

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE
UN DESCARBONATADOR-ABLANDADOR DE AGUA
PARA UNA FINCA CAFETALERA CON
FUMIGACION FOLIAR
Y PLANTACIONES ORNAMENTALES

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE
UN
DESCARBONATADOR -
ABLANDADOR DE AGUA
PARA UNA FINCA CAFETALERA
CON
FUMIGACION FOLIAR
Y
PLANTACIONES ORNAMENTALES

Jean Paul Tarot Villela

TRABAJO DE GRADUACION

PRESENTADO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE

INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA

1992

Vo. Bo.

(f) 
Ing. Eduardo Calderón.
Asesor.

Tribunal:

(f) 
Ing. Oscar Gil

(f) 
Lic. Roberto De León

(f) 
Ing. Eduardo Calderón

Fecha de aprobación: Noviembre 11 de 1992.

A Dios nuestro Señor
Al Beato Mons. José María Escribá De Balaguer
A mis padres y a mi familia
A Betty, con cariño
Al Tour, amigos por siempre

CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | XIV |
| I. INTRODUCCION | 1 |
| II. ANTECEDENTES TEORICOS | 4 |
| A. Dureza del agua | 5 |
| B. pH alcalino | 8 |
| C. Lo tradicionalmente utilizado para acondicionar agua en la finca y sus problemas | 10 |
| D. Otros métodos posibles para acondicionar el agua | 11 |
| 1. Eliminación de la dureza | 11 |
| 2. Eliminación de la alcalinidad | 12 |
| E. Métodos para suavizar y descarbonatar agua | 13 |
| 1. Primer método | 13 |
| 2. Segundo método | 17 |
| 3. Tercer método | 18 |
| a. Suavización total sin descarbonatación | 23 |
| b. Suavización parcial con descarbonatación total | 24 |
| c. Suavización total con descarbonatación total | 25 |
| III. ALGUNOS ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR IONICO | 28 |
| A. Contacto entre la resina y el agua | 29 |

| | Página |
|---|--------|
| B. Tipo de material de intercambio iónico a utilizar | 30 |
| C. Concentración del regenerante | 31 |
| D. Tipo de regenerante | 32 |
| E. Forma en que se regenera | 33 |
| IV. CALCULOS PARA DISEÑAR EL INTERCAMBIADOR IONICO | 38 |
| A. Datos recopilados en entrevistas con el encargado de la finca | 38 |
| B. Demanda de agua para dilución de químicos en la Finca Panabaj | 39 |
| C. Selección de la marca de la resina | 40 |
| D. Capacidad en equivalentes de la resina seleccionada | 41 |
| E. Cantidad de resina necesaria | 42 |
| F. Dimensiones del intercambiador | 43 |
| G. Materiales a utilizar en el intercambiador | 44 |
| V. FORMAS DE REPORTAR EL CONTENIDO DE DUREZA Y BICARBONATOS | 48 |
| VI. METODOS PARA DETERMINAR DUREZA, CARBONATOS, BICARBONATOS Y pH | 49 |
| A. Experimento 1. Determinación de carbonatos y bicarbonatos | 52 |
| B. Experimento 2. Determinación de dureza | 56 |
| C. Concentración de las soluciones utilizadas | 60 |

| | Página |
|---|--------|
| VII. RESULTADOS | 62 |
| A. Flujos recomendados por el fabricante | 63 |
| B. Evaluación del funcionamiento del intercambiador | 65 |
| 1. Calidad del agua al entrar al intercambiador | 67 |
| a. Concentración de bicarbonatos en el agua cruda | 68 |
| b. Concentración de carbonatos en el agua cruda | 69 |
| c. Determinación de dureza en el agua cruda | 70 |
| 2. Calidad del agua tratada | 71 |
| C. Pruebas realizadas con el agua tratada | 76 |
| D. Aspecto del intercambiador | 77 |
| E. Evaluación estadística | 82 |
| 1. Evaluación estadística de los valores del pH | 82 |
| 2. Evaluación estadística de la reproducibilidad de las condiciones óptimas | 84 |
| F. Evaluación financiera | 86 |
| VIII. DISCUSIONES | 91 |
| IX. CONCLUSIONES | 100 |
| X. RECOMENDACIONES | 102 |
| XI. BIBLIOGRAFIA | 104 |

| | Página |
|--|--------|
| APENDICES | 107 |
| A. Análisis del agua de la Finca Panabaj realizado por Agrilab | 107 |
| B. Tablas de algunos químicos hidrosolubles utilizados en fincas cafetaleras | 108 |
| Tabla B.1 Químicos afectados por la dureza del agua para dilución | 108 |
| Tabla B.2 Químicos afectados por el pH del agua de dilución | 110 |
| C. Hoja técnica de la resina Rohm and Haas Amberlite IR-120 Plus | 112 |

LISTA DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|-------|--|--------|
| 5.1 | Datos para determinar la concentración de las soluciones usadas | 60 |
| 6.1 | pH del pHímetro vrs. pH del papel | 62 |
| 6.2 | Flujos de agua para evaluar el comportamiento del intercambiador | 65 |
| 6.3 | Titulante consumido por los blancos | 66 |
| 6.4 | Datos obtenidos en pruebas con el agua cruda | 68 |
| 6.5 | Calidad del agua cruda | 71 |
| 6.6 | Datos obtenidos en pruebas con el agua tratada | 71 |
| 6.7 | Reproducibilidad de condiciones óptimas (flujo máximo) | 73 |
| 6.8 | Calidad del agua tratada en condiciones óptimas | 75 |
| 6.9 | pH del Malathión diluido con agua tratada y sin tratar | 76 |
| 6.10 | pH del Látigo diluido con agua tratada y sin tratar | 76 |
| 6.11 | pH del Gramoxone diluido con agua tratada y sin tratar | 77 |
| 6.12 | Análisis estadístico del % de similitud entre el pH del pHímetro y el pH del papel | 82 |
| 6.13 | Exactitud del pH por medio de papel | 84 |
| 6.14 | Análisis estadístico de la reproducibilidad de las condiciones óptimas | 85 |

Tabla

Página

| | | |
|-----|---|-----|
| B.1 | Químicos afectados por la dureza del agua para dilución | 108 |
| B.2 | Químicos afectados por el pH del agua de dilución | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|--------|
| 1. Afinidad de las resinas intercambiadoras hacia ciertos iones | 19 |
| 2. Regeneración y tratamiento de agua en paralelo | 35 |
| 3. Regeneración y tratamiento de agua en contracorriente | 36 |
| 4. Diseño del intercambiador iónico | 44 |
| 5. Sistema de retención de la resina | 47 |
| 6. Laboratorio montado en la finca | 50 |
| 7. Equipo utilizado en las determinaciones de dureza, carbonatos, bicarbonatos y pH | 51 |
| 8. pH según pHímetro y papel | 63 |
| 9. El intercambiador en tratamiento de agua, con flujo de arriba hacia abajo | 77 |
| 10. Expansión de la resina del intercambiador, con flujo de abajo hacia arriba | 78 |
| 11. El intercambiador regenerándose, con flujo en sentido inverso al tratamiento de agua | 79 |
| 12. Lavado del regenerante. Flujo de arriba hacia abajo | 81 |

RESUMEN:

El presente trabajo presenta las consideraciones que se tomaron y los pasos que se siguieron para seleccionar, diseñar, construir y evaluar aspectos operacionales y financieros del sistema más adecuado para descarbonatar y suavizar agua destinada para dilución de químicos en la Finca Panabaj. El sistema seleccionado resultó ser el intercambio catiónico mediante resina sulfonada, con eficiencias del 100% en la remoción de alcalinidad, dureza, carbonatos y bicarbonatos. Las condiciones óptimas de operación son totalmente reproducibles. Entre cada regeneración, el sistema puede llegar a acondicionar 931.14 Litros de agua de la Finca Panabaj. El costo final del intercambiador iónico fue de Q 865.19. La utilización del intercambiador catiónico genera ahorros económicos en las operaciones de la Finca Panabaj, y la inversión total se recupera en 17.5 meses calendario.

I. INTRODUCCION:

Debido a las cualidades del agua como solvente, el agua proveniente de ríos y quebradas está contaminada con muchas sales. Si las sales predominantes son bicarbonatos, su pH alcalino oscilará, generalmente, entre 7.5 y 8.5. Los bicarbonatos más abundantes en el agua natural sin tratamiento son los de sodio, calcio y magnesio.

La totalidad de químicos foliares son de pH ácido, para facilitar su absorción por la planta. Por razones de transporte, estos productos se encuentran altamente concentrados, y su dilución se hace, generalmente, con agua. El pH del agua debe ser neutro o ligeramente ácido para evitar que reaccionen neutralizándose.

En la exportación de plantas ornamentales, debido a exigencias de los países importadores, no se puede enviar tierra. Por esto, la planta debe prepararse finalmente para su exportación: en el caso del "PONY", se le cortan las raíces y se resiembra en arena, regándola con agua. Si el agua contiene bicarbonatos, el desarrollo de las raíces es desfavorecida, corriendo peligro la vida de la planta.

El calcio y el magnesio dan dureza al agua, y al usarla para diluir químicos, causan la precipitación de una parte de

los compuestos no polares que contengan en su estructura una sal monobásica. Este problema también lo causa el resto de cationes metálicos divalentes. Con el uso de agua dura se restringe el campo de elección del químico a diluir, siendo lo más recomendable utilizar agua suave.

La finca "Panabaj" produce café que muchas veces requiere de fumigación foliar para fertilizar la plantación y para controlar malezas, plagas, hongos y enfermedades. Además se proyecta preparar plantas ornamentales para su exportación, tales como "PONY". Según análisis de agua practicado por el Laboratorio de Suelos y Plantas AGRILAB (ver apéndice A), el agua se considera dura y su pH es 7.99, conteniendo un exceso de bicarbonatos.

El propósito de este trabajo es investigar los métodos posibles de acondicionamiento de agua para utilizarse en la finca "Panabaj" para hacer óptima la fumigación foliar, considerándose además su uso en el proyecto de preparación final de plantas ornamentales para exportación, seleccionando, construyendo y evaluando el sistema más adecuado.

Para ésto, el sistema seleccionado removerá del agua, hasta niveles aceptables, los bicarbonatos (adaptando así su

pH y además acondicionándola para su uso en el desarrollo de las raíces de plantas ornamentales), el calcio y el magnesio (evitando la precipitación parcial de los químicos a diluir).

II. ANTECEDENTES TEÓRICOS:

Por razones de transporte, los químicos en estado líquido utilizados en fincas se encuentran altamente concentrados, siendo necesario diluirlos o disolverlos hasta las concentraciones recomendadas. Generalmente se deben diluir con agua, por lo que ambos deben ser totalmente miscibles.

Aunque la molécula del agua, en su totalidad, no tiene carga eléctrica, es altamente polar porque dentro de su estructura se encuentra una parte con carga parcial positiva (los hidrógenos) y otra con carga parcial negativa (el oxígeno). Debido a esto, el agua es buen conductor de la electricidad, y su capacidad de conducción eléctrica es mejorada con la presencia de sales disueltas.

