra el intercambio de meq teórico, esto sucede porque en la columna la resina está compactada y el agua pasa por los espacios entre las partículas de la resina.

También, en la Tabla 24 se observa que para una cantidad de resina constante (15 gramos), y variando el flujo de alimentación; el volumen que se obtiene hasta llegar al punto de ruptura aumenta conforme se disminuye el flujo, pero aumenta el tiempo de operación; comparando con los diferentes flujos el volumen de agua obtenido es casi constante variando el flujo, sin embargo, el tiempo

varía significativamente, siendo alto para un flujo menor y bajo para un flujo mayor.

4.3.5. Sobre las curvas de avance.

A continuación, se muestran las tres curvas de avance obtenidas en la columna, a diferentes caudales manteniendo constante la altura de lecho y la concentración inicial de agua; para mantener una uniformidad en la figura se graficó el tiempo de saturación vs la concentración inicial entra la concentración de salida.

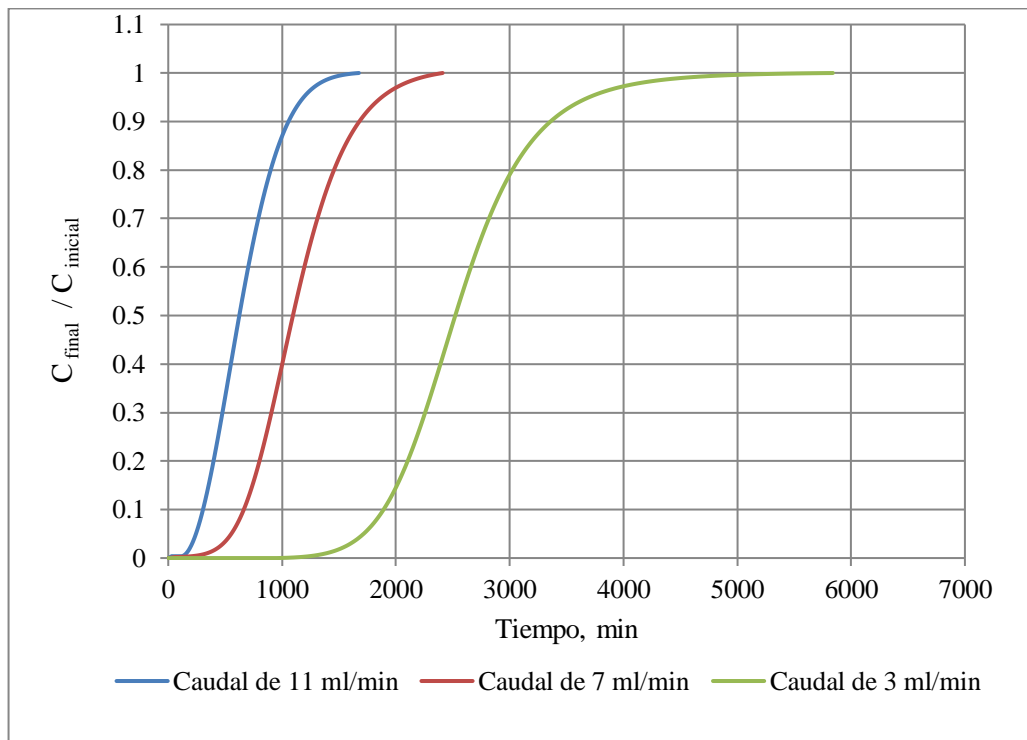


Figura 39. Comparación de las curvas de avance

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de avance para intercambio iónico toman la forma de una S, debido a que la concentración en el efluente es casi cero hasta un tiempo de ruptura; a partir de este tiempo el intercambio no es eficiente y empieza a subir la concentración hasta igualar a la concentración de la alimentación, por lo tanto, la curva empieza a levantarse hasta un tiempo de agotamiento.

También se puede observar que las curvas de avance tienen una zona de transferencia de masa relativamente estrecha, en relación a la longitud total; se concuerda con los autores Marín (2011) y García (2000), en el comportamiento de las curvas de avance, manteniendo la forma de una S, estos autores trabajaron con una masa de resina de 5 g y 50 g respectivamente y con agua preparada a una concentración conocida de boro.

La curva de equilibrio observada en la Figura 29, se ajusta a la isoterma de Langmuir; según la Figura 14 el comportamiento del ajuste de la curva de equilibrio indica que es un proceso altamente favorable para el intercambio, concordando así con el autor García (2000), quien obtiene el mismo resultado indicando que el comportamiento de la curva de equilibrio es altamente favorable, ajustando el modelo a una isoterma de Langmuir.

Comparando los tiempos de intercambio en las curvas de avance, se tiene que para el caudal de trabajo de 3 ml/min, la curva de avance duró más tiempo con respecto a las otras dos, esto es debido a que la zona de transferencia tiene más tiempo de contacto con la resina mientras esta pasa por todo el lecho de intercambio, ya que la zona de intercambio es más pequeña y constante.

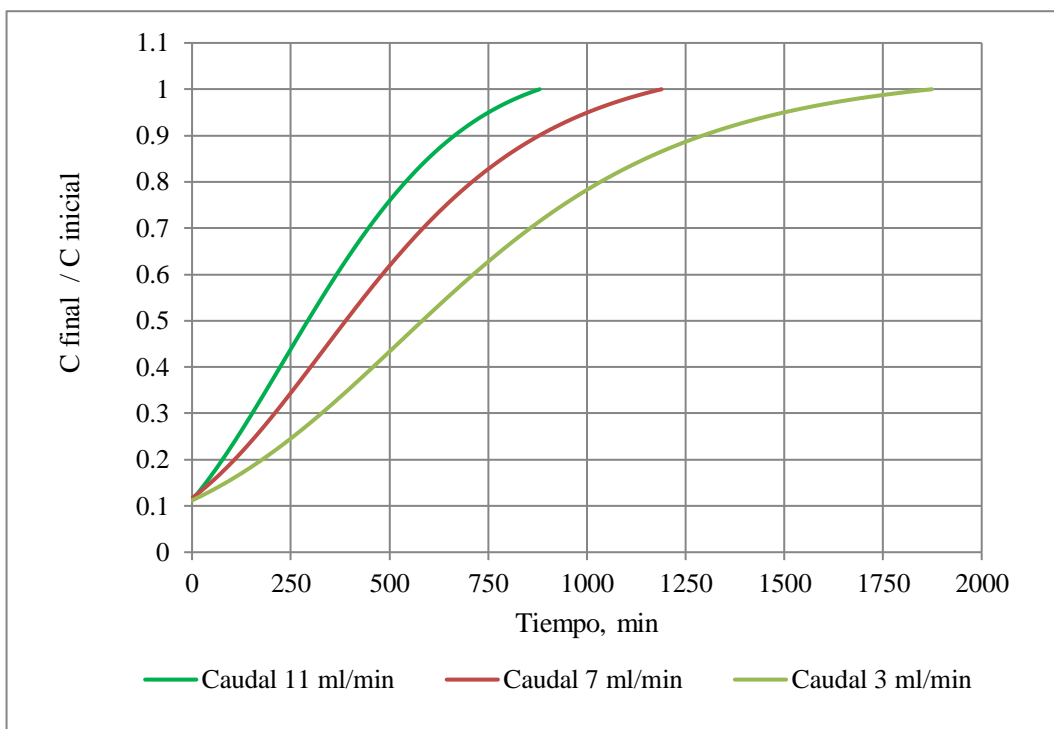


Figura 40. Curvas de avance a partir del punto de ruptura

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40 se muestran las tres curvas de avance a partir del punto de ruptura hasta el punto de agotamiento, las curvas que adquieren una tendencia más vertical son las que presentan un menor tiempo de

ruptura y un menor tiempo de agotamiento, por lo tanto, para un caudal de 3 ml/min la altura de la zona de intercambio es menor y para un caudal de 11 ml/min la altura de la zona de intercambio es mayor y la forma de la curva de avance entre el punto de ruptura y punto a de agotamiento es más extendida; esto sucede debido a que el tiempo de contacto del afluente con la resina es menor y por lo tanto, la saturación es lenta.

4.3.6. Sobre el coeficiente global de transferencia de masa

En la siguiente gráfica se observa que, para un mayor caudal, la altura de la zona de intercambio aumenta.

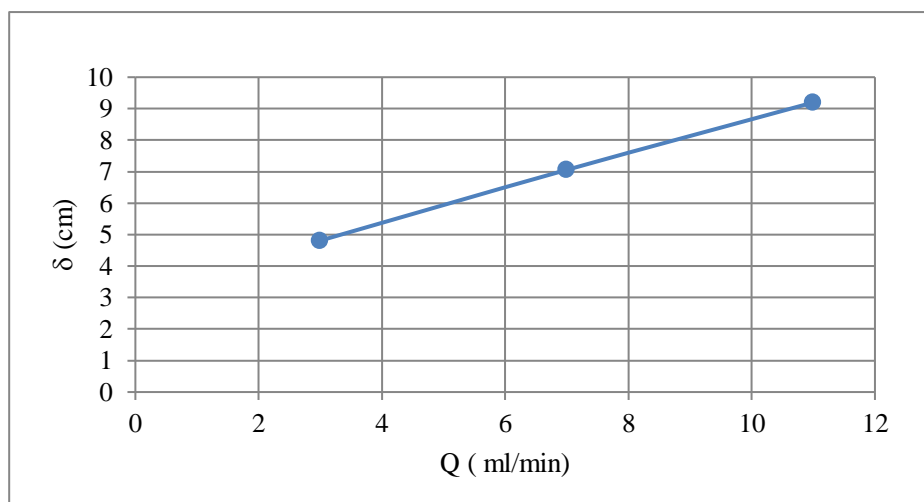


Figura 41. Altura de la zona de intercambio a diferentes caudales.

Fuente: Elaboración propia.

Para coeficientes de transferencia de masa más altos, la longitud de la zona de adsorción es más corta, lo que significa que la zona tarda más en llegar al fondo del lecho y alcanzar el punto de ruptura. Sin embargo, a medida que

la zona de adsorción se acorta, el tiempo de agotamiento se acorta.

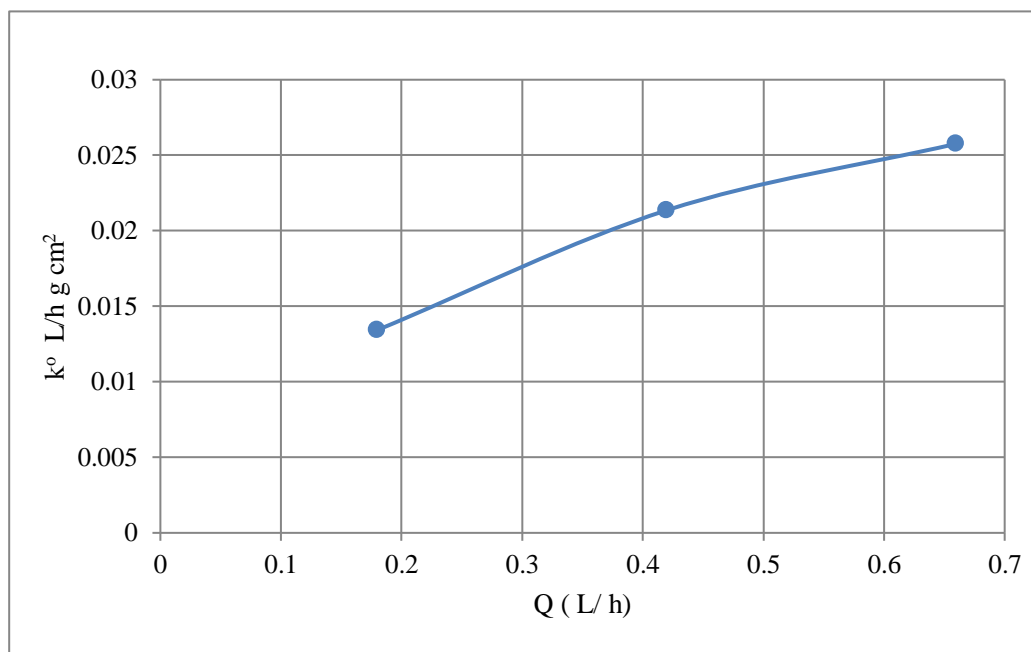


Figura 42. Coeficiente global de transferencia de masa para diferentes flujos.

Fuente: Elaboración propia.

La rapidez de intercambio depende de la velocidad del fluido y de la concentración del soluto, a mayor concentración a la entrada de la columna y velocidad de fluido, el coeficiente de transferencia de masa aumenta. Los comportamientos de las curvas de avance tendrán un carácter más vertical.

Según Guevara (2006), el coeficiente de transferencia de masa es la rapidez con la cual un componente se transfiere de una fase a otra, la transferencia termina cuando se alcanza el equilibrio.

4.4. Propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico

Para la propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico destinada para remover el boro de un agua destinada para la agricultura, primero se tiene en cuenta el volumen de agua a utilizar en el regadío; teniendo en cuenta los principales cultivos en el distrito de Ite, para ello se plantean los siguientes supuestos, según (Sánchez & Pezzola, 2013):

Riego por goteo en el cultivo de la cebolla

- Superficie total: 1 hectárea (10 000 m²)
- Caudal de entrega por goteo: 1,8 – 2,0 L/h \approx 30 – 33,33 ml/min
- Días de ciclo completo: 145 días \approx 4 meses y 25 días \approx 5 meses
- Horas de riego por ciclo: 141 horas
- Volumen a utilizar por ciclo: 1310 L

Para un ciclo de 5 meses se utiliza 1310 Litros de agua para riego tecnificado, entonces en 1 mes se utiliza 262 Litros, se proyecta la columna de intercambio para que funcione cada semana, entonces el volumen proyectado será de 65,5 L redondeando a 67 L por semana; esta elección se realiza debido a que el agua no pudo acondicionarse mucho tiempo, ya que varían sus propiedades y puede afectar al cultivo.

Entonces se tiene:

- Volumen a utilizar por semana: 67 Litros

- Regeneración de la resina: 20 veces

4.4.1. Masa de la resina

Se procede a calcular los miliequivalentes de boro presentes en el volumen de agua que se quiere obtener (concentración inicial).

$$67 \text{ L} \times \frac{2,7 \text{ meq Boro}}{\text{L}} = 180,90 \text{ meq Boro}$$

Como se quiere obtener una calidad de agua de acuerdo a la normativa vigente para el regadío de cultivos, se tiene que el límite máximo permisible expresado en miliequivalentes es 0,278 meq Boro / L; entonces para 67 litros de agua se tiene:

$$67 \text{ L} \times \frac{0,278 \text{ meq Boro}}{\text{L}} = 18,626 \text{ meq Boro}$$

Entonces lo que se quiere obtener es 67 Litros de agua con una calidad de 18,626 meq Boro; se obtiene la diferencia de miliequivalentes de entrada y salida para proyectar la cantidad de resina que se utilizará, teniendo en cuenta que la capacidad útil experimental de la resina es 0,27 meq Boro / g resina.

$$C_{inicial} - C_{final} = 180,90 \text{ meq B} - 18,626 \text{ meq B} = 162,27 \text{ meq B}$$

$$162,27 \text{ meq B} \times \frac{\text{g resina}}{0,27} = 601 \text{ g resina}$$

- **La masa de la resina es, 601 g.**

4.4.2. Volumen de resina

Como se trabajó con una masa de 601 g de resina, utilizando la densidad de la resina se obtuvo el volumen:

$$601 \text{ g de resina} \times \frac{\text{ml de resina}}{0,6916 \text{ g de resina}} = 869 \text{ ml de resina}$$

- **El volumen de la resina es, 869 ml.**

4.4.3. Caudal de intercambio

- De la hoja de especificación se tiene la condición de operación, flujo de 4 a 30 BV/h.
- El caudal se expresa en volúmenes por hora (Vol/h o BV/h), es decir en litros de solución por litro de resina por hora.
- Entonces, se proyecta el flujo en base a la cantidad de resina que se utilizará, siendo 601 gramos de resina Amberlite IRA 743, teniendo 869 ml.

Entonces

Flujo mínimo de trabajo:

$$4 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 4 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 869 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 58 \text{ ml / min}$$

Flujo máximo de trabajo

$$30 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 30 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 869 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 435 \text{ ml / min}$$

- **En base a este rango se plantea trabajar con el flujo máximo 435 ml/min.**

4.4.4. Área de intercambio

- El diámetro con el que se proyecta trabajar es de 8 cm, por lo tanto, el área de intercambio es de: $50,27 \text{ cm}^2 \approx 0,005027 \text{ m}^2$.
- **Se tiene que el área de intercambio es 0,005027 m².**

4.4.5. Cálculo de la altura del lecho de resina

Reemplazando en la ecuación [45], se tiene:

- Volumen de la resina: 869 cm^3
- Diámetro del lecho de intercambio: 8 cm

$$h = \frac{4 V}{\pi D^2} = \frac{4 (869 \text{ cm}^3)}{\pi (8 \text{ cm})^2} = 17,3 \text{ cm} \approx 0,173 \text{ m}$$

- **Se tiene que la altura del lecho de la resina es, 0,173 m.**

4.4.6. Tiempo de intercambio

Como se tiene que el volumen a tratar es de 67 Litros, y el caudal de intercambio de 435 ml/min, entonces se calcula el tiempo de intercambio.

$$67 \text{ L} \times \frac{\text{min}}{435 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{\text{L}} = 154 \text{ min} \approx 2 \text{ h } 34 \text{ min}$$

- **Tiempo de operación para obtener los 67 L, 154 min \approx 2h 34 min**

4.4.7. Cálculo de la pérdida de carga al inicio del intercambio

Se utiliza la ecuación [36] de Carmen Kozeny.

$$\frac{h}{L} = \frac{150v(1-\varepsilon)^2 V}{g\varepsilon_o^3 C_e^2} \sum \frac{x_i}{D_i^2}$$

Teniendo en cuenta:

- Porosidad inicial: 0,347
- Coeficiente de esfericidad: 1
- Temperatura, °C: 19
- Viscosidad cinemática, m²/s = 1,054x10⁻⁶ = 1,054x10⁻² cm²/s.
- Aceleración de la gravedad, cm/s²: 981
- Altura del lecho, m: 0,17
- Velocidad de intercambio: caudal/ área: 8,65 cm/s

La pérdida de intercambio es: 0,124 m

4.4.8. Cálculo de la velocidad de lavado para una expansión determinada (50 %)

Para efectuar el lavado, se requiere un caudal que pueda fluidizar los gránulos de resina y así poder eliminar sólidos en suspensión y posibles aglomeramientos formadas durante el servicio.

Velocidad de levantamiento o velocidad de lavado, 410 ml/min

4.4.9. Cálculo de la pérdida de carga en el lecho de resina durante el lavado

Para este cálculo se utiliza la ecuación [27] descrita en el capítulo II.

Para una altura de 0,17 m.

$$\begin{aligned}\Delta P &= D(1-\varepsilon)(G_{s,m} - G_{s,w}) \\ \Delta P &= 0,17(1-0,347)(1,05-1) \\ \Delta P &= 0,006 \text{ m}\end{aligned}$$

4.4.10. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de regenerante

Para el caudal de regeneración se calculó a partir de la hoja de especificación del producto ver anexo N° 1, se tiene:

- Regeneración con ácido sulfúrico o ácido clorhídrico.
- Flujo recomendado: 1,5 a 2 BV/h,
- Flujo mínimo

$$1,5 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 1,5 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}}$$

$$1,5 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 869 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 21,73 \text{ ml / min}$$

- Flujo máximo

$$2 \frac{\text{BV}}{\text{h}} \gg 2 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}}$$

$$2 \frac{\text{ml solución}}{\text{ml resina.hora}} \times 869 \text{ ml resina} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 28,97 \text{ ml / min}$$

- La regeneración se proyecta a trabajar con un flujo, $28,97 \approx 29$ ml/min.
- Tiempo de regeneración, 30 min.
- Volumen de regenerante, ml: 870 ml de regenerante.
- Concentración del regenerante: H_2SO_4 al 5 %

4.4.11. Cálculo de la velocidad, tiempo y cantidad de agua de enjuague

Para este cálculo se consideró lo siguiente:

Retrolavado con Hidróxido de sodio

- Concentración de 2,5 %.
- Tiempo de contacto, 45 min
- Flujo de retrolavado, 2 a 3 BV/h ≈ 29 ml/min a 44 ml/min; se proyecta utilizar un flujo de 44 ml/min.
- Volumen del hidróxido de sodio, ml: 1980 ml.

Lavado de la resina con agua destilada

- Caudal de enjuague 2 BV/h ≈ 29 ml/min
- Tiempo de lavado, min: 40.
- Volumen, ml: 1160 ml.

4.4.12. Cálculo de la altura del lecho expandido

Para el cálculo de la expansión del lecho se utilizó la ecuación [46], para una altura de 0,17 m.

Entonces:

$$L_e = (\varepsilon + 1)L$$

$$L_e = (0,50 + 1)0,17 = 0,26 \text{ m}$$

- **Altura con el lecho expandido 50 %, 0,26 m**

4.4.13. Altura de la columna de intercambio

Utilizando la ecuación [47], se tiene:

- Altura de lecho de resina: 0,17 m
- Altura del 50 % de expansión= 0,26 m
- Altura de la carga hidráulica= 0,74 m

Entonces

$$H_{CI} = H_R + H_E + H_A$$

$$H_{CI} = 0,17 + 0,09 + 0,74$$

$$H_{CI} = 1 \text{ m}$$

Se dará un borde libre de seguridad del 15 %, con esto se tiene: $H_{CI} =$

1,15 m

- **Altura de la columna de intercambio, 1,15 m**

Tabla 25*Datos de la propuesta de diseño de la columna de intercambio*

Diseño de la Columna de intercambio		
Volumen a tratar, L		67
Diámetro de la columna, m		0,08
Volumen de la Resina, L		0,869
Masa de la resina, kg		0,601
Caudal de trabajo, ml/min		435
Altura de la columna de intercambio, m		1,15
Caudal de trabajo para expansión de 50 %, ml/min		410
Tiempo de operación	Minutos	154
	Horas	2 horas, 34 minutos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Datos de la propuesta de diseño de los regenerantes de la columna de intercambio

Regeneración: Ácido Sulfúrico (contracorriente)	
Caudal, ml/min	29
Tiempo, min	30
Volumen, ml	870
Concentración, %	5
Hidróxido de Sodio (contracorriente)	
Caudal, ml/min	44
Tiempo, min	45
Volumen, ml	1980
Concentración, %	2,5
Agua destilada (contracorriente)	
Caudal, ml/min	29
Tiempo, min	40
Volumen, ml	1160

Fuente: Elaboración propia.

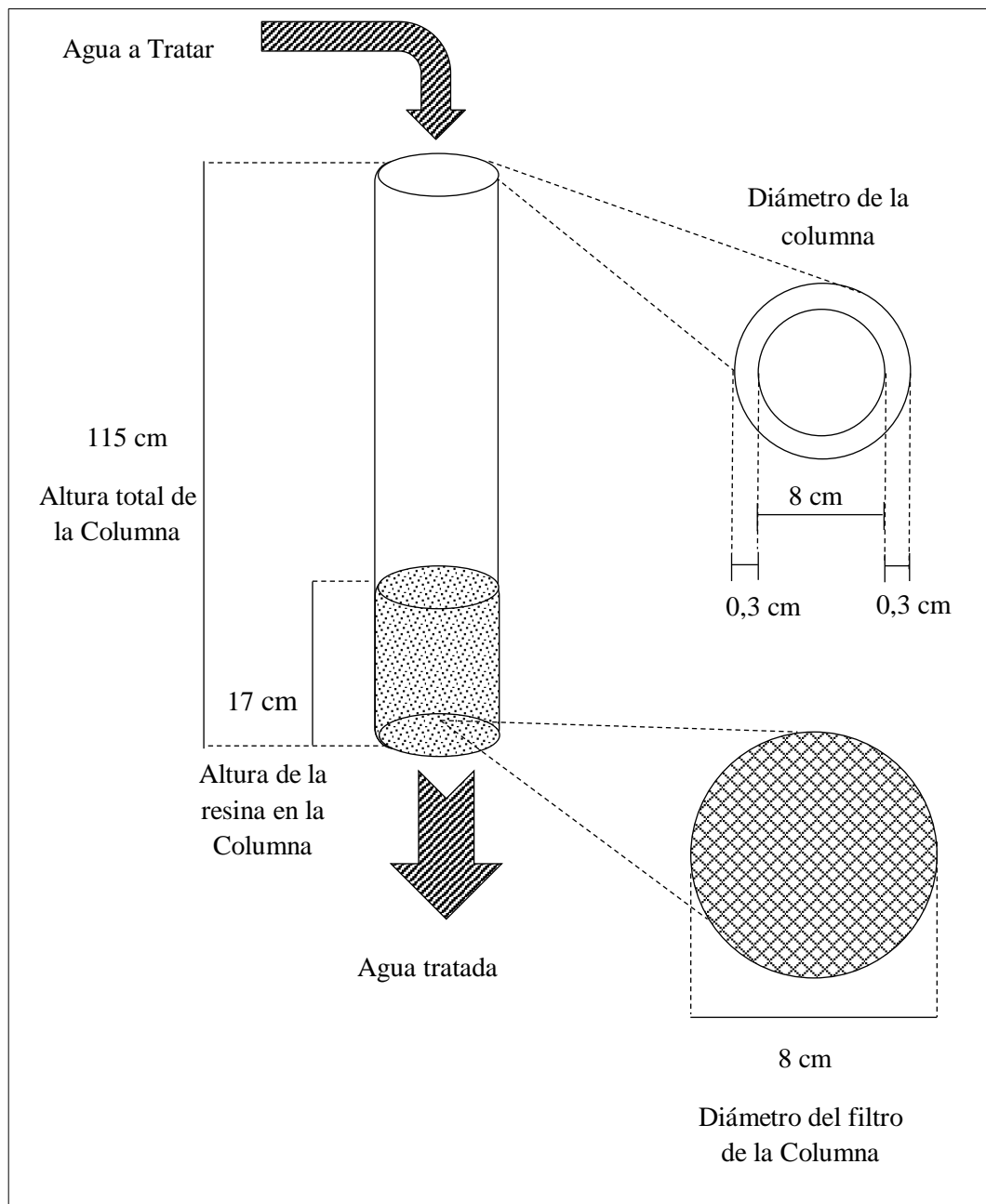


Figura 43. Propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se logró el estudio de la remoción de boro del agua destinada para la agricultura del distrito de Ite, utilizando 15 g de la resina Amberlite IRA 743, a diferentes caudales; 3 ml/min, 7 ml/min y 11 ml/min, siendo los valores mínimo, medio y máximo respectivamente.