Los compuestos que se puedan disociar en dos partes con carga (compuestos polares), son las únicas sustancias que se pueden disolver y mezclar fácilmente con el agua, como las sales. Las sales se disuelven en el agua como radicales o iones con cargas polarizadas. Por ejemplo, el sulfato de calcio se encuentra disuelto formando el radical calcio, con carga positiva, y el radical sulfato, con carga negativa. Asimismo, el bicarbonato de calcio se encuentra disuelto en

dos porciones: el ion positivo, conteniendo al calcio, y el negativo, con el bicarbonato.

Debido a que el carbono y el hidrógeno tienen electro-negatividades similares, los compuestos que forman no son polares. Debido a lo anterior, existen numerosos compuestos orgánicos no polares que las plantas pueden absorber. Si se desean comercializar en forma concentrada, para poder diluirlos con agua se debe polarizar un extremo de su estructura, como en el caso de los jabones, que a pesar de tener dentro de su estructura una gran parte no polar, es soluble en agua, por poseer en el otro extremo una pequeña parte polarizada en forma de sal.

Por lo tanto, los químicos que se diluyen o disuelven en agua deben tener dentro de su estructura, al menos, un extremo polar.

A. Dureza del agua:

El calcio y el magnesio dan dureza al agua y causan la precipitación de una parte de los compuestos no polares que contengan en su estructura un solo extremo polar en forma de sal catiónica monobásica. Esto se debe a que tanto el calcio como el magnesio son divalentes, teniendo capacidad de unirse

con dos aniones monobásicos. En general, esta precipitación la causan todos los cationes divalentes, pero dentro del término "dureza" sólo se incluye al calcio y al magnesio, por ser los únicos que se encuentran altamente concentrados en el agua natural. Los demás cationes divalentes tienen concentraciones despreciables, al ser comparados contra el calcio y magnesio, como se observa en el reporte de análisis de agua de AGRILAB, en el apéndice A.

Cuando un catión de calcio o magnesio se une a dos aniones monobásicos no polares, producen una sal insoluble en agua, por formar una molécula con extremos no polares. Existen muchos químicos utilizados en fincas cafetaleras que se diluyen en agua, y por poseer cuerpo aniónico monovalente no polar precipitan en presencia de dureza de agua. Como ejemplo se pueden citar al Alloxidim de Sodio, Cianato de Potasio, Blazer, Dehidroacetato de Sodio, Dowicide A, Pentaclorofenato de Sodio y Vapam. Sus estructuras químicas y usos en fincas cafetaleras se encuentran en la tabla B.1 del apéndice B. Por lo anterior, con agua dura se restringe el campo de elección del químico a diluir, siendo lo más recomendable utilizar agua suave.

Los bicarbonatos de calcio y magnesio fueron inicialmente llamados *dureza temporal*; a los sulfatos y

cloruros se les llamó *dureza permanente*. Esta distinción se debe a que los bicarbonatos tienden a precipitar cuando el agua es calentada o hervida, mientras que los sulfatos y cloruros no muestran esa tendencia. Sin embargo, como el carbonato de magnesio precipita sólo parcialmente con el calor, los términos *temporal* y *permanente* fueron reemplazados por *dureza de carbonatos* y *no-carbonatos*.

En el agua natural, la mayor parte de dureza de *carbonatos* se encuentra presente en forma de *bicarbonatos* de calcio y magnesio, los cuales tienden a romperse en ebullición, liberar dióxido de carbono y formar los carbonatos de calcio y magnesio, que son relativamente insolubles, según la siguiente reacción:



Al haber en el agua bicarbonato de calcio, el sedimento que se deposita es carbonato de calcio, y así, con el término *dureza de carbonatos* nos referimos a los bicarbonatos de calcio y magnesio, por ser los que se encuentran disueltos en el agua.

Las sales que componen la dureza se encuentran en el agua en forma de *solución* y no en *suspensión*, por lo que es

imposible removerla por métodos físicos como filtración o centrifugación, siendo necesario un proceso químico para removerla.

Generalmente, la dureza excesiva del agua es indeseable por muchas razones, siendo las más comunes su efecto destructivo de la capacidad limpiadora del jabón, la insolubilización en agua de todos los aniones monobásicos con cuerpo no polar, la formación de sedimentos e incrustaciones en el equipo y dificultar la fabricación de colorantes, hielo, papel, etc.

B. PH alcalino:

Los químicos que son absorbidos en las hojas de las plantas se conocen como foliares, y se aplican en solución ácida para favorecer su absorción. La mayoría son hidrosolubles y se encuentran concentrados. El objetivo, al añadir agua, es diluir el químico foliar, pero si el agua tiene pH alcalino se neutralizará parte del químico debido a su acidez, y aunque se logre una solución final ácida, habrá reaccionado químicamente una porción del químico en la neutralización, la cual perdería su capacidad de ser absorbida por las plantas. Este sería el método más antieconómico para acidificar el agua por implicar un

desperdicio del químico, destinado para ser absorbido por la planta, en la neutralización del agua.

Si el agua posee carbonatos y bicarbonatos de sodio, magnesio o calcio en proporciones altas, el agua adquiere un pH ligeramente alcalino, y para utilizar óptimamente los químicos foliares se debe acidificar.

En las fincas cafetaleras se utilizan muchos químicos perjudicados por el pH alcalino del agua de dilución. Como ejemplo se pueden citar al Azodrin, Gramoxone, Roundup, Vydate, Metasystox R, Neguvon, Lannate, Lasso, Malathion, Dithane y Ambush. Sus estructuras químicas, usos en fincas cafetaleras y condiciones óptimas de pH se encuentran en la tabla B.2 del apéndice B.

Los bicarbonatos, además de influir en el pH, también evitan el desarrollo de las raíces de una planta. Las plantas ornamentales se exportan sin la tierra, para evitar contaminación de eventuales impurezas fitotóxicas de un país a otro, y evitar así la expansión de enfermedades del reino vegetal. Para lograrlo, en algunos casos, como en el caso del Pony, se cortan las raíces de la planta ornamental, y se resiembra en arena. Para favorecer el desarrollo de las nuevas raíces en arena, se riega con agua con la menor cantidad de carbonatos.

C. Lo tradicionalmente utilizado para acondicionar agua en la finca y sus problemas:

En la actualidad, para resolver el problema de alcalinidad y dureza presente en el agua destinada para diluir fertilizantes y pesticidas foliares se utilizan químicos, como el pH⁺ de Stoller, que se mezclan con el agua. Generalmente estos químicos, además de tener un pH ácido, de alrededor de 2.5, contienen agentes quelantes que evitan que se degraden los iones de calcio y magnesio, para que la planta pueda absorberlos. Si se utiliza el agua con carbonatos para estimular el crecimiento de las raíces de una planta ornamental, previamente se le debe agregar un ácido que neutralice los bicarbonatos, pero que no acidifique a más de 4, para no lastimar a la planta.

Estos químicos presentan varias desventajas, entre ellas: son moderadamente tóxicos y muy irritantes, por lo que su manejo directo es peligroso; también contaminan el agua, haciéndola dañina si eventualmente alguna persona o animal accidentalmente toma de ella. Además, como el agua de río presenta condiciones variables, unas veces puede existir un déficit del reactivo, obteniéndose resultados subóptimos, tanto en el uso de químicos foliares como en el desarrollo de raíces de plantas ornamentales, y en otros casos podría

existir un excedente del reactivo, con lo que además de desperdiciarse parte del químico se correría el riesgo de lastimar a la planta por los efectos irritantes de una acidez excesiva.

A lo anterior se suma su precio, que al cabo de cierto tiempo, utilizarlos resulta ser una inversión alta (Agribodegas, 1992).

En el mercado de agroquímicos se encuentran algunos químicos foliares que ya contienen su acidificador del agua, principalmente de Químicas Stoller, pero son substancialmente más caros que los que no traen este corrector de pH, con lo que su uso continuo viene siendo antieconómico (Agribodegas, 1992).

D. Otros métodos posibles para acondicionar el agua:

1. Eliminación de la dureza (Ca y Mg):

La suavización de agua consiste en la remoción de las sales de calcio y magnesio, llamadas *dureza*. Para ello se pueden utilizar químicos en forma de agentes precipitantes, como cal o carbonato de sodio, o bien químicos en forma de agentes encapsulantes, como el pH^+ de químicas Stoller, o resinas de intercambio iónico.

2. Eliminación de la alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos):

En el agua analizada de la finca y en la mayoría de aguas naturales, la alcalinidad proviene de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio. Con su presencia, el agua obtiene un pH ligeramente alcalino o básico. Los hidróxidos rara vez se encuentran en aguas naturales.

Aunque la eliminación de CO_2 puede considerarse como descarbonatación, su presencia en el agua no afecta ni a los agroquímicos, por no alcalinizar el agua, ni a las plantas ornamentales, por no inhibir la formación de raíces. Por ello, en el presente trabajo se definirá "descarbonatación", como la eliminación de los carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio. Debido a que la solubilidad del carbonato de calcio es muy baja, éste generalmente se encuentra en concentraciones tan bajas que resulta ser despreciable.

Para descarbonatar agua, se pueden usar químicos neutralizantes, como el pH^+ de químicas Stoller, agentes precipitantes de carbonatos, como cal, o resinas de intercambio iónico.

E. Métodos para suavizar y descarbonatar agua:

En la mayoría de los métodos, al suavizar agua, ésta se descarbonata, pues se eliminan los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. En algunos casos, la dureza no carbonato precipita con los bicarbonatos de sodio, complementándose así ambos procesos de suavización y descarbonatación.

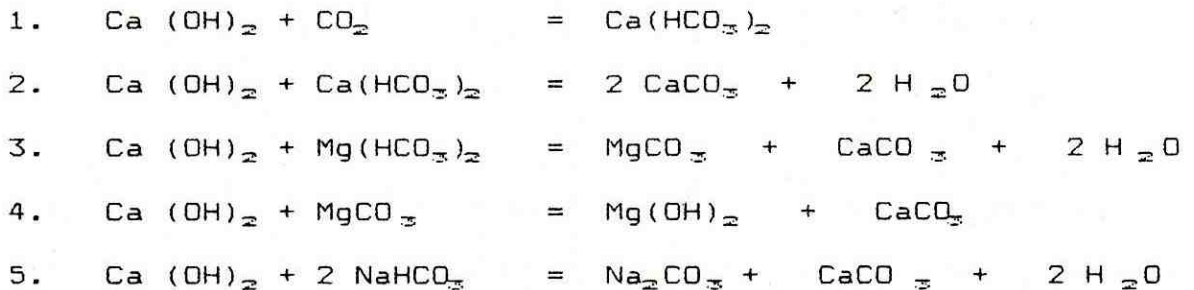
Para suavizar y descarbonatar agua existen varios métodos; los más comunes son tres: en frío, mediante productos químicos; en caliente, mediante productos químicos; y a través de materiales de intercambio iónico, los cuales se explican brevemente a continuación:

1. Primer método:

El ablandamiento total-descarbonatación total en frío, mediante productos químicos, conlleva a agregar estequiométricamente dos químicos en dos pasos sucesivos, con el objetivo de hacer precipitar los carbonatos y la dureza presente:

Primero se debe agregar al agua, de una forma estequiométrica, iones de calcio e hidroxilos, con cal

hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Con los iones calcio, los bicarbonatos de sodio, magnesio y calcio pasan a ser carbonatos. Los carbonatos de calcio precipitan y por dejar de estar en solución ya no representan peligro de dureza en el agua. Los carbonatos de magnesio son solubles, y es aquí en donde reaccionan los hidroxilos, para formar hidróxido de magnesio que es poco soluble y precipita. En ésta reacción también participa el ion de calcio, precipitando con el radical carbonato en forma de carbonato de calcio. Las reacciones que se deben tomar en cuenta para la adición estequiométrica de la cal son:



Los carbonatos de sodio formados no representan dureza, por no tener en su estructura ni el ion de calcio ni el de magnesio, pero por ser bicarbonatos alcalinizan el agua.