Se mantuvo constante el pH entre los 7,5 a 7,7; la turbiedad menor a 5 NTU y la temperatura constante de 19 °C; logrando remover la concentración de boro de 9 mg/L a 0,1 mg/L, que está por debajo de los límites máximos permisibles establecidos según el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y su modificación D.S. N° 004-2017-MINAM, agua para regadío de cultivos; permitiendo así el diseño de una columna de intercambio iónico para el regadío de 1 hectárea de cebolla, para el distrito de Ite en el departamento de Tacna.

Se logró determinar la curva de equilibrio, la cual se ajusta a la isoterma de Langmuir, de donde se puede determinar la máxima capacidad que se puede intercambiar, y con la línea de operación se establecen las condiciones iniciales y finales de operación.

Se logró determinar las curvas de avance para los caudales de 3, 7 y 11 ml/min, con estos resultados es posible determinar tres parámetros de vital importancia, el primero de ellos es el tiempo de ruptura que es el

punto en el cual la concentración en el efluente alcanza el máximo valor permitido para cumplir con los requerimientos de la normativa, el segundo es el tiempo de agotamiento y el tercero es la altura de la zona de adsorción que es constante mientras viaja a través de la columna.

Se logró hacer la propuesta de diseño de una columna de intercambio iónico para obtener un volumen de 67 Litros de agua tratada, para el regadío de cebolla, llegando a los límites máximos permisibles para el regadío de cultivo (cebolla), utilizando 601 gramos de resina Amberlite IRA 743 con un tiempo de tratamiento de 2 horas y 34 minutos, para una altura de columna de 1,15 m y un caudal de 435 ml/min.

Referencias Bibliográficas

- American Water Works Association. (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua*. Manual de. McGraw Hill.
- ANA. (2013). *Plan de Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca Caplina - Locumba*. Tacna: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2016). *Informe Técnico del Monitoreo Participativo de Calidad de Agua Superficial del 2016-II en la Cuenca Locumba y Sama*. Tacna: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Arca, C. (2015). *Oferta técnico económica MC-1410-0099-DD-APO-001-B*, Pilotaje sistema ASBAR para abatimiento de arsénico y boro en Locumba.
- Ayildiz, H., & Kara, H. (2005). Boron removal by ion Exchange membranes. *Revista Desalination* 180, 99-108.
- Bartels, C., Franks, R., Rybar, S., Schierach, M., & Wilf, M. (2005). The effect of feed ionic strength on salt passage through reverse osmosis membranes. *Revista Desalination*, 185 - 195.
- Bonnet, J. C. (2001). *Predicción de curvas de avance en lechos de adsorción a partir de ecuaciones de transporte y de equilibrio*, departamento de termodinámica y fenómenos de transferencia. Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- C.Harris, D. (2007). *Análisis químico cuantitativo* - sexta edición. México: Reverté S.A.
- Chillón Arias, M. F. (2009). *Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación*. España, Alicante.
- Consorcio Río Locumba. (2017). *Estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos e infraestructura hidráulica para el plan de aprovechamiento en la cuenca del río Locumba, en la región de Tacna*. Tacna.
- D.C., A. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. *Revista New-York: Ed.Springer-Verlag*.
- Dirección Regional de Agricultura de Tacna. (2017). *Anuario Estadístico Agrícola - Tacna 2017*. Tacna: Dirección de Estadística Agraria.

- Domy, A. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. *Revistas New-York: Ed.Springer-Verlag.*
- G., W., S.J., C., & Mallo P. (1983). Temperature-jump rate study of chemical relaxation. *Revista Nouv. J. Chim.* 8, 373-379.
- García Soto, M. d. (2000). *Diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento para la eliminación de boro en vertidos.* Madrid.
- Geankoplis, J. (1998). *Procesos de transporte de operaciones unitaria.* México: Continental S.A. de C.V.
- Guevara Cancho, G. (2006). *Diseño, construcción y evaluación de una columna de intercambio catiónico ciclo sodio para el tratamiento de agua.* Tacna.
- Hermanek S. (1992). Boron chemistry - Monográfico. *Revista Chemical Reviews* 92, 175-325.
- Hyung, H., & Kim, J. (2006). Mechanistic study on boron rejection by sea water reverse osmosis. *Revista Journal of Membrane Science*, 269 - 278.
- INGEMMET. (2009). *Hidrogeología de la cuenca del Río Locumba.* Lima.
- Kere R, & Bingham F.T. (1985). Boron in water, soil and plants. *Revista J.Advances in Soil and plants*, 229-276.
- Keren, R., & Bingham, F. (1985). Boron in water, soil and plants. *Revista Adances in Soil Science*, 1, 229-276.
- Málave, A. (2005). Los suelos como fuente de boro para las plantas. *Revista Científica UDO*, 10-26.
- Marín Martínez, A. J. (2011). *Estudio de adsorción de Boro con Amberlite IRA 743.* España.
- Marinas, B. (1991). Reverse osmosis technology for wastewater reuse. *Revista Water Science and Technology*, 215 -227.
- Martín, M., & Marzal, P. (1997). *Modelación de la calidad del agua.* Valencia: Universidad Politécnica de Valenia.
- McCabe, W. (2001). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química - Sexta Edición.* México: McGrawHill.

- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (1993). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 5ta. Edición*. España: McGraw-Hill.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw.
- Mujal, V. F. (2007). *Patente n° WO2009022039 A1*. Estados Unidos.
- Muñoz Camacho, E. (2002). *Toxicidad del boro en las plantas*.
- Pastor Ferreira, O., Gomes de Moraes, S., Durán, N., & Cornejo, L. (2006). Evaluation of boron removal from water by hydrocalcite-like compounds. *Revista Chemosphere* 62, 80-88.
- Pieruz, G., Grassia, P., & Dryfe, R. (2004). Boron removal from produced water Facilitated ion transfer. *Revista Desalination* 167, 417.
- Ponce Ochoa, E. (2005). *Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada*. México: Universidad de las Américas Puebla.
- Portocarrero Osorio, C. R. (2018). *Validación de tres Métodos analíticos para la determinación del boro por espectrofotometría visible*. Arequipa - Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Redondo, J., Busch, M., & De Witte, J. (2003). Boron removal from seawater using FILMTEC high. *Revista Desalination*, 229-238.
- Rodionov, A., Voitova, O., & Romanov, N. (1991). The current state of the problem of the elimination of boron from waste waters. *Revista Russian Chemical Reviews*, 1271-1279.
- Rousseau R., W. (1987). *Handbook of Separation Process Technology*. McGrawHill.
- Sánchez, R. M., & Pezzola, N. A. (2013). *Riego por goteo en el cultivo de cebolla*. S/N, -.
- Schweitzer, P. (1996). *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers. Tird Edition*.
- Sekerka, I., & Lechner, J. (1990). Automated method for the determination of boron in water by flow-injection analysis with in-line preconcentration and spectrophotometric detection. *Revista Analytica Chimica Acta* 234., 199-206.
- Sinton, S. (1987). Complexation Chemistry of Sodium Borate with Poly (vinyl alcohol) and Small Diols. A ¹¹B NMR Study. *Revista Macromolecules*, 430-441.

- Su C., & Suarez, D. (1995). Coordination of adsorbed boro: a FTIR spectroscopic study. *Revista Environ.Sci. Technol.* 29, 302-311.
- Tapia, N. (2002). *Aplicaciones ambientales de la biotecnología en la industria: Adsorción y Biosorción, Mecanismos y principales modelos para describir el fenómeno de biosorción*, Proyecto Palma, PUCP.
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa segunda edición*. México: GcGrawHill.
- W.J.Weber, J. (1979). *Control de calidad del agua procesos fisicoquímicos*. España: ReverteS.A.
- WHO. (2004). *Guidelines for drinking-water quality, 3rd edition.Vol. 1. Recommendations*. World Health Organization.
- Yazicigil, Z., & Oztekin, Y. (2006). Boron removal by electro dialysis with anion-exchange membranes. *Revista Desalination* 190, 71 - 78.
- Zeebe R., Sanyal A., Ortiz J., & Wolf-Gladrow. (2001). theoretical study of the kinetics . *Revista Marine Chemistry* 73, 113-124.

Anexo

Anexo 1. Características de la resina Amberlite IRA 743

ROHM AND HAAS  | Industrial Processes

PRODUCT DATA SHEET

AMBERLITE™ IRA743 Chelating Resin

AMBERLITE IRA743 is a unique ion exchange resin specifically designed and used to remove boric acid and borate from water, magnesium brine or other solutions under a variety of conditions.

The presence of boron compounds, even in very small concentration, is frequently a concern in potable and irrigation water, in ultrapure water as used in the semiconductor industry, and in other chemical processes.

Boric acid can be removed from water with conventional ion exchange resins, but the exchange

is not selective and therefore impractical. The selectivity of AMBERLITE IRA743 for boric acid is so high, that removal is very efficient irrespective of the background salinity of the solution.

AMBERLITE IRA743 owes its high selectivity for boric acid to a unique, sugar-like active group. The borate ion makes a very stable complex with the glucamine group, whilst other anions do not react at all.

PROPERTIES

Matrix _____	Macroporous polystyrene
Functional group _____	N-Methylglucamine
Physical form _____	Beige-coloured beads
Ionic form as shipped _____	Free Base (FB)
Total capacity _____	0.7 eq/L
Moisture holding capacity _____	48 to 54 % (FB form)
Shipping weight _____	700 g/L (43.7 lbs/ft ³)
Particle size	
Harmonic mean size _____	0.500 – 0.700 mm
Uniformity coefficient _____	1.6
< 0.300 mm _____	1 % max

SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

Maximum operating temperature _____	75 °C
Flow rate _____	4 to 30 BV/h
Regeneration _____	Several regeneration procedures are available depending on the application

APPLICATIONS

a. Removal from irrigation water

Boron is known to improve plant growth, but within tight limits: excess boron has a very detrimental effect on agriculture. The usually considered limit is 1 mg/L.

b. Drinking water

For boron removal from drinking water, the use of AMBERLITE PWA10 is recommended.

c. Ultra-pure water

Boron is used as a dopant in the production of semiconductors. Therefore waste water in this industry contains variable amounts of B. However, boron must be totally absent from the water used in certain production steps. AMBERLITE IRA743 can reduce boron concentrations to ng/L (parts per trillion) levels.

d. Removal from waste

Boron is present in ceramic tiles and enamels used to decorate them. These boron compounds can be selectively removed from the waste streams using AMBERLITE IRA743.

e. Purification of magnesium brine

Magnesium is produced by electrolysis. The presence of boron prevents the coalescence of magnesium during the electrolysis of fused Mg salts. The brines must be decontaminated, bringing the B concentration from about 100 to less than 10 mg/L. Another excellent field for the use of AMBERLITE IRA743 which can operate even in a solution with extremely high salt background.

The above applications are examples, and each of them require a specific regeneration procedure. Potential users should contact Rohm and Haas for more details.

LIMITS OF USE

Rohm and Haas manufactures special resins for food processing and potable water applications. As governmental regulations vary from country to country, it is recommended that potential users seek advice from their AMBERLITE representative in order to determine the best resin choice and optimum operating conditions

HYDRAULIC CHARACTERISTICS

Figure 1 shows the pressure drop data for AMBERLITE IRA743 in water, as a function of service flow rate and water temperature. Pressure drop data are for clean, classified beds which have not been contaminated with suspended solids during the service run. If the bed accumulates solids, the pressure drop will increase.

Figure 2 shows the bed expansion of AMBERLITE IRA743, as a function of backwash flow rate and water temperature.

Figure 1 : Bed Expansion

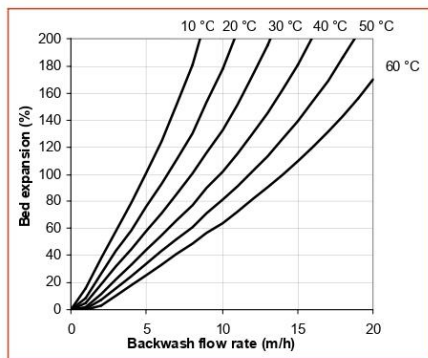
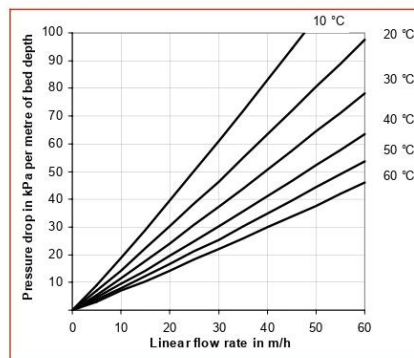


Figure 2 : Pressure Drop



Rohm and Haas/Ion Exchange Resins - Philadelphia, PA - Tel. (800) RH AMBER - Fax: (215) 409-4534
Rohm and Haas/Ion Exchange Resins - 75579 Paris Cedex 12 - Tel. (33) 1 40 02 50 00 - Fax: 1 43 45 28 19



AMBERLITE is a trademark of Rohm and Haas Company and affiliates, Philadelphia, U.S.A. (Rohm and Haas)
Ion exchange resins and polymeric adsorbents, as produced, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which organic by-products must be removed for any particular use and establish techniques to assure that the appropriate level of purity is achieved for that use. The user must ensure compliance with all prudent safety standards and regulatory requirements governing the application. Except where specifically otherwise stated, Rohm and Haas does not recommend its ion exchange resins or polymeric adsorbents, as supplied, as being suitable or appropriately pure for any particular use. Consult your Rohm and Haas technical representative for further information. Acidic and basic regenerant solutions are corrosive and should be handled in a manner that will prevent eye and skin contact. Nitric acid and other strong oxidizing agents can cause explosive type reactions when mixed with Ion Exchange resins. Proper design of process equipment to prevent rapid buildup of pressure is necessary if use of an oxidizing agent such as nitric acid is contemplated. Before using strong oxidizing agents in contact with Ion Exchange Resins, consult sources knowledgeable in the handling of these materials.