Las cinco reacciones anteriores se pueden llevar a cabo utilizando hidróxido de sodio (NaOH) en vez de cal hidratada, obteniéndose los mismos productos y el carbonato de sodio.

Su uso representaría más gastos, debido a que se necesitan más moles de hidróxido de sodio que al usar cal hidratada, y su precio es mayor al de la cal.

El segundo paso se realiza cuando existen sulfatos y cloruros de magnesio o calcio (dureza no carbonato). La primera reacción es con la cal, la cual reacciona con los sulfatos y cloruros de magnesio formando hidróxido de magnesio, que precipita, y sulfatos y cloruros de calcio, los cuales por seguir en solución representan problema de dureza. Las reacciones son:



Es aquí donde se debe agregar estequiométricamente el carbonato de sodio (Na_2CO_3) necesario, tomando en cuenta el formado en la reacción 5. Este reactivo se combina con sulfatos y cloruros de calcio para formar carbonato de calcio, que precipita, y cloruros y sulfatos de sodio que, a pesar de estar en solución, no representan dureza por no contener ni magnesio ni calcio, y tampoco presentan problemas de alcalinidad, por no tener al ion bicarbonato en su estructura. Las reacciones se muestran a continuación:





Puede darse el caso de agua con alto contenido de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y bicarbonato de sodio (NaHCO_3), al punto de ser más que la necesaria para llevar a cabo estequiométricamente las reacciones 8 y 9. En estos casos, para eliminar al máximo la presencia de carbonatos, se debe agregar estequiométricamente sulfato de calcio (CaSO_4) o cloruro de calcio (CaCl_2), para precipitar los carbonatos en forma de carbonatos de calcio, según las reacciones 8 y 9.

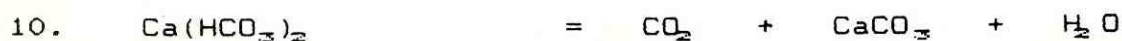
Las nueve reacciones anteriores de precipitación son lentas, pudiendo tardar varios días en llegar al equilibrio. Para que la reacción tarde únicamente unos minutos, se le puede agregar un núcleo de cristalización, el cual crecerá proporcionalmente a su volumen. Los cristales agregados son CaCO_3 , y deben estar limpios de coloides para resultados óptimos. Si el agua se ve turbia, para eliminar los coloides se puede agregar cloruro férrico ó policloruro de aluminio. Otro interferente para el crecimiento del cristal de CaCO_3 es el hidróxido de magnesio, que puede representar molestias en altas proporciones respecto del calcio. Por suerte, en aguas naturales la proporción de calcio es siempre superior a la de magnesio y sólo en casos especiales su efecto es notorio.

Debido a que el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio, a pesar de ser muy poco solubles, no precipitan completamente, la remoción de la dureza por este método no es perfecta, siendo de esperar una dureza final de 50 a 70 ppm CaCO_3 , en su mayoría carbonatos de calcio.

Como los químicos de este método se deben agregar estequiométricamente, no es recomendable su uso en tratamiento de aguas de ríos y quebradas porque poseen sales cuyas concentraciones generalmente varían poco, con lo que no se lograría una suavización y descarbonatación eficiente.

2. Segundo método:

La suavización total-descarbonatación total en caliente mediante productos químicos, se aplica en procesos en donde se puede aprovechar la alta temperatura del agua, como para calderas. Presenta la ventaja de una mayor eficiencia, debido principalmente a que la solubilidad de carbonato de calcio disminuye al aumentarse la temperatura del agua, y los bicarbonatos de calcio precipitan en forma de carbonatos de calcio debido a que el bióxido de carbono se vaporiza en agua caliente. Las reacciones son las mismas que la suavización-descarbonatación en frío, con esta excepción:



La dureza final obtenida con éste método es de alrededor de 10 ppm CaCO_3 .

Al igual que en el método anterior, los químicos de éste método se deben agregar estequiométricamente, por lo que su uso no es eficiente para tratar aguas de ríos y quebradas, por posibles variaciones de la concentración de sales del efluente.

3. Tercer método:

Por último, la descarbonatación-suavización del agua, utilizando materiales de intercambio iónico, se basa en las propiedades de ciertas resinas de interactuar químicamente con varios tipos de iones, intercambiándose los radicales considerando cargas eléctricas equivalentes entre la resina y la solución con la que está en contacto, hasta llegar al equilibrio.

Los métodos de intercambio iónico son más eficientes que los métodos con químicos para la remoción de dureza y carbonatos, siendo comunes de obtener resultados de dureza de menos de 1 ppm CaCO_3 . Además pueden llegar a remover todas las sales disueltas.

Al entrar en contacto la resina y el líquido a tratar, la reacción química tiende a llegar al equilibrio. Si este contacto fuera estático, la reacción finalizaría al alcanzar el equilibrio. Para alcanzar el mayor grado de intercambio iónico, es necesario crear etapas sucesivas de equilibrio mediante el fluido del líquido a tratar a través de las capas de la resina de intercambio. La afinidad de la resina hacia los iones no deseados en el líquido a tratar es más marcada mientras más diluidos se encuentren éstos (ver figura 1), por lo que al utilizarse etapas sucesivas de equilibrio se obtienen los mejores resultados, porque en cada etapa se van removiendo más eficientemente los iones no deseados del líquido a tratar.

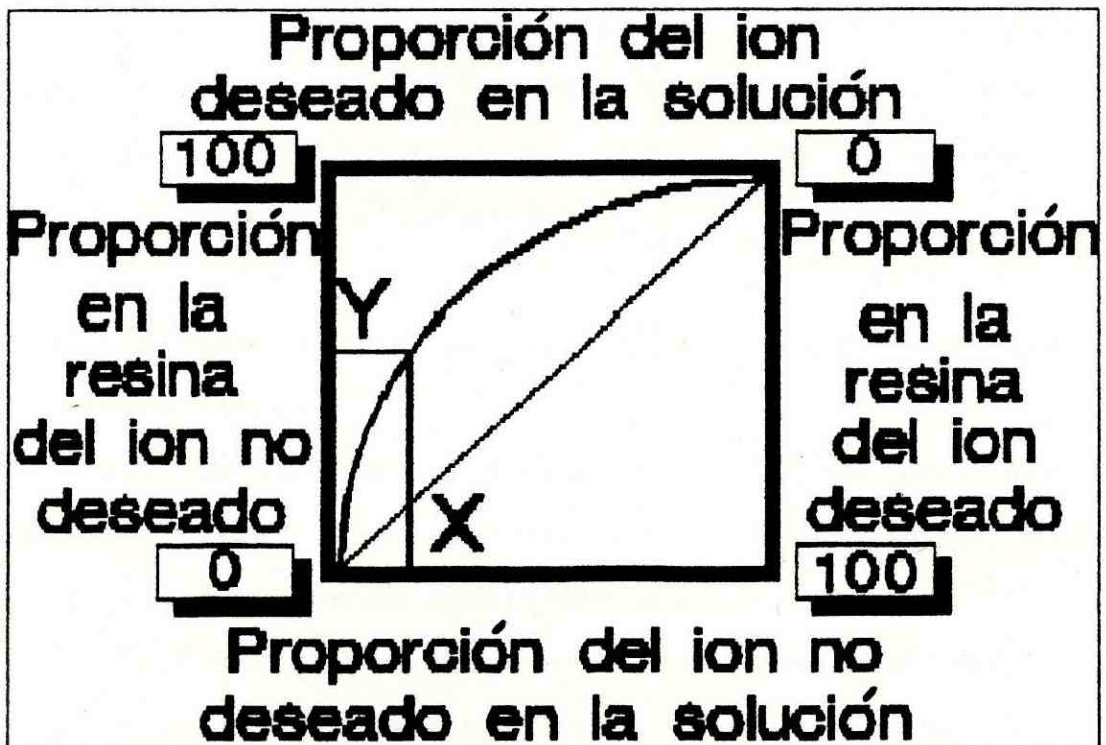


FIGURA 1. Afinidad de las resinas intercambiadoras hacia ciertos iones.

Las etapas sucesivas de intercambio se logran al pasar el fluido através de una cama estática de resina. Si la resina flotara, el contacto entre la resina y el líquido a tratar no sería homogéneo para todo el fluido, y no se lograrían etapas sucesivas de intercambio. Cuando el flujo del fluido es hacia arriba, se deben colocar accesorios mecánicos para evitar que la resina flote, como una membrana plástica inflable que detenga la resina por compresión. Para evitar estos accesorios extras, el flujo del líquido a tratar se hace hacia abajo.

La mayoría de sistemas de intercambio iónico se basan en resinas sintéticas, con cuerpo orgánico sulfónico, carboxílico, fosfónico, etc. que las hacen ser resistentes a altas temperaturas y pH. Las zeolitas naturales y sintéticas son polímeros inorgánicos con cuerpo de silicatos, que todavía se usan en la actualidad.

Actualmente existen dos tipos principales de resinas de intercambio iónico:

1. Las catiónicas, que atrapan cationes minerales u orgánicos y los intercambian por otro catión o por el ión hidrógeno. A su vez se subdividen en:

- A. Sulfónicas (HSO_3R), que son fuertemente ácidas y atrapan a todos los cationes, obteniéndose en el

efluente los ácidos de los aniones correspondientes a los cationes removidos, sales de cloro y sulfatos, CO_2 y H_2O .

B. Carboxílicas (HCO_2R), que son débilmente ácidas y atrapan sólo a los cationes unidos a los carbonatos, obteniéndose en el efluente las sales originales no carbonatadas, CO_2 y H_2O .

2. Las aniónicas, que generalmente actúan después que las catiónicas, atrapan aniones minerales u orgánicos y los intercambian por otro anión o por el ion hidroxilo. A su vez se subdividen en:

A. Suavemente básicas, en cuya estructura resalta la presencia de aminas primarias, secundarias y terciarias, obteniéndose en el efluente los hidróxidos de las sales de los cationes originales, sin atrapar al dióxido de carbono (CO_2) ni a los silicatos (SiO_2).