Rohm and Haas makes no warranties either expressed or implied as to the accuracy or appropriateness of this data and expressly excludes any liability upon Rohm and Haas arising out of its use. We recommend that the prospective users determine for themselves the suitability of Rohm and Haas materials and suggestions for any use prior to their adoption. Suggestions for uses of our products of the inclusion of descriptive material from patents and the citation of specific patents in this publication should not be understood as recommending the use of our products in violation of any patent or as permission or license to use any patents of the Rohm and Haas. Material Safety Data Sheets outlining the hazards and handling methods for our products are available on request.



Remove banner

PRACTICAL GUIDE

Boron Removal Using Amberlite IRA743

INTRODUCTION

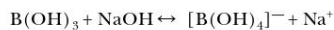
With Amberlite IRA743, borate can be removed very effectively from water. IRA743 is so selective for boric acid that practically any salt background is tolerable. There are different fields of application:

- Removal of boron for drinking water
- Removal of boron in ultrapure water
- Treatment of magnesium brines containing boron
- Removal of boron from water for irrigation

We will focus here on the drinking water application, although most of the following information is valid for all fields.

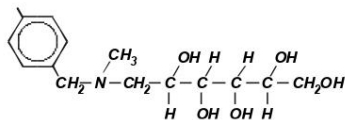
BORON

Boron in water is always present as some form of boric acid, which is a very weak acid, similar to silicic acid ("silica") with a pK value of 9.1. At a pH lower than 7, boric acid is undissociated as H_3BO_3 or $B(OH)_3$. Boric acid is a Lewis acid, i.e. an OH^- acceptor rather than a H^+ donor. At a pH higher than 11.5, boron occurs as dissociated borate $[B(OH)_4]^-$.



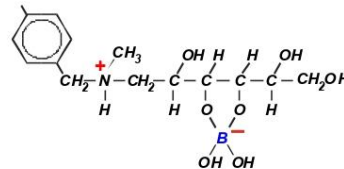
ION EXCHANGE REACTION

Amberlite IRA743 is a macroporous styrenic resin with methyl glucamine functionality. The active group is essentially a weak base (tertiary amine) with a "sugar tail". A developed formula is shown here:



The uptake of boron as borate $[B(OH)_4]^-$ is a curious mechanism, as it involves protonation of

the amine, de-protonation of the polyol sugar tail, shedding of water and formation of an ester. The next picture is believed to be the final result:



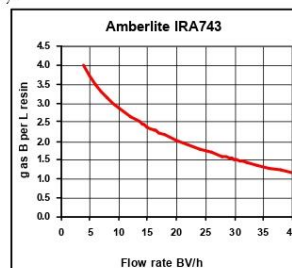
The uptake of borate by Amberlite IRA743 can in principle be done with the resin in acidic form (e.g. HCl) as a true substitution combined with complex formation. However it has been demonstrated experimentally that the capacity was higher with the resin in free base form.

RESINS USED

There is only one resin: Amberlite IRA743. As this is a weakly basic resin, it is usually regenerated in co-flow.

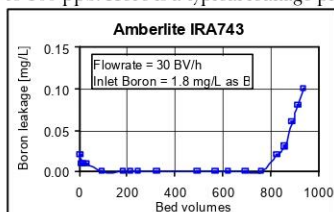
OPERATING CAPACITY

The most important parameter is flow rate as shown in the graph. Boron concentration and salt background have little effect on operating capacity.



EXPECTED LEAKAGE

A very low leakage can be obtained when the endpoint is kept low. In UPW, references mention leakage values of 20 ppt for inlet values of 50 to 100 ppb. Here is a typical leakage profile :



With an endpoint set at 0.1 mg/L (100 ppb as B), a part of the stream can often be by-passed, which reduces the plant size by a factor of 20 to 40%.

REGENERATION

It is done in two steps: first the borate is displaced with sulphuric or hydrochloric acid, then the resin is converted back to the free base form. Initial work showed regeneration with acid only,

but studies have shown that the conversion step gives a much higher performance. The regeneration procedure does not depend on capacity or any other parameter, and involves complete conversion of the active groups. The optimum flow rate seems to be 15 to 30 BV/h when the inlet boron value is in the single ppm range.

EFFICIENCY

The extreme selectivity of Amberlite IRA743 makes this ion exchange process highly efficient: unlike with other processes such as reverse osmosis, only the targeted contaminant, boron, is removed from the water. The other, harmless ions such as sodium, calcium, bicarbonate and chloride are not affected. Amberlite IRA743 has been approved for the treatment of potable water. Ion exchange with Amberlite IRA743 is the only process to remove boron selectively from water.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Temperature	5 to 100°C
Bed depth	> 1000 mm (40 in) Preferably about 1400 mm (56 in)
Specific flow rate	5 to 30 BV/h
Regenerant	H ₂ SO ₄ or HCl
Regenerant concentration	3.5 to 5% so that the regenerant volume is 1 BV
Regenerant quantity	HCl : 35 g/L (as HCl 100 %) i.e. 2.2 lb/ft ³ H ₂ SO ₄ : 50 g/L i.e. 3.2 lb/ft ³
Regenerant contact time	30 to 60 minutes
Regenerant flow rate	1.5 to 2 BV/h
Slow rinse (displacement)	About 3 bed volumes in 60 minutes
Conversion step	NaOH (ammonia is possible)
Caustic soda quantity	28 g/L (as NaOH 100 %) i.e. 1.8 lb/ft ³
NaOH concentration	2.5%
Contact time	About 45 minutes, i.e. 2 to 3 BV/h
NaOH displacement and rinse	2 BV only in about 40 minutes
Quality of water for regeneration	For acid dilution, acid displacement, caustic dilution and displacement: demineralised or soft water

Rohm and Haas / Ion Exchange Resins - Philadelphia, PA - Tel. (800) RH AMBER - Fax: (215) 409-4534
Rohm and Haas / Ion Exchange Resins - 75579 Paris Cedex 12 - Tel. (33) 1 40 02 50 00 - Fax : (33) 1 43 45 28 19

WEB SITE: <http://www.rohmmaas.com/ionexchange>



Ion exchange resins and polymeric adsorbents, as produced, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which organic by-products must be removed for any particular use and establish techniques to assure that the appropriate level of purity is achieved for that use. The user must ensure compliance with all prudent safety standards and regulatory requirements governing the application. Except where specifically otherwise stated, Rohm and Haas Company does not recommend its ion exchange resins or polymeric adsorbents, as supplied, as being suitable or appropriately pure for any particular use. Consult your Rohm and Haas technical representative for further information. Acidic and basic regenerant solutions are corrosive and should be handled in a manner that will prevent eye and skin contact. Nitric acid and other strong oxidising agents can cause explosive type reactions when mixed with Ion Exchange resins. Proper design of process equipment to prevent rapid build-up of pressure is necessary if use of an oxidising agent such as nitric acid is contemplated. Before using strong oxidising agents in contact with Ion Exchange Resins, consult sources knowledgeable in the handling of these materials.

Rohm and Haas Company makes no warranties either expressed or implied as to the accuracy or appropriateness of this data and expressly excludes any liability upon Rohm and Haas arising out of its use. We recommend that the prospective users determine for themselves the suitability of Rohm and Haas materials and suggestions for any use prior to their adoption. Suggestions for uses of our products of the inclusion of descriptive material from patents and the citation of specific patents in this publication should not be understood as recommending the use of our products in violation of any patent or as permission or license to use any patents of the Rohm and Haas Company. Material Safety Data Sheets outlining the hazards and handling methods for our products are available on request. Amberlite is a trademark of Rohm and Haas Company.

© 2003 Rohm and Haas Company

INF0039 A - June 03 - 2/2

Anexo 2. Cálculo de la pérdida de carga al inicio del intercambio

Utilizando la ecuación de Carmen Kozeny [2.36], se tiene:

$$\frac{h}{L} = \frac{150v(1-\varepsilon)^2 V}{g\varepsilon_o^3 C_e^2} \sum \frac{x_i}{D_i^2}$$

Dónde:

- Porosidad inicial: 0,347
- Coeficiente de esfericidad: 1
- Temperatura, °C: 19
- Viscosidad cinemática: $1,054 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1,054 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$.
- Aceleración de la gravedad, cm/s^2 : 981
- Altura del lecho, m: 0,15
- Velocidad de intercambio:

$$3 \text{ ml}/\text{min} \approx 0,00028 \text{ m}/\text{s}$$

$$7 \text{ ml}/\text{min} \approx 0,00066 \text{ m}/\text{s}$$

$$3 \text{ ml}/\text{min} \approx 0,00103 \text{ m}/\text{s}$$

$$h = \frac{150v(1-\varepsilon)^2 VL}{g\varepsilon_o^3 C_e^2} \sum \frac{x_i}{D_i^2}$$

$$h = \frac{(150 \times 1,054 \times 10^{-6}) \times (1-0,35)^2 \times (0,00028 \times 0,15)}{9,81 \times 0,35^3 \times 1^2} \times \left[\frac{0,8861}{(6,3110^{-4})^2} \right]$$

$$h = 0,015 \text{ m}$$

Continuando el mismo procedimiento de cálculos con cada diámetro, se tiene la siguiente tabla:

Di, mm	Xi	Di²	Xi/Di²	h_L
0,0006305	0,8861	0,0000003975	2229012,76	0,0150253
0,0003150	0,0844	0,0000000992	850592,08	0,0057337

h_L = 0,021m

A continuación, se muestra la secuencia de cálculo para los demás datos que se muestran en las siguientes tablas:

Altura del lecho 0,15 m

Velocidad de intercambio 0,00066 m/s

Di, mm	Xi	Di²	Xi/Di²	h_L
0,0006305	0,8861	0,0000003975	2229012,76	0,035059
0,0003150	0,0844	0,0000000992	850592,08	0,013378

h_L = 0,048m

Altura del lecho 0,15 m

Velocidad de intercambio 0,00103 m/s

Di, mm	Xi	Di²	Xi/Di²	h_L
0,0006305	0,8861	0,0000003975	2229012,76	0,05509
0,0003150	0,0844	0,0000000992	850592,08	0,02102

h_L = 0,076m

Anexo 3. Cálculo de la velocidad de lavado o velocidad de levantamiento para una expansión determinada.

- a) Cálculo del d60% abertura del tamiz

d60%: (tamaño efectivo) x (coeficiente de uniformidad)

$$d_{60\%}: 0,42 \times 1,47 = 0,62$$

- b) Cálculo de la velocidad de fluidización mínima a partir de la ecuación

[2.28]

$$v_f = \frac{0,6198(d_{60\%})^{1,82} [\omega_s (\omega_m - \omega_s)]^{0,94}}{\mu^{0,88}}$$

Dónde:

d_{60%}: Abertura del tamiz que deja pasar el 60 % de la resina, 0,62 mm

ω_m: peso específico de la resina, 1,05 g/cm³

ω_s: peso específico del agua, 1 g/cm³.

μ: viscosidad del agua, 1,083 centipoise

$$v_f = \frac{0,6198(0,62)^{1,82} [1(1,05 - 1)]^{0,94}}{1,083^{0,88}}$$

$$v_f = 0,0143 \text{ cm} / \text{s}$$

- c) El número de Reynolds corresponde a una velocidad de fluidización mínima a partir de la ecuación [2.29].

$$Re_f = \frac{\rho_l v_f d_{60\%}}{\mu}$$

Dónde:

ρ_L : densidad del agua, 1 g/cm³

v_f : 0,0143 cm/s

$d_{60\%}$: 0,062 cm

μ : viscosidad dinámica del agua, 0,0108 g/cm s

$$Re_f = \frac{1 \times 0,0143 \times 0,062}{0,0108}$$

$$Re_f = 0,082$$

Debido a que $Re_f < 10$, no se precisa ninguna corrección para v_f .

- d) A partir de la ecuación [2.31]

$$v_s = 8,45 v_f$$

$$v_s = 8,45 \times 0,0143$$

$$v_s = 0,1214$$

- e) El número de Reynolds correspondiente a la velocidad de sedimentación no frenada.

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_l v_f d_{60\%}}{\mu} = 8,45 \text{Re}_f$$

$$\text{Re}_f = 8,45 \times 0,082$$

$$\text{Re}_f = 0,693$$

Por lo tanto, el coeficiente de expansión, η_e .

$$n_e = 4,45 \text{Re}_o^{-0,1}$$

$$n_e = 4,45 \times 0,693^{-0,1}$$

$$n_e = 4,62$$

- f) Utilizando la ecuación [2.34] para la velocidad mínima de fluidización se obtiene:

$$v = K_e (\varepsilon)^{n_e}$$

ε : Porosidad del lecho no expandido 0,347

$$K_e = \frac{v}{(\varepsilon)^{n_e}} = \frac{0,0143}{0,347^{4,62}}$$

$$K_e = 1,90 \text{ cm / s}$$

g) A partir de la ecuación [3.35], se puede calcular la porosidad para una expansión del 50 %.

$$\frac{D_e}{D} = \frac{(1-\varepsilon)}{(1-\bar{\varepsilon})}$$

Dónde:

D: altura del lecho expandido, 0,15 m.

D_e : Altura de lecho expandido, 0,23 m.

$\bar{\varepsilon}$: Porosidad de la resina expandida

ε : Porosidad de la resina no expandida, 0,347

$$\varepsilon = 0,57$$

h) Aplicando nuevamente la ecuación [2.34] se obtiene la velocidad de lavado

$$v = K_e (\varepsilon)^{n_e}$$

$$v = 1,90(0,57)^{4,62}$$

$$v = 0,15 \text{ cm} / \text{s}$$

Multiplicando por el área transversal se tiene:

$$v = 0,15 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times 1,76 \text{ cm}^2$$

$$v = 0,2595 \text{ cm}^3 / \text{s} \approx 0,2595 \text{ ml} / \text{s} \approx 15,57 \text{ ml/min}$$

Anexo 4. Análisis certificado por SGS. PERÚ SAC.

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.

AV. MIRAFLORES NRO. SN CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA)TACNA - TACNA - TACNA

ENV / LB-346513-002

Fecha de Recepción SGS : 19-12-2019

Fecha de Ejecución : Del 19-12-2019 al 26-12-2019

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
XI-08
XI-12
XI-28
XI-33
XI-53
III-16
III-28
III-22
III-38
III-50

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 26/12/2019

Lizett M. Gonzales Carranza
C.I.P 189253

Jefe de Laboratorio - Sede Arequipa

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092

www.sgs.pe
Pe.servicio@sgs.com

1 de 5
* Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0**

Estación de Muestreo
I-1
I-3
I-5
I-10
I-20

Leyenda de las estaciones de muestreo

XI – 08	Punto de la curva avance para un flujo de 11 ml/min
XI – 12	Punto de la curva avance para un flujo de 11 ml/min
XI – 28	Punto de la curva avance para un flujo de 11 ml/min
XI – 33	Punto de la curva avance para un flujo de 11 ml/min
XI – 53	Punto de la curva avance para un flujo de 11 ml/min
III – 16	Punto de la curva avance para un flujo de 3 ml/min
III – 28	Punto de la curva avance para un flujo de 3 ml/min
III – 22	Punto de la curva avance para un flujo de 3 ml/min
III – 38	Punto de la curva avance para un flujo de 3 ml/min
III – 50	Punto de la curva avance para un flujo de 3 ml/min
I – 1	Puntos de la curva de equilibrio
I – 3	Puntos de la curva de equilibrio
I – 5	Puntos de la curva de equilibrio
I – 10	Puntos de la curva de equilibrio



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL MA1933031 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					XI-08	XI-12	XI-28
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					08:00:00	08:30:00	09:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	0.024	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00999	0.00964	0.00947
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.27745	0.31054	0.28747
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0395	0.0398	0.0409
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	<0.006	0.426	5.736
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	141.228	139.672	144.831
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0730	0.0775	0.0745
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00014	0.00015	0.00012
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	0.00338
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0254	1.0261	1.0533
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	0.00026	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0048	0.0124	0.0054
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.2086	1.2136	1.2486
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	33.423	34.055	33.776
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00091	0.00130	0.00086
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00150	0.00162	0.00193
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00491	0.00662	0.00778
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	30.56	30.62	32.04
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0956	0.0969	0.1003
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0031	0.0031	0.0033
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	34.22 *	33.41 *	33.24 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	15.99	15.82	15.54
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	303.000	301.925	296.419
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0025	0.0023	0.0023
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.000765	0.001250	0.002280
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	0.0028	0.0086
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0570	0.0617	0.0895
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					XI-33	XI-53	III-16
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					09:30:00	10:00:00	10:30:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	0.027
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00858	0.00849	0.00901
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.27132	0.27645	0.28324
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0385	0.0386	0.0389
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	6.194	7.644	<0.006
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	131.862	139.592	140.934
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0721	0.0731	0.0758
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00011	0.00011	0.00010
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00133	<0.00009	<0.00009

SGS del Perú S.A.C. Av. Elmer Faucett 3368 Parque Industrial Cajamarca t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Ba. San Antonio Ba. San Antonio t (054) 213 506 e Pe.serv@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					XI-33	XI-53	III-16
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					09:30:00	10:00:00	10:30:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.9970	1.0078	1.0168
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0049	0.0024	0.0064
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.1345	1.2109	1.2027
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	31.213	34.096	31.285
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.00080	0.00077	0.00074
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00159	0.00171	<0.00009
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00669	0.00655	0.00477
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	28.02	31.00	30.26
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0950	0.0977	0.0977
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0031	0.0030	0.0030
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	29.14 *	31.86 *	33.56 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	13.62	14.89	15.59
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.008	0.019	278.857	301.793	278.847
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Torio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0022	0.0023	0.0024
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.002205	0.002300	<0.00010
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0069	0.0085	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0028	0.0384	0.0440	0.0108
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					III-28	III-22	III-38
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					11:30:00	11:00:00	12:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	0.021	0.023	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00923	0.00802	0.00866
Arsenico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.29620	0.28483	0.28305
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0404	0.0388	0.0385
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	3.435	<0.006	7.749
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	147.240	142.926	143.332
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0797	0.0745	0.0758
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00012	0.00013	0.00009
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0602	1.0185	1.0123
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0022	0.0026	0.0024
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.2435	1.1660	1.2027
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	32.113	31.913	31.913
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010

SGS del Perú S.A.U.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callejón
Ba. San Antonio

Callejón
Cajamarca
t (051) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicio@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					III-28	III-22	III-36
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					11:30:00	11:00:00	12:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00144	<0.00009	0.00083
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00984	0.00826	0.00728
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Piombo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	31.37	30.37	31.27
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.1007	0.0965	0.0986
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0032	0.0030	0.0028
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	34.60 *	31.48 *	33.46 *
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	16.17	14.71	15.64
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	261.369	261.168	277.727
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
torio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0024	0.0022	0.0022
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002168	0.000803	0.002439
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0099	0.0021	0.0088
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0261	0.0253	0.0048
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					III-50	I-1	I-3
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					12:30:00	14:30:00	15:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00876	<0.00013	<0.00013
Arsenico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.28545	<0.00010	<0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0367	<0.0003	<0.0003
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	7.476	<0.006	<0.006
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	136.069	0.674	1.243
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0762	<0.0003	<0.0003
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00010	<0.00003	<0.00003
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estañio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0287	0.0051	0.0077
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.1731	0.0017	0.0021
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	33.972	0.180	0.282
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	0.00280	0.00254
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00138	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00713	<0.00006	<0.00006
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Piombo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.46	<0.13	<0.13
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0986	<0.0009	<0.0009
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0030	<0.0013	<0.0013
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.95 *	1.80 *	1.59 *
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.46	0.84	0.74
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	299.637	0.485	0.845
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					I-50	I-1	I-3
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					12:30:00	14:30:00	15:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Tantalo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0021	<0.0006	<0.0006
Uranio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002566	<0.000010	<0.000010
Vanadio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0070	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0008	0.0026	<0.0026	0.0066	0.0028
Zirconio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					I-5	I-10	I-20
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					15:30:00	16:00:00	16:30:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	0.00356
Bario Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Berilio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.002	0.006	<0.006	0.697	8.279
Cadmio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.003	0.009	1.175	0.432	0.381
Cerio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Cobalto Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Cobre Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Cromo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0075	0.0036	0.0050
Fósforo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Lantano Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0020	0.0010	0.0017
Lutecio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	0.276	0.133	0.174
Manganeso Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00239	0.00206	0.00528
Mercurio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Niobio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plata Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006

SGS del Perú S.A.C. Av. Elmer Faucett 3348 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Ba. San Antonio Arequipa t (054) 213 506 e Pa.servicio@sgs.pe
Jr. Arnaldo Márquez Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					I-5	I-10	I-20
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					15:30:00	16:00:00	16:30:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO	AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
SUB CATEGORIA					AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA	AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Potasio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.04	0.13	<0.13	<0.13	<0.13
Rubidio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0003	0.0009	<0.0009	<0.0009	<0.0009
Selenio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.09	0.27	1.64 *	1.70 *	3.98 *
Silicio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.04	0.13	0.77	0.79	1.86
Sodio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.006	0.019	0.827	0.348	0.447
Talio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Uranio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Vanadio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0031	0.0032	0.0057
Zirconio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL - DA , para la matriz en mención.

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aluminio Total	mg/L	0.003	<0.003	0 - 5%	97%	101%	0%
Antimonio Total	mg/L	0.00013	<0.00013	0 - 8%	97 - 109%	93%	2%
Arsénico Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 6%	96 - 101%	102%	0%
Bario Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 5%	95 - 96%	101%	0%
Berilio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	94%	96%	0%
Bismuto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	96 - 98%	100%	5%
Boro Total	mg/L	0.006	<0.006	0 - 8%	98%	100%	4%
Cadmio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	99 - 100%	100%	0%
Calcio Total	mg/L	0.009	<0.009	0 - 6%	96 - 98%	97%	0%
Ceño Total	mg/L	0.00024	<0.00024	0%	100%	94%	4%
Cesio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 5%	98 - 100%	97%	1%
Cobalto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0 - 3%	96 - 99%	104%	1%
Cobre Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0 - 4%	96 - 99%	91%	0%
Cromo Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	95 - 99%	101%	1%
Estaño Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0%	96 - 97%	95%	1%
Estroncio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 4%	100 - 106%	95%	2%
Fósforo Total	mg/L	0.047	<0.047	0%	94%	98%	0%
Gaio Total	mg/L	0.00012	<0.00012	0%	96 - 99%	107%	1%
Germanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	97%	99%	1%
Hafnio Total	mg/L	0.00015	<0.00015	0%	97 - 99%	98%	0%
Hierro Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0%	99%	104%	3%
Lantano Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	96 - 102%	105%	1%
Litio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	1 - 7%	98 - 101%	96%	0%
Lutecio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	97 - 98%	93%	0%
Magnesio Total	mg/L	0.003	<0.003	0 - 6%	93 - 98%	97%	1%
Manganeso Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 7%	97 - 100%	102%	0%
Mercurio Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0 - 6%	97 - 100%	99%	0%
Molibdeno Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0 - 6%	96 - 98%	104%	5%
Niobio Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	96 - 97%	97%	0%
Niquel Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	94 - 99%	93%	1%
Plata Total	mg/L*	0.00010	<0.00010	0%	91 - 98%	100%	0%
Piombo Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 2%	99 - 100%	103%	0%
Potasio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 5%	92%	89%	6%
Rubidio Total	mg/L	0.0009	<0.0009	0 - 8%	97 - 100%	98%	2%
Selenio Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0 - 5%	95 - 97%	94%	0%
Silice Total	mg/L	0.27	<0.27	0 - 8%	98%	100%	0%
Silicio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 8%	98%	100%	0%
Sodio Total	mg/L	0.019	<0.019	0 - 7%	98%	102%	0%
Talio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	96 - 98%	97%	0%
Tantalo Total	mg/L	0.0021	<0.0021	0%	96 - 97%	94%	0%
Teluro Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	96 - 98%	100%	0%
Thorio Total	mg/L	0.00019	<0.00019	0%	97 - 98%	99%	0%
Titanio Total	mg/L	0.0008	<0.0008	0 - 8%	99%	101%	0%
Uranio Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 6%	93 - 97%	103%	1%
Vanadio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 6%	96 - 99%	100%	3%
Wolframio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	97 - 99%	99%	0%
Yterbio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	99 - 107%	99%	0%
Zinc Total	mg/L	0.0026	<0.0026	0 - 7%	96 - 97%	103%	0%
Zirconio Total	mg/L	0.00045	<0.00045	0 - 3%	95 - 101%	103%	0%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1933031 Rev. 0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_EPA200_8_AQ	Arequipa	Metales Totales	EPA 200.8, Rev 5.4:1994, Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (Validado),2016.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fé pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
Pe.servicios@sgs.com

Página 9 de 9

Miembro del Grupo SGS

Anexo 5. Datos experimentales de las curvas de avance.