B. Fuertemente básicas, en cuya estructura resalta la presencia de aminas cuaternarias, obteniéndose en el efluente los hidróxidos de las sales de los cationes originales, atrapando a los silicatos en forma de HSiO_3^- y al dióxido de carbono, en forma de HCO_3^- .

Al cabo de cierto uso, la resina puede saturarse con los iones que atrapa, siendo necesario regenerarla para continuar con un proceso eficiente. La mayoría de resinas catiónicas que intercambian hidrógeno por cationes se pueden regenerar con solución 1% a 5% de ácido sulfúrico o 4% a 10% de ácido clorhídrico. Si la resina intercambia sodio por cationes de calcio y magnesio, se puede regenerar con una solución al 10% de cloruro de sodio. La mayoría de resinas aniónicas que intercambian hidroxilos por aniones se pueden regenerar con solución 2% a 4% de hidróxido de sodio.

La capacidad de intercambio de una resina se expresa generalmente en granos / pié cúbico de resina. Este dato es importante para determinar el volumen de agua que puede tratar cierta cantidad de resina entre cada regeneración. Para hacer este cálculo se debe conocer aproximadamente la concentración total de las sales presentes en el agua a tratar. Por seguridad, la resina se regenera antes que se sature totalmente.

No es recomendable utilizar resinas en el tratamiento de agua para beber, porque la eliminación de dureza es tan eficiente que el sabor del agua se vuelve desagradable. Generalmente el agua destinada para beber contiene de 8 a 15 grados franceses de dureza. Un grado francés equivale a 0.2

miliequivalentes / Litro de solución. Los grados franceses expresan la concentración de una sal considerando la valencia de los iones en que se disocia, así como la normalidad (N), que corresponde a una solución 1 N (uno normal) 5000 grados franceses.

Mediante el uso de resinas de intercambio iónico, se pueden obtener sistemas de ablandamiento total sin descarbonatación, ablandamiento parcial-descarbonatación total o bien ablandamiento total-descarbonatación total, según las necesidades requeridas. Para el funcionamiento óptimo de la resina, el agua debe ser clara. Las aguas turbias se deben tratar primero en un clarificador.

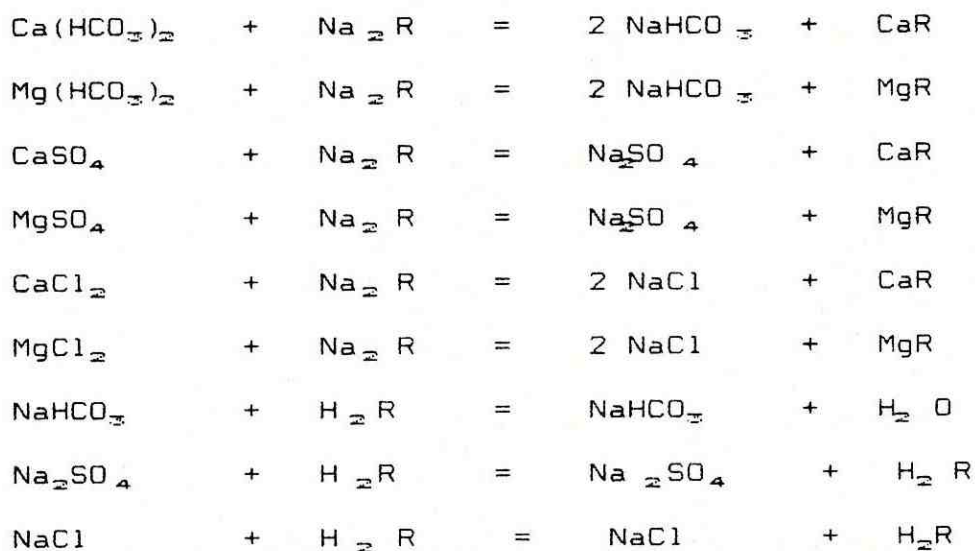
La acumulación de materia orgánica, bacterias o simple suciedad inorgánica puede llegar a disminuir la capacidad de intercambio iónico de la resina. Para ello se puede usar soluciones de cloro, soluciones cáusticas del 5% de sulfito de sodio a 45 grados celcius y retrolavado, con lo que la resina queda totalmente limpia.

Los sistemas comunes de intercambio iónico para suavizar y descarbonatar agua se explican brevemente a continuación:

a. Suavización total sin descarbonatación:

Se utiliza un intercambiador catiónico que se regenera

con solución de cloruro de sodio. Todas las sales del agua a tratar son convertidas a sales de sodio. Representando la resina en su estado original como NaR y en su estado saturado como CaR y MgR, las siguientes reacciones se llevan a cabo:

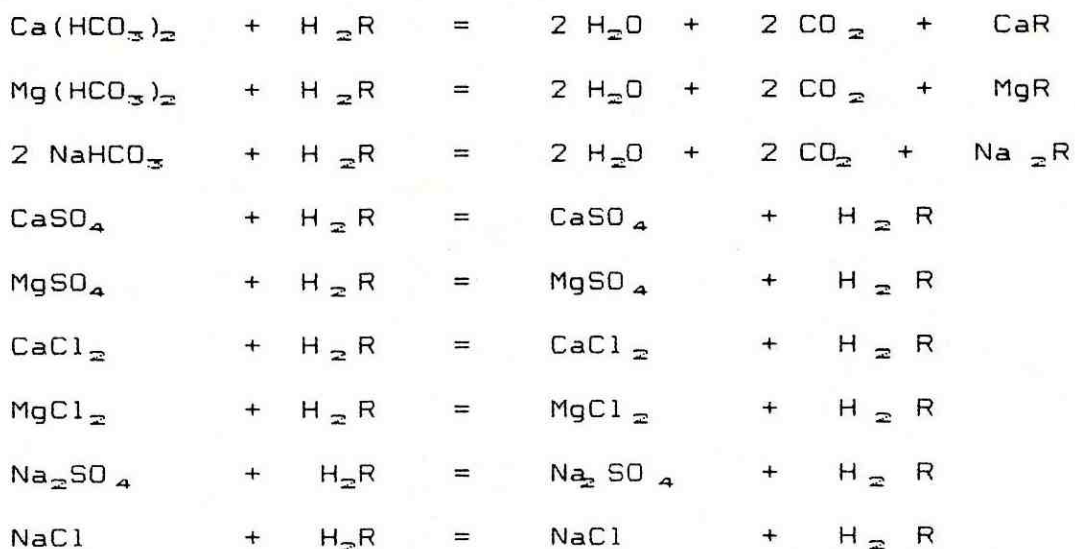


Este método no soluciona el problema de carbonatos en el agua, obteniéndose un efluente con el mismo pH que el agua original.

b. Suavización parcial con descarbonatación total:

El proceso utiliza una resina catiónica carboxilica de la forma H_2R en su estado regenerado, y de forma CaR, MgR y Na_2R en su estado saturado. Su regeneración se realiza con soluciones de ácido sulfúrico del 1% al 5% o con ácido

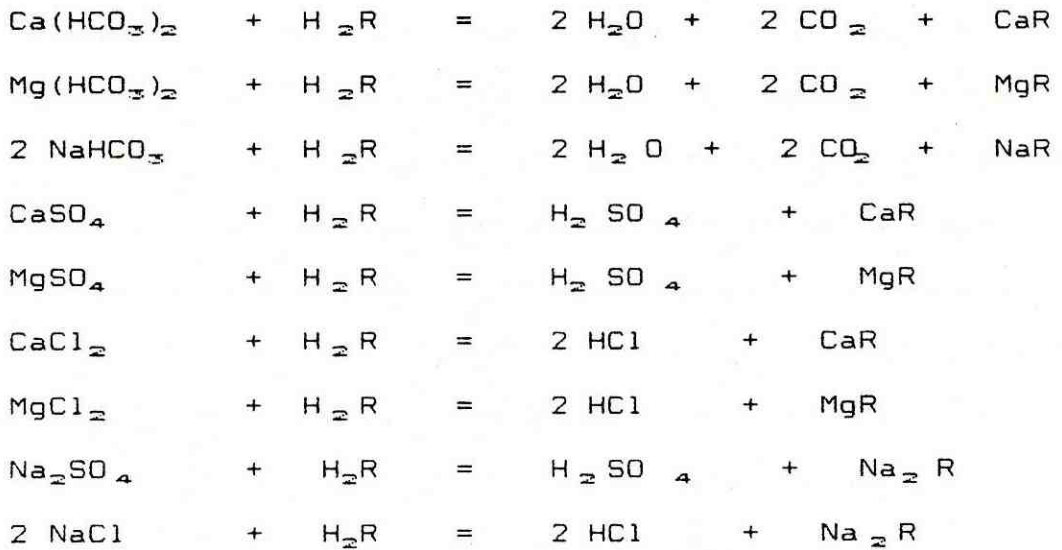
clorhídrico del 4% al 10%. Las siguientes reacciones se llevan a cabo:



Este método soluciona el problema de carbonatos y pH alcalino del agua, pero no remueve totalmente la dureza del agua.

c. Suavización total con descarbonatación total:

El proceso utiliza una resina catiónica sulfónica de la forma H_2R en su estado regenerado, y de la forma CaR , MgR y Na_2R en su estado saturado. Su regeneración se realiza con soluciones de ácido sulfúrico del 1% al 5% o con ácido clorhídrico del 4% al 10%. Las reacciones de la página siguiente se llevan a cabo:



Con este método se obtiene la mejor eficiencia operacional, porque soluciona los problemas de carbonatos y dureza al mismo tiempo. El costo de las resinas catiónicas y el cuerpo de los intercambiadores a utilizarse en las tres alternativas anteriores es similar. A diferencia de los métodos que utilizan químicos, este sistema se adapta eficientemente a las variaciones posibles de las concentraciones de sales del agua de la finca en estudio, por lo que es evidente la conveniencia de este método respecto de los demás.

Existen otros métodos de suavización total-descarbonatación total que purifican el agua mucho más que lo requerido por una finca, como la destilación o desionización,

que eliminan totalmente todas las sales aniónicas y catiónicas. Para la destilación se requiere un intercambiador de calor, cuyos costos de inversión y operación son mucho mayores al del sistema seleccionado. Para la desionización se necesita, además del sistema de resina de intercambio catiónico seleccionado, un sistema de intercambio aniónico, que utiliza una resina cuyo precio es aproximadamente cuatro veces mayor al de la catiónica.

III. ALGUNOS ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR IONICO:

El ciclo de operación de un intercambiador depende de la capacidad de intercambio útil de la resina y de la cantidad y calidad del agua a tratar. Cuando la capacidad de intercambio útil de la resina se ha agotado, se puede regenerar mediante el paso de una solución que contenga los iones originales.