Flujo 11 mil/min

N° de muestra	Tiempo, min	Boro, mg/L, mg/L
1	30	0,02792506
3	60	0,04559915
7	90	0,06327324
9	120	0,09862142
11	185	0,15871333
13	255	0,3107105
15	290	0,77023683
17	315	1,18027572
21	435	2,60127253
23	555	4,10003535
25	645	4,9377872
27	735	5,22057264
29	825	6,74407918
31	885	7,70554966
32	1065	9,02050194
34	1125	8,14740191
36	1195	9,71686108
38	1215	8,26051608
40	1260	9,3669141
42	1205	9,42347119
47	1380	8,41251326
51	1470	9,29621774
54	1560	8,67408978
56	1675	9,49416755

Flujo 7 mil/min

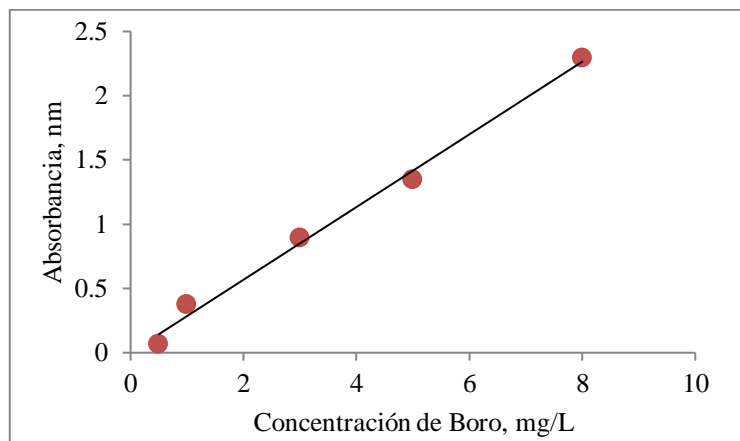
N° de muestra	Tiempo, min	Boro, mg/L, mg/L
1	60	0
3	120	0
5	180	0,03852952
7	240	0,05620361
9	300	0,05973842
11	360	0,12689996
13	420	0,22940969
15	480	0,25415341
17	540	0,43442913
19	600	0,68186638
21	660	0,99293036
23	780	1,61505832
24	840	2,15942029
25	900	2,82043125
26	960	3,36832803
27	1020	4,26970661
29	1140	5,34782609
31	1260	6,15022976
33	1380	7,18239661
36	1560	7,94238247
38	1680	8,62106752
40	1800	9,04878049
41	1875	9,39519265
45	2100	9,41993637
47	2220	9,42700601
49	2340	9,6426299
50	2400	9,64616472

Flujo 3 ml/min		
Nº de muestra	Tiempo, min	Boro, mg/L, mg/L
1	60	0
3	180	0
6	360	0
9	540	0,003
12	720	0,01378579
15	900	0,02792506
18	1260	0,04206433
21	1620	0,23647932
27	2340	3,63343938
39	3780	9,50123719
45	4520	9,9961117
61	5840	9,9961117

*Las concentraciones de boro se hallan utilizando la ecuación de la curva patrón hallado para cada flujo respectivamente; a continuación, se muestra las curvas patrones que se trabajó para cada flujo.

Para Flujo de 11 ml/min:

Concentración de boro, mg/L	absorbancia
0,5	0,063
1	0,374
3	0,891
5	1,343
8	2,29

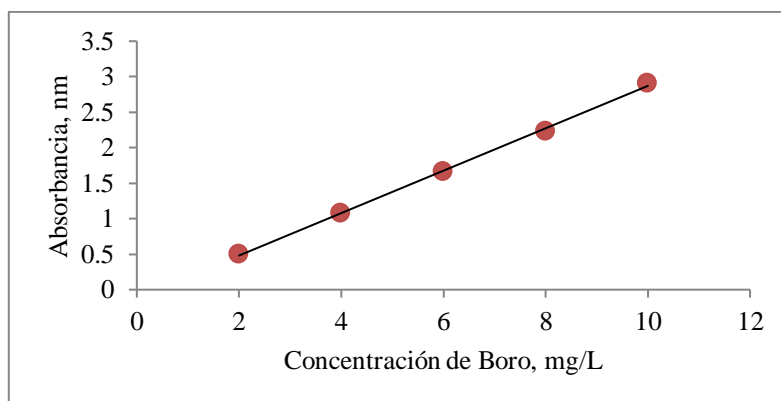


Ecuación:

$$\text{Concentración de boro} = \frac{(\text{absorbancia}) + 0,0021}{0,2829}$$

Para Flujo de 7 ml/min:

Concentración de boro, mg/L	absorbancia
2	0,502
4	1,075
6	1,662
8	2,229
10	2,912

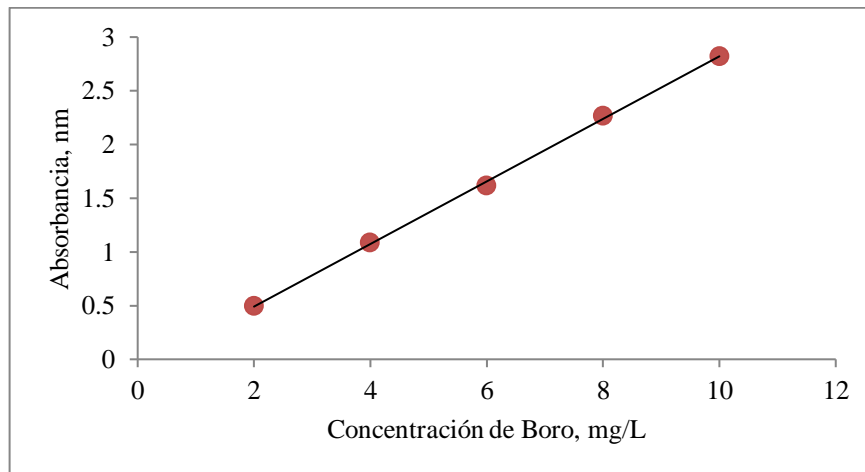


Ecuación:

$$\text{Concentración de boro} = \frac{(\text{absorbancia}) + 0,1162}{0,2987}$$

Para flujo de 3 ml/min:

Concentración de boro, mg/L	absorbancia
2	0,497
4	1,086
6	1,613
8	2,263
10	2,821



Ecuación:

$$\text{Concentración de boro} = \frac{(\text{absorbancia}) + 0,0915}{0,2913}$$

Anexo 6. Datos modelados de las curvas de avance

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE								
11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
30,000	0,010	0,037	60,000	0,006	0,021	60,000	0,000	0,000
36,426	0,010	0,037	73,828	0,006	0,022	82,578	0,000	0,000
42,852	0,010	0,037	87,656	0,006	0,022	105,156	0,000	0,000
49,277	0,010	0,037	101,484	0,006	0,023	127,734	0,000	0,000
55,703	0,010	0,037	115,313	0,007	0,024	150,313	0,000	0,000
62,129	0,010	0,037	129,141	0,007	0,026	172,891	0,000	0,000
68,555	0,010	0,037	142,969	0,007	0,027	195,469	0,000	0,000
74,980	0,010	0,037	156,797	0,008	0,029	218,047	0,000	0,000
81,406	0,010	0,037	170,625	0,008	0,031	240,625	0,000	0,000
87,832	0,010	0,037	184,453	0,009	0,033	263,203	0,000	0,000
94,258	0,010	0,037	198,281	0,010	0,035	285,781	0,000	0,000
100,684	0,010	0,037	212,109	0,011	0,038	308,359	0,000	0,000
107,109	0,010	0,037	225,938	0,012	0,042	330,938	0,000	0,000
113,535	0,010	0,037	239,766	0,013	0,045	353,516	0,000	0,000
119,961	0,011	0,038	253,594	0,014	0,050	376,094	0,000	0,000
126,387	0,012	0,042	267,422	0,015	0,055	398,672	0,000	0,000
132,813	0,013	0,048	281,250	0,017	0,061	421,250	0,000	0,000
139,238	0,016	0,057	295,078	0,019	0,067	443,828	0,000	0,000
145,664	0,019	0,067	308,906	0,021	0,074	466,406	0,000	0,000
152,090	0,022	0,080	322,734	0,023	0,083	488,984	0,000	0,000
158,516	0,026	0,095	336,563	0,026	0,092	511,563	0,000	0,000
164,941	0,031	0,112	350,391	0,028	0,103	534,141	0,000	0,000
171,367	0,036	0,131	364,219	0,032	0,114	556,719	0,000	0,000
177,793	0,042	0,153	378,047	0,035	0,128	579,297	0,000	0,000
184,219	0,049	0,176	391,875	0,040	0,142	601,875	0,000	0,000
190,645	0,056	0,202	405,703	0,044	0,159	624,453	0,000	0,000
197,070	0,064	0,229	419,531	0,049	0,177	647,031	0,000	0,000
203,496	0,072	0,259	433,359	0,055	0,197	669,609	0,000	0,000
209,922	0,080	0,290	447,188	0,061	0,220	692,188	0,000	0,000
216,348	0,090	0,323	461,016	0,068	0,244	714,766	0,000	0,000
222,773	0,100	0,359	474,844	0,075	0,271	737,344	0,000	0,000
229,199	0,110	0,396	488,672	0,083	0,301	759,922	0,000	0,000
235,625	0,121	0,435	502,500	0,092	0,333	782,500	0,000	0,000
242,051	0,132	0,476	516,328	0,102	0,368	805,078	0,000	0,000
248,477	0,144	0,518	530,156	0,113	0,406	827,656	0,000	0,000
254,902	0,156	0,563	543,984	0,124	0,448	850,234	0,000	0,000
261,328	0,169	0,609	557,813	0,137	0,492	872,812	0,000	0,000
267,754	0,182	0,657	571,641	0,150	0,541	895,391	0,000	0,000
274,180	0,196	0,707	585,469	0,164	0,592	917,969	0,000	0,000

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE

11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
280,605	0,210	0,758	599,297	0,180	0,648	940,547	0,000	0,000
287,031	0,225	0,811	613,125	0,196	0,707	963,125	0,000	0,001
293,457	0,240	0,865	626,953	0,214	0,771	985,703	0,000	0,002
299,883	0,256	0,921	640,781	0,233	0,838	1008,281	0,001	0,003
306,309	0,272	0,979	654,609	0,252	0,909	1030,859	0,001	0,005
312,734	0,288	1,038	668,438	0,273	0,985	1053,438	0,002	0,007
319,160	0,305	1,098	682,266	0,295	1,064	1076,016	0,003	0,009
325,586	0,322	1,160	696,094	0,319	1,148	1098,594	0,003	0,012
332,012	0,339	1,223	709,922	0,343	1,236	1121,172	0,004	0,015
338,438	0,357	1,287	723,750	0,368	1,328	1143,750	0,005	0,018
344,863	0,375	1,353	737,578	0,395	1,424	1166,328	0,006	0,022
351,289	0,394	1,420	751,406	0,423	1,524	1188,906	0,007	0,026
357,715	0,413	1,488	765,234	0,452	1,627	1211,484	0,009	0,031
364,141	0,432	1,557	779,062	0,481	1,735	1234,063	0,010	0,037
370,566	0,452	1,627	792,891	0,512	1,846	1256,641	0,012	0,043
376,992	0,471	1,699	806,719	0,544	1,961	1279,219	0,014	0,050
383,418	0,492	1,771	820,547	0,577	2,079	1301,797	0,016	0,058
389,844	0,512	1,845	834,375	0,611	2,200	1324,375	0,019	0,067
396,270	0,533	1,919	848,203	0,645	2,325	1346,953	0,021	0,077
402,695	0,553	1,995	862,031	0,680	2,452	1369,531	0,025	0,088
409,121	0,575	2,071	875,859	0,716	2,581	1392,109	0,028	0,101
415,547	0,596	2,148	889,688	0,753	2,713	1414,688	0,032	0,115
421,973	0,618	2,226	903,516	0,790	2,847	1437,266	0,036	0,130
428,398	0,639	2,304	917,344	0,828	2,983	1459,844	0,041	0,147
434,824	0,661	2,383	931,172	0,866	3,120	1482,422	0,046	0,165
441,250	0,684	2,463	945,000	0,904	3,259	1505,000	0,052	0,186
447,676	0,706	2,544	958,828	0,943	3,399	1527,578	0,058	0,208
454,102	0,728	2,625	972,656	0,982	3,540	1550,156	0,065	0,233
460,527	0,751	2,706	986,484	1,022	3,682	1572,734	0,072	0,260
466,953	0,774	2,788	1000,313	1,061	3,824	1595,313	0,080	0,290
473,379	0,797	2,871	1014,141	1,101	3,966	1617,891	0,089	0,322
479,805	0,820	2,954	1027,969	1,140	4,108	1640,469	0,099	0,358
486,230	0,843	3,037	1041,797	1,179	4,250	1663,047	0,110	0,396
492,656	0,866	3,121	1055,625	1,219	4,392	1685,625	0,121	0,438
499,082	0,889	3,205	1069,453	1,258	4,532	1708,203	0,134	0,483
505,508	0,913	3,289	1083,281	1,296	4,672	1730,781	0,147	0,531
511,934	0,936	3,374	1097,109	1,335	4,811	1753,359	0,162	0,584
518,359	0,960	3,458	1110,938	1,373	4,948	1775,938	0,178	0,640
524,785	0,983	3,543	1124,766	1,411	5,084	1798,516	0,195	0,701
531,211	1,007	3,628	1138,594	1,448	5,219	1821,094	0,213	0,766
537,637	1,030	3,713	1152,422	1,485	5,351	1843,672	0,232	0,836
544,063	1,054	3,798	1166,250	1,521	5,482	1866,250	0,253	0,910