El ciclo de operación tiene cuatro fases:

1. Tratamiento del agua, en donde se intercambian iones no deseados por iones deseados, mediante el paso del agua de arriba hacia abajo del intercambiador.
2. Expansión de la resina o retrolavado, mediante el flujo del agua desde abajo hasta arriba del intercambiador. Para esta fase se acostumbra dejar una cámara libre de expansión del 30% al 100% del volumen de la resina. Si el intercambiador es pequeño, se puede dejar una gran recámara libre sin tener que utilizar mucho material extra. Por lo anterior, el tamaño de la cámara libre de expansión del intercambiador a diseñar será del 75% el volumen de la resina.

3. Regeneración, mediante el paso de una solución conteniendo los iones originales. La dirección del regenerante suele ser de arriba hacia abajo para aprovechar la fuerza de la gravedad y asegurar un buen contacto entre el regenerante y la resina. Como se explica más adelante, puede ser en contracorriente o en paralelo respecto de la dirección del agua a tratar.

4. Lavado del regenerante, mediante el paso de agua en la misma dirección que el agua a tratar, de arriba hacia abajo.

La capacidad de intercambio útil depende principalmente del contacto logrado entre el agua y la resina, del tipo de resina con que se trabaja, de la concentración y tipo de regenerante utilizado y de la forma en que se ha regenerado la resina.

A. Contacto entre la resina y el agua:

Como las reacciones de intercambio se llevan a cabo rápidamente, el tiempo de contacto no causa dificultades. Sin embargo, cuando el agua a tratar tiene sólidos en suspensión, éstos pueden cubrir una buena parte de la resina e impedir el contacto requerido para el intercambio. El agua proveniente de ríos puede llevar sólidos en suspensión, que se deben remover previamente con un filtro.

Las resinas de intercambio iónico usualmente tienen forma de pequeñas esferas, para disponer de la mayor superficie de contacto posible entre el agua y la resina. Conforme se va utilizando el intercambiador iónico, la resina se va compactando, con lo que se dificulta la distribución homogénea del agua que pasa. Para aprovechar toda la resina del intercambiador, es necesario expandirla nuevamente utilizando agua en la dirección opuesta al flujo de agua a purificar.

B. Tipo de material de intercambio iónico a utilizar:

Los primeros materiales de intercambio iónico eran tierras naturales de silicio, con limitaciones de temperatura, pH y eficiencia de intercambio.

Con el tiempo se han logrado sintetizar materiales intercambiadores más eficientes, como las resinas. Existe una amplia gama de materiales sintéticos de intercambio iónico, abarcando rangos de capacidad de intercambio que van desde 0.5 hasta 4.0 meq / ml de resina.

Según se determinó anteriormente, la resina más conveniente para descarbonatar y suavizar agua es una catiónica sulfónica. Estas resinas intercambiadoras son

fabricadas por corporaciones como Rohm & Haas, Bayer, Zerolit, Purolite, Dow, etc. y ofrecen resinas que generalmente tienen equivalentes en las otras marcas.

Después de la selección de la resina que cumple con las especificaciones del agua requerida por el proceso, la decisión de la marca más conveniente generalmente se basa en los precios. Sólo cuando se desea comprar cantidades pequeñas de resina, la selección de la marca más conveniente puede depender de las cantidades mínimas de venta de los distribuidores.

C. Concentración del regenerante:

La regeneración se basa en la propiedad de las resinas intercambiadoras de buscar un equilibrio iónico con el fluido que tocan. Para lograr el mayor intercambio posible, es necesario crear etapas sucesivas de equilibrio, haciendo fluir el regenerante, rico en los iones deseados, a través de las capas de resina.

La concentración del regenerante debe ser lo suficientemente alta para que sea despreciable cualquier posible presencia de los iones no deseados en el regenerante, y disponer de uno con una proporción muy cercana al 100% de iones deseados (ver figura 1).

Por otro lado, para favorecer el intercambio, el regenerante debe estar diluido, para asegurar su buena distribución y lograr que toda la resina reciba un tratamiento homogéneo.

Se ha determinado que el rango de concentración óptimo para los regenerantes es de 4 a 10 meq. / 100 mL. Por ejemplo, la concentración del ácido clorhídrico debe ser de 4 a 10% y la del ácido sulfúrico de 1 a 5%.

Como en todo proceso de saturación, conforme avanza la regeneración, la eficiencia de intercambio de los iones no deseados por los deseados disminuye, porque el equilibrio final cada vez se encuentra más cercano, con lo que la demanda de iones deseados en la resina decrece. Por esto, entre más regenerante se utilice, la eficiencia en la remoción de iones disminuye, con lo que aumenta el costo por químicos usados durante la regeneración, pero la resina se acondiciona casi totalmente, lo cual aumenta su capacidad de intercambio y se alargan los lapsos de operación eficiente entre regeneraciones.

D. Tipo de regenerante:

Al regenerar resinas catiónicas, los regenerantes

comunes son el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico. Los vendedores de resinas intercambiadoras ofrecen datos de las capacidades obtenidas de la resina al usar cada ácido. La facilidad de intercambio del hidrógeno del ácido clorhídrico es superior a la de los hidrógenos del ácido sulfúrico, pero por poseer el último dos hidrógenos, su costo de operación es menor, de aproximadamente 0.83 veces el del clorhídrico.

Sin embargo, el ácido sulfúrico, en presencia de calcio, presenta la desventaja de formar un precipitado de sulfato de calcio, que puede estropear el buen contacto entre el agua y la resina. Para evitar este problema en resinas saturadas con calcio se utiliza como regenerante ácido clorhídrico. Por existir calcio en el agua de la finca en cuestión, la selección del regenerante se basará en este concepto.

E. Forma en que se regenera:

Durante el tratamiento de agua existe un intercambio de iones entre la resina y el fluido: la resina dona iones deseados al fluido, y el fluido cede a la resina iones indeseados en la misma cantidad.

Cuando se hace necesaria una regeneración, es porque la calidad del fluido tratado empieza a desmejorarse. Sin

embargo, en esos momentos solamente la resina que se encuentra en las primeras capas se encuentra totalmente saturada, mientras que en las últimas capas coexisten resina saturada y resina regenerada.

El regenerante es un fluido rico en iones deseados, que al pasar por la resina los intercambiará por los iones no deseados. De esta forma se obtiene una resina regenerada rica en iones deseados, mientras que el regenerante, por haber cedido los iones deseados, pasa a ser rico en los iones no deseados que intercambió.

La regeneración se puede llevar a cabo haciendo pasar el regenerante en la misma dirección que el líquido a tratar, llamada *regeneración en paralelo*, o bien haciendo pasar el regenerante en la dirección opuesta a la del líquido a tratar, llamándose *regeneración en contracorriente*.

En la regeneración en paralelo, el regenerante cede iones deseados a las primeras capas de resina, y se lleva los iones indeseados, que a su vez los deja en las últimas capas de resina que se encontraban regeneradas, transformándolas en resina saturada. (Ver figura 2). Durante esta primera parte de la regeneración, el efluente es el regenerante rico en iones deseados. Cuando las primeras capas están totalmente

regeneradas, el regenerante cede iones deseados sucesivamente a las siguientes capas.

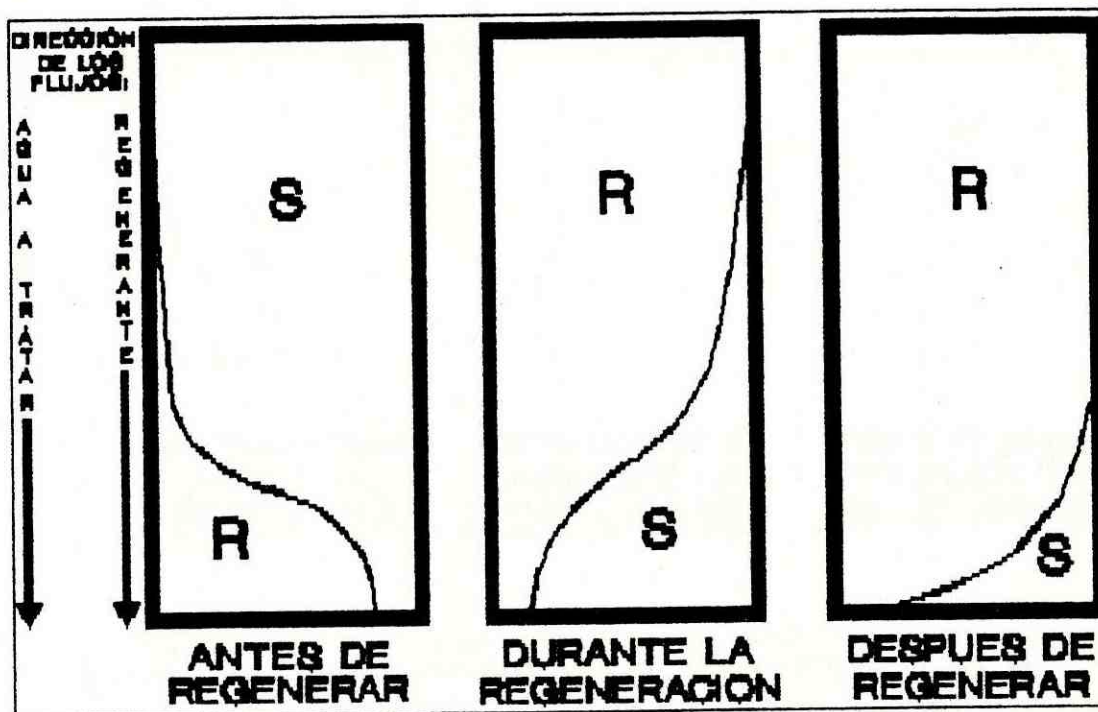


FIGURA 2. Regeneración y tratamiento de agua en paralelo.

En la regeneración en contracorriente, el regenerante cede iones deseados a las últimas capas que lo necesiten, y así va regenerando sucesivamente las demás capas, hasta llegar a las primeras. (Ver figura 3). La eficiencia de este sistema de regeneración es superior a la eficiencia de la regeneración en paralelo, debido a que se aprovecha efectivamente todo el regenerante utilizado.