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE

11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
550,488	1,077	3,882	1180,078	1,557	5,611	1888,828	0,275	0,989
556,914	1,101	3,967	1193,906	1,592	5,738	1911,406	0,298	1,074
563,340	1,124	4,052	1207,734	1,627	5,862	1933,984	0,323	1,163
569,766	1,148	4,137	1221,563	1,661	5,985	1956,563	0,349	1,257
576,191	1,171	4,221	1235,391	1,694	6,105	1979,141	0,377	1,357
582,617	1,195	4,306	1249,219	1,727	6,222	2001,719	0,406	1,462
589,043	1,218	4,390	1263,047	1,759	6,337	2024,297	0,436	1,573
595,469	1,241	4,474	1276,875	1,790	6,450	2046,875	0,469	1,688
601,895	1,265	4,557	1290,703	1,820	6,560	2069,453	0,502	1,809
608,320	1,288	4,641	1304,531	1,850	6,667	2092,031	0,537	1,936
614,746	1,311	4,724	1318,359	1,879	6,772	2114,609	0,574	2,067
621,172	1,334	4,807	1332,188	1,907	6,874	2137,188	0,611	2,203
627,598	1,357	4,889	1346,016	1,935	6,973	2159,766	0,651	2,344
634,023	1,379	4,971	1359,844	1,962	7,070	2182,344	0,691	2,490
640,449	1,402	5,052	1373,672	1,988	7,164	2204,922	0,733	2,640
646,875	1,424	5,133	1387,500	2,013	7,256	2227,500	0,775	2,794
653,301	1,447	5,213	1401,328	2,038	7,345	2250,078	0,819	2,952
659,727	1,469	5,293	1415,156	2,062	7,431	2272,656	0,864	3,113
666,152	1,491	5,373	1428,984	2,085	7,514	2295,234	0,909	3,277
672,578	1,513	5,452	1442,813	2,108	7,596	2317,813	0,956	3,444
679,004	1,535	5,530	1456,641	2,130	7,674	2340,391	1,003	3,613
685,430	1,556	5,608	1470,469	2,151	7,751	2362,969	1,050	3,784
691,855	1,577	5,685	1484,297	2,171	7,824	2385,547	1,098	3,956
698,281	1,599	5,761	1498,125	2,191	7,896	2408,125	1,146	4,130
704,707	1,620	5,837	1511,953	2,210	7,965	2430,703	1,194	4,304
711,133	1,640	5,912	1525,781	2,229	8,031	2453,281	1,243	4,478
717,559	1,661	5,986	1539,609	2,247	8,096	2475,859	1,291	4,651
723,984	1,682	6,060	1553,438	2,264	8,158	2498,438	1,339	4,824
730,410	1,702	6,133	1567,266	2,281	8,218	2521,016	1,386	4,996
736,836	1,722	6,205	1581,094	2,297	8,277	2543,594	1,434	5,167
743,262	1,742	6,276	1594,922	2,312	8,333	2566,172	1,480	5,335
749,688	1,761	6,347	1608,750	2,327	8,387	2588,750	1,527	5,501
756,113	1,781	6,416	1622,578	2,342	8,439	2611,328	1,572	5,665
762,539	1,800	6,485	1636,406	2,356	8,489	2633,906	1,617	5,826
768,965	1,819	6,554	1650,234	2,369	8,537	2656,484	1,661	5,984
775,391	1,837	6,621	1664,063	2,382	8,584	2679,063	1,703	6,139
781,816	1,856	6,688	1677,891	2,394	8,629	2701,641	1,745	6,290
788,242	1,874	6,753	1691,719	2,406	8,672	2724,219	1,786	6,437
794,668	1,892	6,818	1705,547	2,418	8,714	2746,797	1,826	6,581
801,094	1,910	6,882	1719,375	2,429	8,754	2769,375	1,865	6,721
807,520	1,927	6,945	1733,203	2,440	8,792	2791,953	1,903	6,856
813,945	1,945	7,008	1747,031	2,450	8,829	2814,531	1,939	6,988

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE								
11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
820,371	1,962	7,069	1760,859	2,460	8,865	2837,109	1,974	7,115
826,797	1,978	7,130	1774,688	2,469	8,899	2859,688	2,009	7,239
833,223	1,995	7,189	1788,516	2,479	8,932	2882,266	2,042	7,358
839,648	2,011	7,248	1802,344	2,487	8,964	2904,844	2,074	7,472
846,074	2,027	7,306	1816,172	2,496	8,994	2927,422	2,104	7,583
852,500	2,043	7,363	1830,000	2,504	9,023	2950,000	2,134	7,690
858,926	2,059	7,419	1843,828	2,512	9,051	2972,578	2,162	7,792
865,352	2,074	7,474	1857,656	2,519	9,078	2995,156	2,190	7,891
871,777	2,089	7,529	1871,484	2,526	9,104	3017,734	2,216	7,985
878,203	2,104	7,582	1885,313	2,533	9,129	3040,313	2,241	8,076
884,629	2,119	7,635	1899,141	2,540	9,153	3062,891	2,265	8,163
891,055	2,133	7,687	1912,969	2,546	9,176	3085,469	2,288	8,246
897,480	2,147	7,737	1926,797	2,552	9,198	3108,047	2,310	8,326
903,906	2,161	7,787	1940,625	2,558	9,219	3130,625	2,332	8,403
910,332	2,174	7,836	1954,453	2,564	9,239	3153,203	2,352	8,476
916,758	2,188	7,884	1968,281	2,569	9,258	3175,781	2,371	8,546
923,184	2,201	7,932	1982,109	2,574	9,277	3198,359	2,390	8,612
929,609	2,214	7,978	1995,938	2,579	9,295	3220,938	2,408	8,676
936,035	2,226	8,023	2009,766	2,584	9,312	3243,516	2,425	8,737
942,461	2,239	8,068	2023,594	2,589	9,328	3266,094	2,441	8,795
948,887	2,251	8,112	2037,422	2,593	9,344	3288,672	2,456	8,851
955,312	2,263	8,155	2051,250	2,597	9,359	3311,250	2,471	8,904
961,738	2,275	8,197	2065,078	2,601	9,373	3333,828	2,485	8,954
968,164	2,286	8,238	2078,906	2,605	9,387	3356,406	2,498	9,003
974,590	2,297	8,278	2092,734	2,609	9,401	3378,984	2,511	9,049
981,016	2,308	8,318	2106,563	2,612	9,413	3401,563	2,523	9,092
987,441	2,319	8,357	2120,391	2,616	9,426	3424,141	2,535	9,134
993,867	2,329	8,395	2134,219	2,619	9,437	3446,719	2,546	9,174
1000,293	2,340	8,432	2148,047	2,622	9,448	3469,297	2,556	9,212
1006,719	2,350	8,468	2161,875	2,625	9,459	3491,875	2,566	9,248
1013,145	2,360	8,504	2175,703	2,628	9,469	3514,453	2,576	9,283
1019,570	2,369	8,538	2189,531	2,630	9,479	3537,031	2,585	9,316
1025,996	2,379	8,572	2203,359	2,633	9,489	3559,609	2,594	9,347
1032,422	2,388	8,606	2217,188	2,636	9,498	3582,188	2,602	9,377
1038,848	2,397	8,638	2231,016	2,638	9,506	3604,766	2,610	9,405
1045,273	2,406	8,670	2244,844	2,640	9,515	3627,344	2,617	9,432
1051,699	2,414	8,701	2258,672	2,642	9,523	3649,922	2,625	9,458
1058,125	2,423	8,731	2272,500	2,645	9,530	3672,500	2,631	9,483
1064,551	2,431	8,761	2286,328	2,647	9,537	3695,078	2,638	9,506
1070,977	2,439	8,790	2300,156	2,649	9,544	3717,656	2,644	9,528
1077,402	2,447	8,818	2313,984	2,650	9,551	3740,234	2,650	9,550
1083,828	2,454	8,845	2327,813	2,652	9,558	3762,813	2,656	9,570

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE								
11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
1090,254	2,462	8,872	2341,641	2,654	9,564	3785,391	2,661	9,590
1096,680	2,469	8,898	2355,469	2,655	9,570	3807,969	2,666	9,608
1103,105	2,476	8,924	2369,297	2,657	9,575	3830,547	2,671	9,626
1109,531	2,483	8,948	2383,125	2,659	9,580	3853,125	2,676	9,642
1115,957	2,490	8,973	2396,953	2,660	9,586	3875,703	2,680	9,659
1122,383	2,496	8,996	2410,781	2,661	9,591	3898,281	2,684	9,674
1128,809	2,503	9,019				3920,859	2,688	9,688
1135,234	2,509	9,041				3943,438	2,692	9,702
1141,660	2,515	9,063				3966,016	2,696	9,716
1148,086	2,521	9,084				3988,594	2,700	9,728
1154,512	2,527	9,105				4011,172	2,703	9,741
1160,938	2,532	9,125				4033,750	2,706	9,752
1167,363	2,538	9,145				4056,328	2,709	9,763
1173,789	2,543	9,164				4078,906	2,712	9,774
1180,215	2,548	9,182				4101,484	2,715	9,784
1186,641	2,553	9,200				4124,063	2,718	9,793
1193,066	2,558	9,217				4146,641	2,720	9,803
1199,492	2,562	9,234				4169,219	2,723	9,812
1205,918	2,567	9,251				4191,797	2,725	9,820
1212,344	2,571	9,267				4214,375	2,727	9,828
1218,770	2,576	9,282				4236,953	2,729	9,836
1225,195	2,580	9,297				4259,531	2,731	9,843
1231,621	2,584	9,312				4282,109	2,733	9,850
1238,047	2,588	9,326				4304,688	2,735	9,857
1244,473	2,592	9,340				4327,266	2,737	9,863
1250,898	2,595	9,353				4349,844	2,739	9,870
1257,324	2,599	9,366				4372,422	2,740	9,875
1263,750	2,602	9,378				4395,000	2,742	9,881
1270,176	2,606	9,391				4417,578	2,743	9,887
1276,602	2,609	9,402				4440,156	2,745	9,892
1283,027	2,612	9,414				4462,734	2,746	9,897
1289,453	2,615	9,425				4485,313	2,748	9,901
1295,879	2,618	9,435				4507,891	2,749	9,906
1302,305	2,621	9,446				4530,469	2,750	9,910
1308,730	2,624	9,456				4553,047	2,751	9,915
1315,156	2,627	9,465				4575,625	2,752	9,919
1321,582	2,629	9,475				4598,203	2,753	9,923
1328,008	2,632	9,484				4620,781	2,754	9,926
1334,434	2,634	9,493				4643,359	2,755	9,930
1340,859	2,637	9,501				4665,938	2,756	9,933
1347,285	2,639	9,509				4688,516	2,757	9,937
1353,711	2,641	9,517				4711,094	2,758	9,940

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE								
11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
1360,137	2,643	9,525				4733,672	2,759	9,943
1366,563	2,645	9,532				4756,250	2,760	9,946
1372,988	2,647	9,539				4778,828	2,761	9,948
1379,414	2,649	9,546				4801,406	2,761	9,951
1385,840	2,651	9,553				4823,984	2,762	9,954
1392,266	2,653	9,559				4846,563	2,763	9,956
1398,691	2,654	9,565				4869,141	2,763	9,958
1405,117	2,656	9,571				4891,719	2,764	9,961
1411,543	2,658	9,577				4914,297	2,765	9,963
1417,969	2,659	9,583				4936,875	2,765	9,965
1424,395	2,661	9,588				4959,453	2,766	9,967
1430,820	2,662	9,593				4982,031	2,766	9,969
1437,246	2,663	9,598				5004,609	2,767	9,971
1443,672	2,665	9,603				5027,188	2,767	9,973
1450,098	2,666	9,607				5049,766	2,768	9,974
1456,523	2,667	9,612				5072,344	2,768	9,976
1462,949	2,668	9,616				5094,922	2,769	9,978
1469,375	2,670	9,620				5117,500	2,769	9,979
1475,801	2,671	9,624				5140,078	2,770	9,981
1482,227	2,672	9,628				5162,656	2,770	9,982
1488,652	2,673	9,632				5185,234	2,770	9,984
1495,078	2,674	9,635				5207,813	2,771	9,985
1501,504	2,675	9,639				5230,391	2,771	9,986
1507,930	2,676	9,642				5252,969	2,771	9,988
1514,355	2,676	9,645				5275,547	2,772	9,989
1520,781	2,677	9,648				5298,125	2,772	9,990
1527,207	2,678	9,651				5320,703	2,772	9,991
1533,633	2,679	9,654				5343,281	2,773	9,992
1540,059	2,680	9,656				5365,859	2,773	9,993
1546,484	2,680	9,659				5388,438	2,773	9,994
1552,910	2,681	9,661				5411,016	2,774	9,995
1559,336	2,682	9,664				5433,594	2,774	9,996
1565,762	2,682	9,666				5456,172	2,774	9,997
1572,188	2,683	9,668				5478,750	2,774	9,998
1578,613	2,683	9,670				5501,328	2,775	9,999
1585,039	2,684	9,672				5523,906	2,775	9,999
1591,465	2,684	9,674				5546,484	2,775	10,000
1597,891	2,685	9,676				5569,063	2,775	10,001
1604,316	2,685	9,678				5591,641	2,775	10,002
1610,742	2,686	9,679				5614,219	2,776	10,002
1617,168	2,686	9,681				5636,797	2,776	10,003
1623,594	2,687	9,682				5659,375	2,776	10,004

MODELADO DE LAS CURVAS DE AVANCE								
11 ml/min			7 ml/min			3 ml/min		
Tiempo, min	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro	Tiempo	meq/L	mg/L Boro
1630,020	2,687	9,684				5681,953	2,776	10,004
1636,445	2,688	9,685				5704,531	2,776	10,005
1642,871	2,688	9,687				5727,109	2,776	10,005
1649,297	2,688	9,688				5749,688	2,777	10,006
1655,723	2,689	9,689				5772,266	2,777	10,007
1662,148	2,689	9,690				5794,844	2,777	10,007
1668,574	2,689	9,691				5817,422	2,777	10,008
1675,000	2,690	9,693				5840,000	2,777	10,008

Anexo 7. Panel fotográfico



Figura 44. Captación del agua a tratar en laboratorio de la salida del filtro de la Planta de Tratamiento de Agua de Ite

Fuente: Elaboración propia.

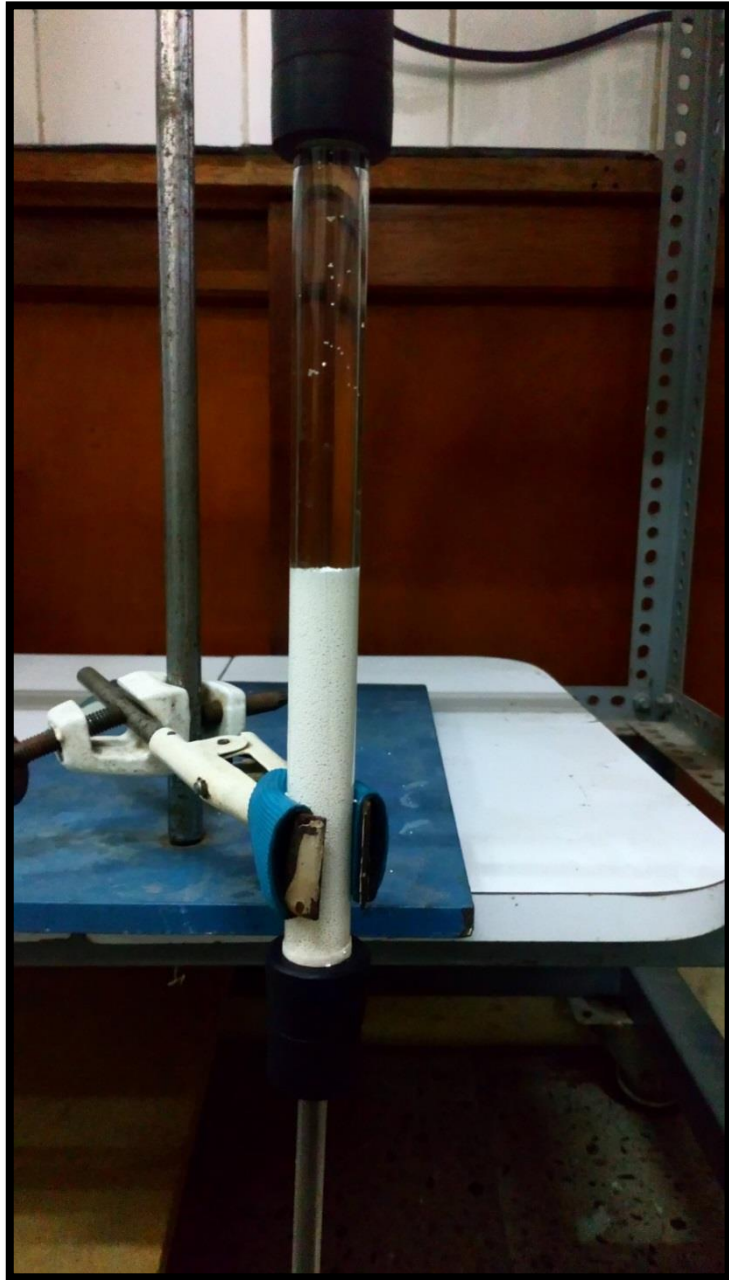


Figura 45. Imagen de la zona del lecho empacado.

Fuente: Elaboración propia.

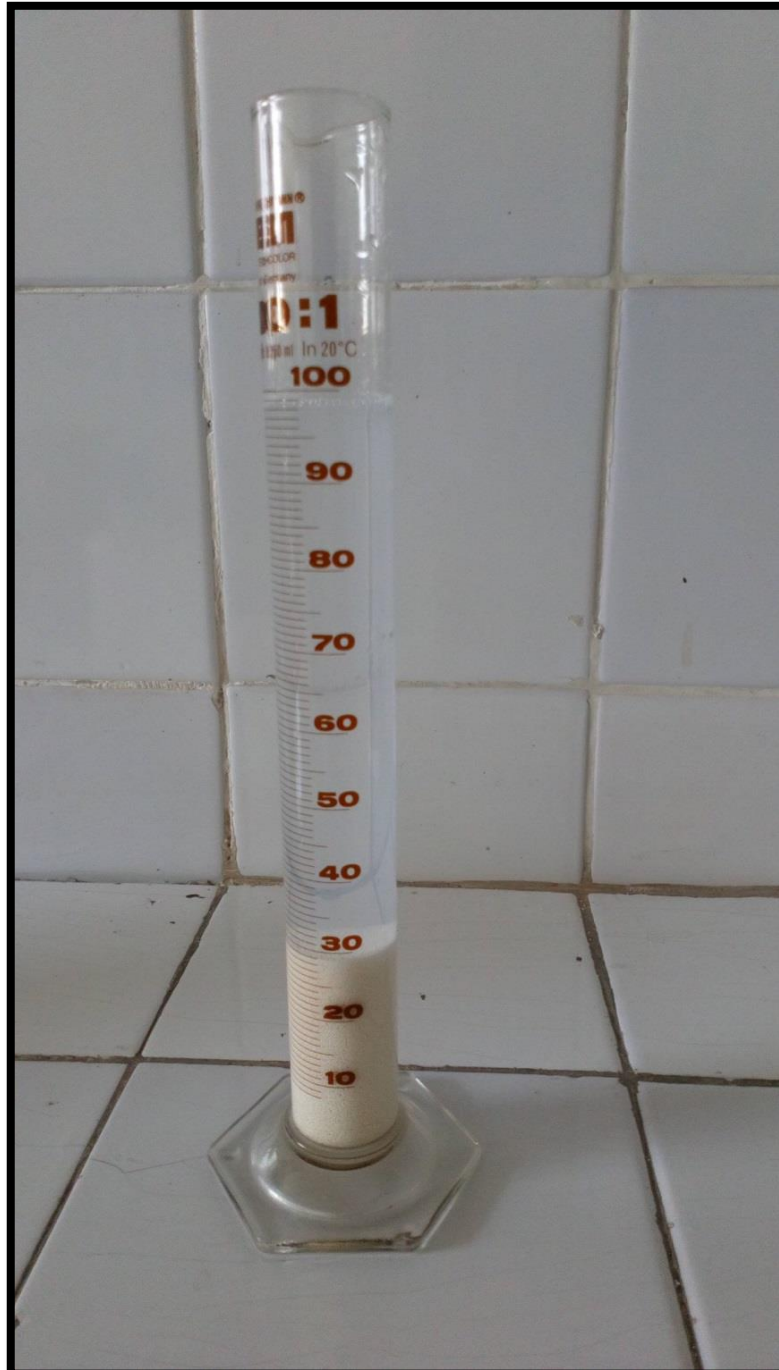


Figura 46. Cálculo para hallar la densidad aparente.

Fuente: Elaboración propia.

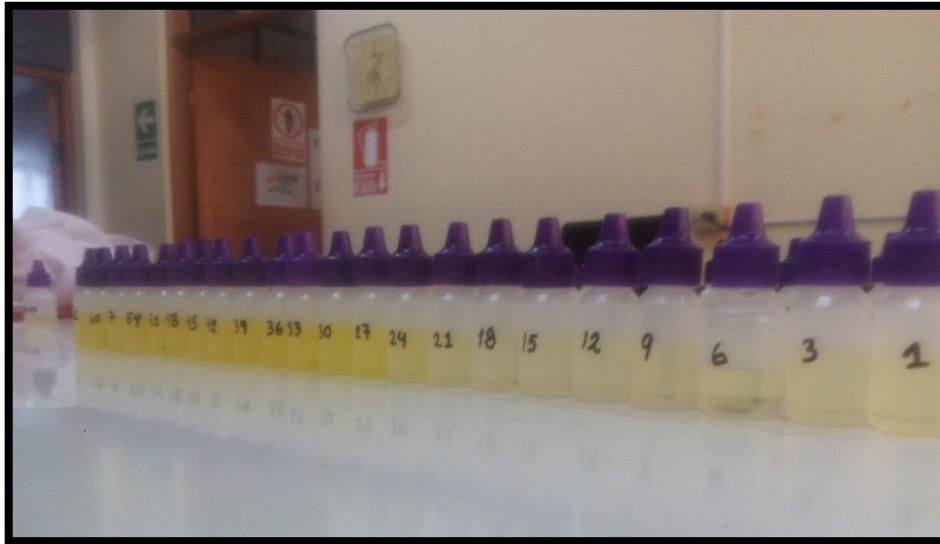


Figura 47. Muestra de los diferentes puntos de una curva de avance.

Fuente: Elaboración propia.

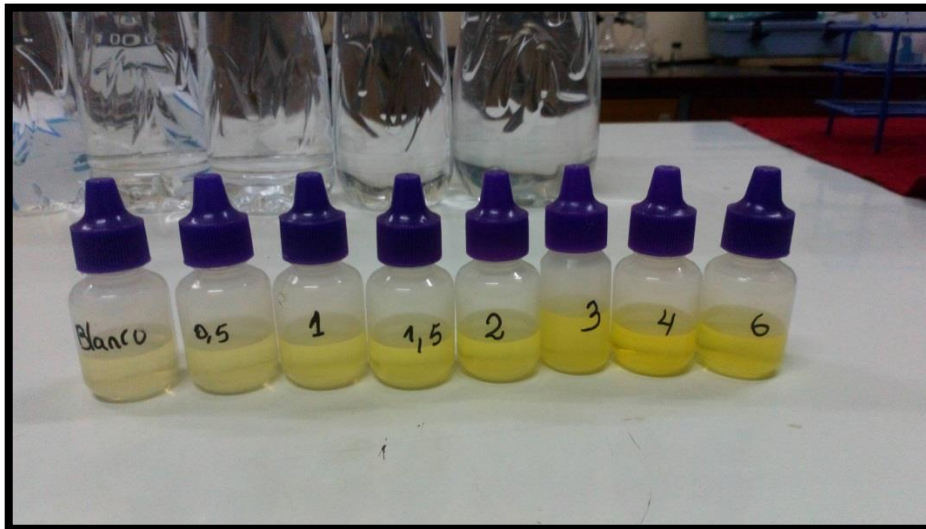


Figura 48. Muestra de análisis para la curva de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

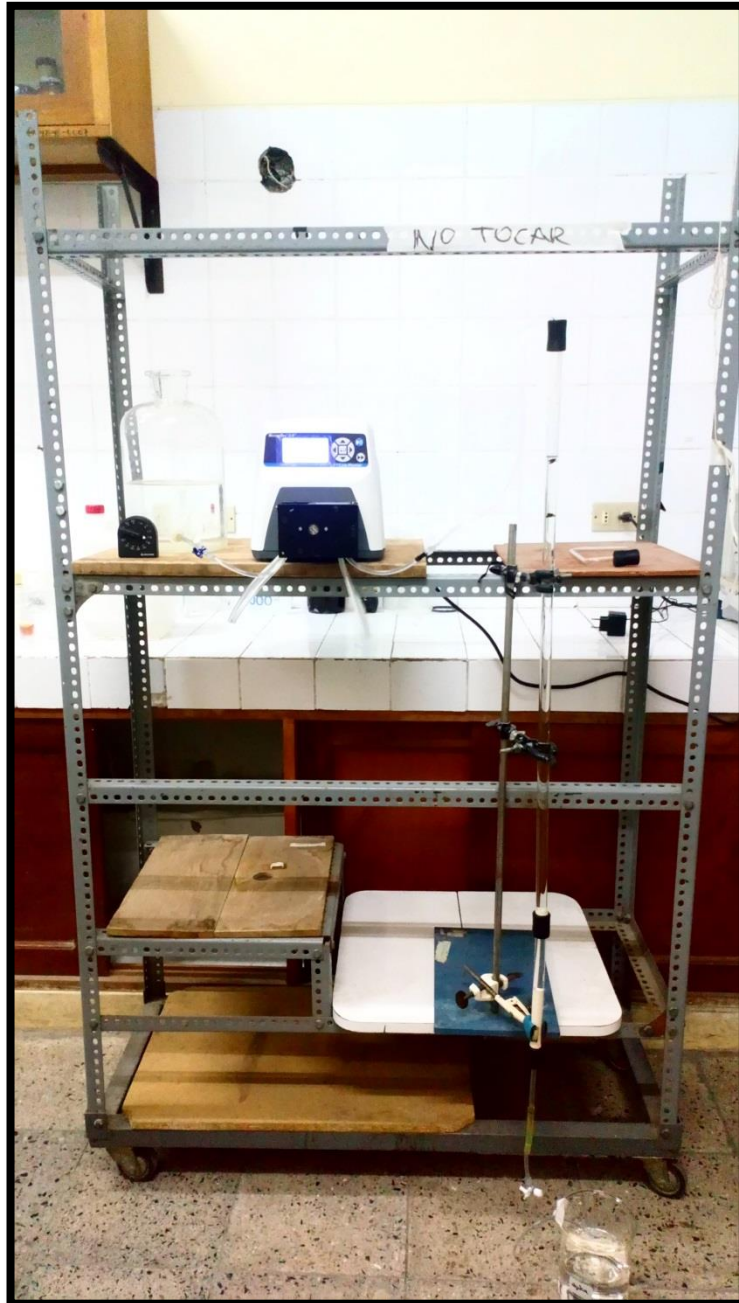


Figura 49. Equipo de trabajo (Columna de intercambio iónico).

Fuente: Elaboración propia.