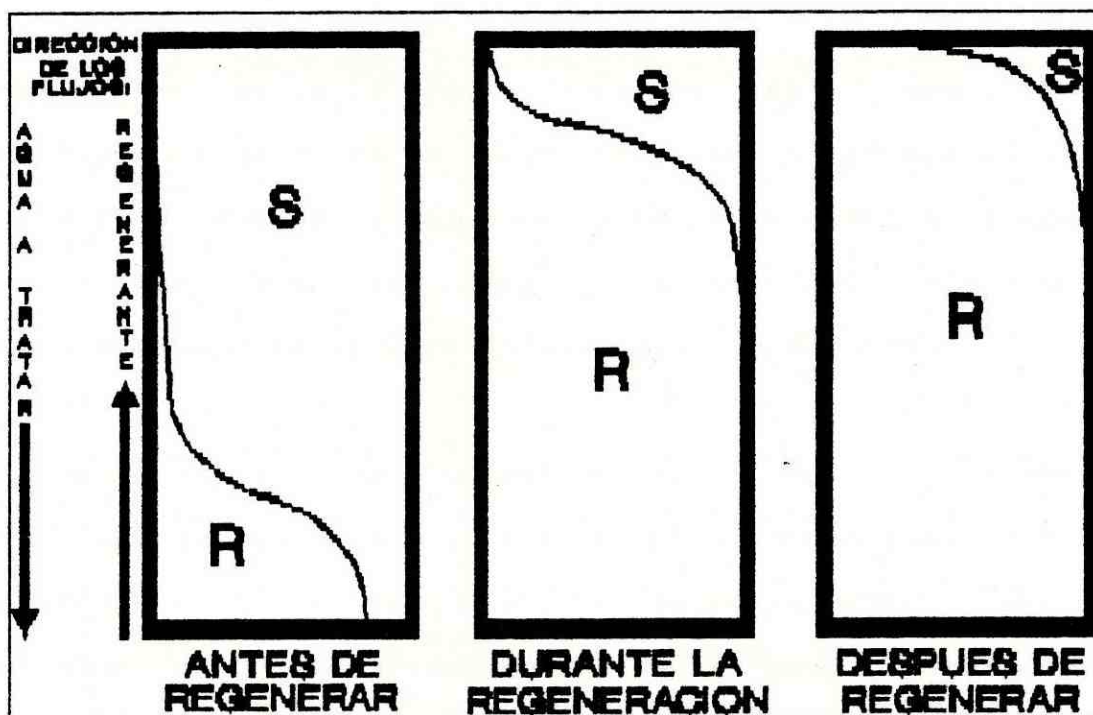


Figura 3. Regeneración y tratamiento de agua en contracorriente.

Al igual que cuando se está tratando un líquido, en la regeneración también se deben formar etapas sucesivas de equilibrio, para lograr un resultado óptimo. Estas etapas sucesivas de equilibrio se logran cuando la resina se encuentra fija, sin flotar, para favorecer un contacto homogéneo y óptimo entre la resina y el regenerante.

En el intercambiador iónico a diseñarse, para poder regenerar en contracorriente sin que la resina flote, se

invertirá la posición del intercambiador, colocando la parte inferior arriba y la parte superior abajo, mediante un sistema doble de patas de apoyo: tanto arriba como abajo. De esta forma, cuando el intercambiador se encuentre tratando agua se apoyará en las patas inferiores, y al regenerar en contracorriente se apoyará en las patas superiores.

Los costos de operación se podrían disminuir drásticamente utilizando un sistema de intercambio iónico que regenere la resina sin químicos, mediante electricidad y membranas de permeabilidad selectiva al paso de cationes o aniones. Sin embargo, estos sistemas son tan avanzados que recién se empiezan a comercializar por corporaciones como IONPURE, siendo prácticamente imposible comprar separadamente los materiales necesarios para su construcción.

IV. CALCULOS PARA DISEÑAR EL INTERCAMBIADOR IONICO:

A. Datos recopilados en entrevistas con el encargado de la finca:

Aplicación de herbicidas (sobrentendido que es foliarmente):

Se preparan de 1 a 1.5 toneles/día por 10 días, dependiendo de la altura de la maleza. Se aplican dos veces al año: a finales de febrero (final del invierno) y a mediados de agosto (canicula).

Aplicación de fertilizantes, fungicidas y plaguicidas foliarmente:

Se preparan 4 toneles/día por siete días y medio. Se aplican 3 veces al año: a finales de febrero (final del invierno), finales de mayo (final del verano) y mediados de agosto (canicula).

Cuando se debe aplicar fertilizantes y herbicidas el mismo mes, primero se aplican los herbicidas para evitar que las malas hierbas absorban los nutrientes que por accidente son rociados al suelo.

Además, se deja un lapso de dos semanas entre la aplicación del herbicida y la aplicación del fertilizante, porque los herbicidas necesitan cierto tiempo sin que pasen personas sobre las malas hierbas, para poder actuar en condiciones óptimas.

Se debe separar los recipientes y bombas de mochila utilizadas para herbicida, de las usadas para fertilización, para no matar el cafetal. Generalmente se aprovecha la aplicación de fertilizantes foliares para aplicar también fungicidas y plaguicidas compatibles entre sí.

En la Finca Panabaj, hay disponibles seis bombas de mochila para la aplicación de fertilizantes, fungicidas y plaguicidas. Para la aplicación de herbicidas, hay 3 bombas de mochila disponibles.

A cada bomba de mochila le caben 16 litros y a cada tonel 54 galones. El horario de trabajo es de 7:00 a 12:00 y de 13:00 a 17:00 horas.

B. Demanda de agua para dilución de químicos en la finca Panabaj:

A partir de los datos recopilados en las entrevistas con el encargado de la finca, se determinó lo siguiente:

La demanda de agua al aplicar herbicidas es:

$$\frac{1.5 \text{ toneles}}{\text{día}} \times \frac{54 \text{ Gal}}{1 \text{ tonel}} \times \frac{1000 \text{ Litros}}{264.17 \text{ Gal}} = \frac{306.62 \text{ Litros}}{\text{día}}$$

$$\frac{306.62 \text{ Litros}}{\text{día}} \times \frac{10 \text{ días}}{\text{aplicación}} \times \frac{2 \text{ aplicaciones}}{\text{año}} = \frac{6132.41 \text{ Litros}}{\text{año}}$$

La demanda de agua al aplicar fertilizantes es:

$$\frac{4 \text{ toneles}}{\text{día}} \times \frac{54 \text{ Gal}}{1 \text{ tonel}} \times \frac{1000 \text{ Litros}}{264.17 \text{ Gal}} = \frac{817.66 \text{ Litros}}{\text{día}}$$

$$\frac{817.66 \text{ Litros}}{\text{día}} \times \frac{7.5 \text{ días}}{\text{aplicación}} \times \frac{3 \text{ aplicaciones}}{\text{año}} = 18397.24 \text{ L/año}$$

C. Selección de la marca de la resina:

Se cotizó el precio de las resinas catiónicas sulfónicas disponibles en el mercado guatemalteco: La marca Purolite la distribuye SIDASA (10a Calle 0-52 Zona 9) y la Rohm & Haas, la distribuyen varias casas, siendo la principal ALKEMY (7a. Calle 27-51, "El Naranja" Zona 4 de Mixco). Ambas resinas son equivalentes, y sólo difieren en la marca, precio y mínimo de venta.

La resina catiónica sulfónica cotizada en SIDASA es la Purolite C-100, con ciclos opcionales de Hidrógeno y Sodio; su capacidad de intercambio útil puede llegar a

aproximadamente 30,000 granos de CaCO_3 . Su valor es de Q750/pie³ de resina. El mínimo de venta es estrictamente un pie cúbico.

La resina catiónica sulfónica cotizada en ALKEMY es la Aberlite IR-120 Plus, de la Rohm & Haas, con ciclos opcionales de Hidrógeno y Sodio y capacidad de intercambio útil puede ser de 27,559 granos de CaCO_3 . La resina tiene forma de pequeñas esferas plásticas color amarillo, de 0.5 mm de diámetro. (Ver Apéndice C). Su valor es de Q792/pie³ de resina. A pesar de que el mínimo de venta es medio pie cúbico, se logró persuadir a uno de los vendedores y obtener mucho menos cantidad, por lo que se optó por esta marca.

D. Capacidad en equivalentes de la resina seleccionada:

A pesar de que el costo de regenerar con ácido clorhídrico es 1.22 veces el costo de regenerar con ácido sulfúrico, se utilizará HCl para evitar la posible formación de coloides que dificulten el contacto entre la resina y los fluidos. Al regenerar la resina con 2121.44 mL de HCl 10%, se logra una capacidad de 27559 granos de CaCO_3 /pie³ de resina (Ver Apéndice C).

$$\frac{27559 \text{ granos de } \text{CaCO}_3}{\text{pie}^3} \times \frac{17.1 \text{ mg/l}}{1 \text{ grano/gal}} \times \frac{1000 \text{ l}}{264.17 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ mmol } \text{CaCO}_3}{100.088 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mmol } \text{Ca}^{++}}{1 \text{ mmol } \text{CaCO}_3} \times \frac{2 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol } \text{Ca}^{++}} = 35647.09 \text{ meq./pie}^3$$

E. Cantidad de resina necesaria:

La cantidad de resina necesaria se calculó con base en los exámenes de la calidad del agua de la finca Panabaj (ver apéndice A), a la capacidad de la resina (35647.09 meq./pie³), a la demanda máxima de agua para dilución de químicos (817.66 litros/día) y del periodo deseado entre cada regeneración (1 día). Con los datos del apéndice A se determinó la cantidad de cationes que contiene el agua, que serán intercambiados durante el tratamiento por su equivalente en hidrógenos. Los cationes analizados en el apéndice A son: NH₄⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cu⁺, Fe⁺⁺, Mn⁺⁺, Zn⁺⁺ y Na⁺. Como la concentración del Cu⁺ y del Mn⁺⁺ es cero no aparecen en los siguientes cálculos de los *equivalentes totales en el agua de la finca Panabaj*:

$$0.270 \text{ ppm NH}_4^+ \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{18 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.015000 \text{ meq./L}$$

$$0.280 \text{ ppm K}^+ \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{39 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.007179 \text{ meq./L}$$

$$34.240 \text{ ppm Ca}^{++} \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{40 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 1.712000 \text{ meq./L}$$

$$2.200 \text{ ppm Mg}^{++} \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{24.8 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.177419 \text{ meq./L}$$

$$0.010 \text{ ppm Fe}^{++} \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{55.8 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.000358 \text{ meq./L}$$

$$0.040 \text{ ppm Zn}^{++} \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{65.4 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.001224 \text{ meq./L}$$

$$2.630 \text{ ppm Na}^+ \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1 \text{ ppm}} \times \frac{1 \text{ mmol}}{22.9 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ meq.}}{1 \text{ mmol}} = 0.114847 \text{ meq./L}$$

TOTAL: 2.028027 meq./L

Por la posibilidad de otros cationes presentes y como la calidad del agua de un río es cambiante, se tomará un factor de seguridad de 1.5 veces los equivalentes calculados. De esta forma, la *cantidad de resina a utilizarse es:*

$$1 \text{ día} \times \frac{817.66 \text{ Litros}}{\text{día}} \times \frac{(2.028027 \times 1.5) \text{ meq.}}{\text{Litro}} \times$$

$$\frac{1 \text{ pié}^3 \text{ de resina}}{35647.09 \text{ meq.}} = 0.0698 \text{ pié}^3 \text{ de resina (Aprox } 0.07 \text{ pié}^3 \text{)}$$

F. Dimensiones del intercambiador:

Según el apéndice C, la profundidad de la cama de resina debe tener un mínimo de 18 pulgadas. Como el volumen de la resina es de 0.07 piés³, si se utiliza un recipiente cilíndrico con forma de tubo, *el diámetro del recipiente (D) en pulgadas es:*

$$18 \text{ pulg} \times 3.1416 \times (D/2)^2 = 0.07 \text{ piés}^3 \times \frac{(12 \text{ pulg})^3}{(1 \text{ pie})^3}$$

despejando se obtiene $D = 2.93 \text{ pulg}$ (Aprox. 3 pulgadas).

La cámara libre ocupará el 75% del volumen de la resina, por lo que *el largo (L) del recipiente* cilíndrico de 3 pulgadas de diámetro será:

$$L = 18 \text{ pulg} + (0.75 \times 18 \text{ pulg}) = 31.5 \text{ pulgadas.}$$

Para reducir gastos al máximo, se procurará utilizar el menor tamaño posible de las llaves de paso.

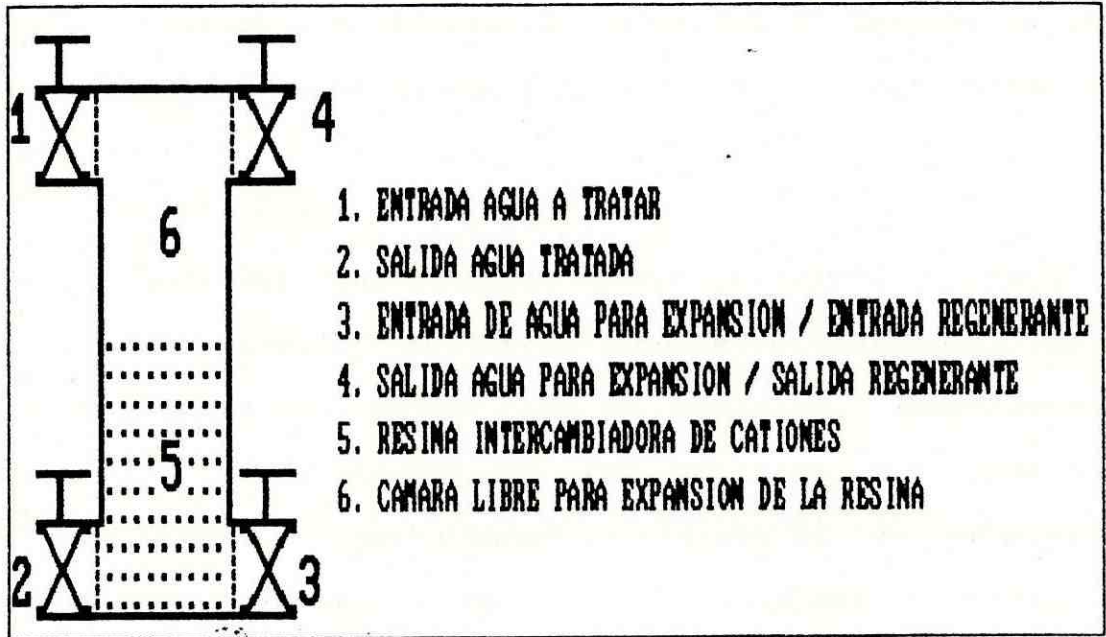


Figura 4. Diseño del intercambiador iónico.

6. Materiales a utilizar en el intercambiador:

Durante la regeneración, los materiales del intercambiador estarán en contacto con ácido clorhídrico, cuya concentración podrá variar del 2 al 10%. El cuerpo del intercambiador, las válvulas y las mangueras pueden ser de PVC, y el tanque del regenerante puede ser de polietileno. Ambos materiales son resistentes a los ácidos, incluyendo el clorhídrico y el sulfúrico, y se encuentran fácilmente en el mercado guatemalteco a precios bajos.

Para retener la resina y evitar que fluya con el agua se utilizarán cedazos con agujero de menor diámetro que el de la resina. Debido a la dificultad de encontrar cedazos de otro material, éstos serán de acero inoxidable, de fácil obtención y bajo costo.

La corrosión que sufre el acero inoxidable en presencia de ácidos (tanto el sulfúrico como el clorhídrico) es de aproximadamente 1.3 mm por año de contacto. Considerando este desgaste, el tamaño de los agujeros del cedazo a utilizar debe ser mucho menor al tamaño de las esferas de resina, cuyo diámetro es de 0.5 mm. Se escogió un cedazo de 60 mesh, con agujeros de 0.25 mm y alambre de 0.18 mm de diámetro. Cuando los alambres se desgasten a la mitad, se reemplazará el cedazo por otro nuevo.

En ese momento, el cedazo tendrá agujeros de $0.25 + 0.09 + 0.09 = 0.43$ mm, por lo que no existirá pérdida de resina. *El período de reemplazo en días de contacto del cedazo con el ácido es:*

$$0.09\text{mm desgaste} \times \frac{1 \text{ año contacto}}{1.3\text{mm desgaste}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 25.27 \text{ días de contacto.}$$

El caso de mayor tiempo de contacto entre el cedazo y el ácido es al regenerar con 5303 mL de HCl 2%, siendo el flujo

de regenerante de 2.39 mL/seg. La cantidad total de agua a tratar en un año es de 18397.24 L + 6132.41 L = 24529.65 L/año. Por tanto, *las veces al año que se regenerará son:*

$$\frac{24529.65 \text{ L/año} \times (2.0280 \times 1.5) \text{ meq/L}}{0.07 \text{ pié}^3 \text{ resina} \times 35647.09 \text{ meq./pié}^3} = 29.9 \text{ reg./año.}$$

A partir de éste dato se puede calcular *los días de contacto efectivo entre el cedazo y el ácido clorhídrico al 2% en un año de operaciones normales:*

$$\frac{29.9 \text{ regeneraciones}}{\text{año}} \times \frac{5303 \text{ mL HCl } 2\%}{\text{regeneración}} \times \frac{1 \text{ seg}}{2.39 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ seg}}$$

$$\times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 0.7679 \text{ días de contacto efectivo/año.}$$

A partir de los resultados obtenidos se puede calcular *el periodo de desgaste permitido del cedazo de acero inoxidable:*

$$\frac{25.27 \text{ días de contacto}}{0.7679 \text{ días de contacto/año}} = 32.9 \text{ años.}$$

Por lo tanto, el cedazo de acero inoxidable se debe cambiar cada 32.9 años.

El sistema de retención de resina utilizado en las partes superior e inferior del intercambiador se puede representar así:

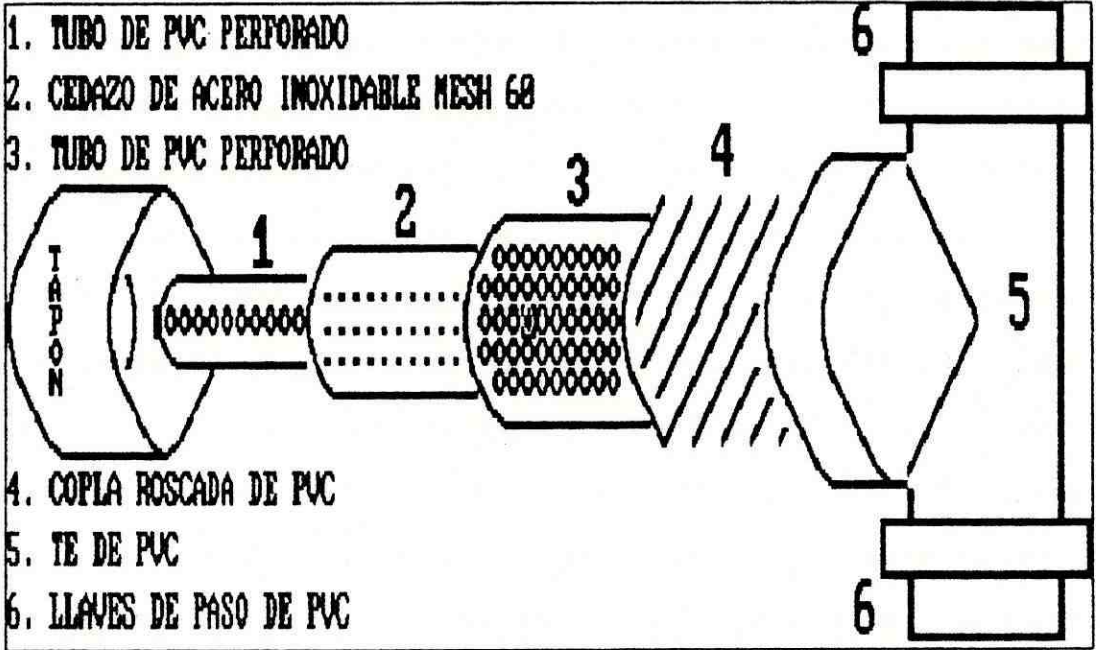


Figura 5. Sistema de retención de la resina.

V. FORMAS DE REPORTAR CONTENIDO DE DUREZA Y BICARBONATOS:

En el laboratorio, al tener una muestra acuosa con muchos tipos de sales disueltas, no es posible definir directamente la cantidad de una determinada sal, sino que sólo es posible calcular la concentración de los radicales que forman dicha sal. Por ejemplo, con una muestra de agua que contiene bicarbonato de calcio y sulfato de calcio, con un único experimento es posible determinar la cantidad de calcio existente, pero sin saber la proporción en que está combinado con el radical bicarbonato o con el radical sulfato. De la misma forma se pueden determinar los demás radicales disueltos en el agua, como sulfatos, cloruros, etc.

Las dimensionales acostumbradas para referirse a la concentración de estas sales son:

- A) partes por millón (ppm) = miligramos / Litro (mg / L)
- B) grados franceses = 0.0002 equivalentes / Litro (N)
- C) granos por galón = 17.1 ppm
- D) equivalentes por millón = miliequivalentes / Litro (meq / L)

Para reportar la dureza del agua existen varias formas, siendo las más comunes las siguientes:

1. La forma iónica consiste en reportar la concentración de los iones, datos obtenidos directamente en los experimentos, como se explicó en el párrafo anterior;

2. Otra forma consiste en reportar los resultados como concentraciones de los compuestos que podrían formar los iones al combinarse. La desventaja es que generalmente existen varias combinaciones de concentraciones de compuestos probables que se ajustan a las cantidades de iones encontrados;

3. Por último, existe otra forma de reportar dureza, que se basa en el hecho de que al agregar jabón al agua dura, el jabón se combina con los iones de calcio y magnesio y se sedimenta en forma de carbonatos de calcio y magnesio, en una proporción directa a la cantidad de dureza. Debido a que la dureza provocada por iones de calcio es más común que la de magnesio, muchos autores reportan la dureza total en términos de ppm de carbonato de calcio, incluyendo bajo este término no sólo a la dureza de calcio, sino también a la de magnesio. Este método presenta la ventaja de facilitar la comparación entre dos o más análisis de agua bajo el punto de vista del daño que puedan causar.

VI. METODOS PARA DETERMINAR DUREZA, CARBONATOS, BICARBONATOS Y

pH:

Cuando se transportan al laboratorio muestras acuosas conteniendo dureza de carbonatos, las concentraciones de dureza, bicarbonatos y pH pueden variar debido a que con el calor los bicarbonatos tienden a descomponerse en carbonatos insolubles,

liberando dióxido de carbono. Como resultado, la dureza y la concentración de bicarbonatos disminuyen y el pH se vuelve más ácido.

Por lo anterior, lo más recomendable es realizar experimentos de campo, en el lugar en donde se muestrea el agua. La figura 4 muestra el laboratorio montado en la finca en cuestión, en donde se realizaron los experimentos para evaluar el funcionamiento del intercambiador iónico.

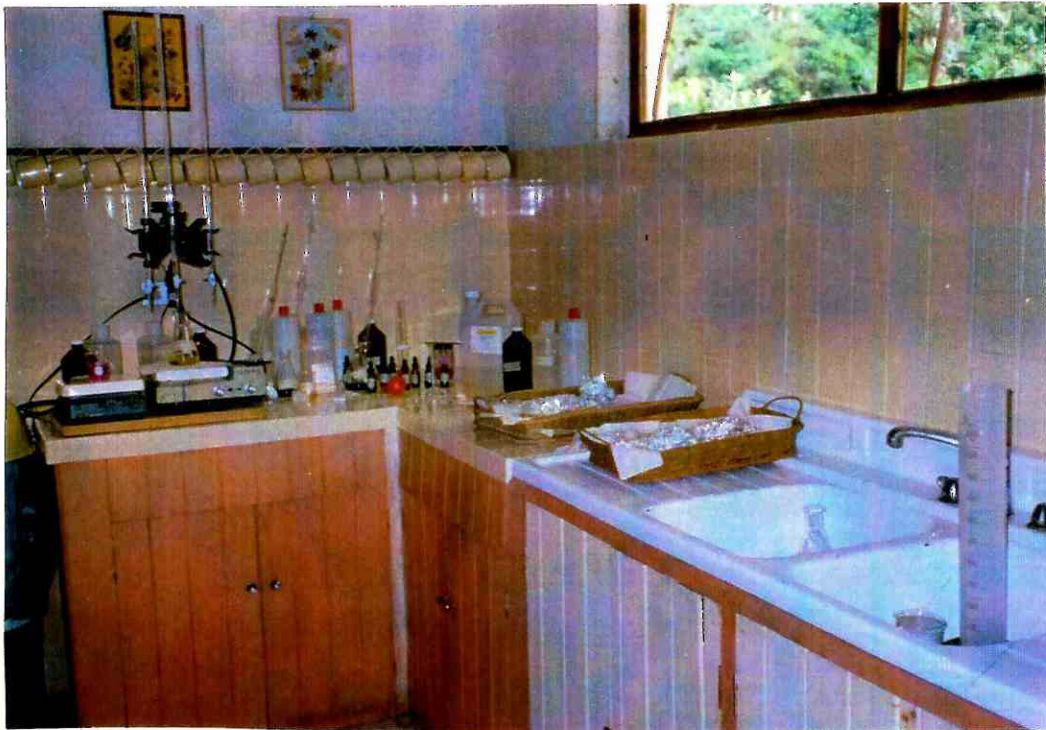


FIGURA 6. Laboratorio montado en la finca.

Dentro de los métodos para la determinación de dureza y pH, los más exactos utilizan aparatos como espectrofotómetros y

pHímetros, respectivamente. Para determinar dureza se pueden utilizar métodos de titulación, obteniéndose resultados con un 1% de error. Para la determinación del pH, lo más usual es utilizar papeles indicadores, obteniéndose resultados satisfactorios. Para determinar carbonatos y bicarbonatos se emplean técnicas de titulaciones neutralizantes. La ventaja del equipo necesario en las titulaciones comparado con el espectrofotómetro es su fácil transporte y bajo costo. En la figura 5 se puede apreciar el equipo de titulación necesario para determinar dureza, carbonatos y bicarbonatos y los papeles para determinar el pH.



FIGURA 7. Equipo utilizado en las determinaciones de dureza, carbonatos, bicarbonatos y pH.

Los métodos seleccionados, preparación de las soluciones necesarias y las recomendaciones para cada caso se detallan a continuación:

A. Experimento 1. Determinación de carbonatos y bicarbonatos:

Reactivos necesarios:

Indicador verde bromocresol

Indicador fenolftaleína

Solución 10% BaCl_2

Agua destilada y descarbonatada

HCl 0.003N standard

NaOH 0.003N standard

Determinación de carbonatos + bicarbonatos: transferir una alícuota de 50.0 mL de muestra hacia erlenmeyer de 250 mL, y agregar 2 gotas de verde de bromocresol. Correr un blanco con 50.0 mL de agua destilada y descarbonatada. Lavar bien dos bujetas de titulación y enjuagarlas con el HCl y NaOH respectivamente. Vaciarlas. Llenarlas totalmente con HCl y NaOH, y expulsar el aire mediante un pequeño vaciado de las buretas. Tomar lectura inicial de ambas buretas. Titular con 0.003N HCl hasta que la solución del erlenmeyer empieza a cambiar de azul a verde. Hervir la solución por 2 min., enfriar y completar la titulación. Si no se hace necesario más ácido después de hervir la muestra, titular de retroceso con Std. NaOH 0.003N, o descartarla.

Determinación de bicarbonatos: Transferir una alícuota de 25 mL de muestra hacia otro erlenmeyer de 250 mL. Correr un blanco con 25 mL de agua destilada y desionizada. Transferir a cada erlenmeyer alícuota de 50 mL de NaOH. Inmediatamente agregarles 10 mL de BaCl_2 y dos gotas de fenolftaleína. Titular el exceso de NaOH con 0.003N HCl hasta que desaparezca el color rosado.

Preparación de reactivos necesarios para experimento 1:

1. INDICADOR VERDE BROMOCRESOL:

Disolver 0.100g en 1.45 mL de 0.100N NaOH. Diluir a 100 mL con agua destilada.

2. INDICADOR DE FENOLFTALEINA:

Disolver de 0.5 a 1.0g/Litro en etanol al 80% (v/v).

3. SOLUCION BaCl_2 AL 10%:

Disolver 50 g en 500 mL (10% peso/vol) de agua desionizada. (Se necesitan 10 ml para cada muestra y 10 mL para cada blanco, al determinar carbonatos y bicarbonatos).

4. STANDARIZACION DE HCL 0.1N (CONTRA Na_2CO_3):

Reactivos necesarios:

0.1N HCl

Na_2CO_3 grado primario

Indicador verde bromocresol

0.05M NaCl (100mL)

Secar Na_2CO_3 por 2 horas a 110°C y enfriar en desecador. Pesar 0.20 a 0.25g en erlenmeyer de 250 mL y disolver en aprox. 50 mL de agua destilada. Poner 100 mL de NaCl 0.05M en otro erlenmeyer (Blanco). Agregarles 3 gotas de verde bromocresol. Lavar la bureta de titulación y enjuagarlas con el HCl. Vaciarla. Llenarla completamente con el HCl y expulsar el aire mediante un pequeño vaciado de la bureta. Tomar lectura inicial y titular con el HCl hasta que la solución cambia precisamente de azul a verde. Hervir la solución por 2 min. (la solución debe cambiar de verde a azul, de lo contrario se debe repetir el experimento), enfriar a temperatura ambiente y completar la titulación. Guardar el HCl en un frasco cerrado de vidrio.

5. STANDARIZACION DE NaOH 0.1N:

Reactivos necesarios:

NaOH 0.1N

HCl 0.1N standarizado

Indicador de fenolftaleína

En dos buretas para titular bien lavadas y enjuagadas con el NaOH y HCl, respectivamente, llenarlas con el

NaOH y HCl y expulsar el aire mediante un pequeño vaciado. Tomar lecturas iniciales de ambas buretas. Vertir aproximadamente 35 mL del HCl hacia erlenmeyer de 250 mL. Agregar 4 gotas del indicador de fenolftaleína y titular con el NaOH hasta que la solución del erlenmeyer se torna rosada. Titular de retroceso con el HCl, agregando gota por gota hasta que la solución en el erlenmeyer se torna transparente. Titular nuevamente con el NaOH, gota por gota, hasta que la solución en el erlenmeyer se torna levemente rosada y permanece así por lo menos 30 segundos. Tomar lecturas finales de las buretas. Guardar el NaOH en un recipiente cerrado de plástico, evitando aire dentro del bote.

6. AGUA DESTILADA Y DESCARBONATADA:

Hervir agua destilada por 15 minutos. Tapar inmediatamente con un plástico completamente limpio y enfriar a temperatura ambiente.

7. HCl 0.003N STANDARD:

Reactivos necesarios:

HCl 0.1N Standard

Agua destilada y descarbonatada

Lavar perfectamente la cristalería necesaria y enjuagarla con agua destilada y descarbonatada.

Indicador Negro de Eriocromo T

Buffer pH 10

MgY EDTA

Lavar perfectamente toda la cristalería y desmenujarla con agua destilada y desionizada. Correr un blanco de 50.0 mL de agua destilada y desionizada en vez de la muestra. Transferir hacia erlenmeyer de 250 mL una alícuota de 50.0 mL de muestra, agregando 3 gotas de HCl 6N, y hervir por 2 a 3 min. Enfriar. Agregar 3 gotas de Rojo de Metilo, y neutralizar la solución con NaOH 3N. Agregar 2 mL de Buffer pH 10 y 5 gotas de Indicador Negro de Eriocromo T. Agregar 2 mL de MgY EDTA. Titular con EDTA 0.002 M hasta que la solución cambie de rojo a puro azul.

Preparación de reactivos necesarios para experimento 2:

1. EDTA 0.01 M STANDARD:

Reactivos necesarios:

$\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ grado primario

Agua destilada y desionizada

Secar el dihidrato purificado ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a 80 Centígrados y enfriar en desecador. Pesarse aproximadamente 1.9g en un balón de 500mL, utilizando un embudo. Agregar de 300 a 400 mL de agua destilada y desionizada lavando el embudo y agitar hasta disolver el EDTA. Se tarda 15 min o más en disolverse. Examinar el

fondo del balón para disolver completamente toda la sal, con agitación. Aforar con agua destilada y desionizada.

2. EDTA 0.002 M Standard:

Reactivos necesarios:

EDTA 0.01 M Standard

Agua destilada y desionizada

Lavar previamente toda la cristalería y enjuagarla con agua destilada y desionizada. Transferir exactamente 200.0 mL de EDTA 0.01 M Standard hacia balón volumétrico de 1000 mL. Aforar hasta la marca con agua destilada y desionizada.

3. HCl 6N:

Mezclar 9.9 mL de HCl concentrado con 10.1 mL de agua destilada.

4. NaOH 3N:

Disolver 2.43 g de NaOH en 17.6 mL de agua.

5. INDICADOR ROJO DE METILO:

Disolver de 0.015 g en 20 mL de agua destilada.

6. INDICADOR NEGRO DE ERIOCROMO T:

Disolver 0.1 g en una mezcla de 15 mL de trietanolamina

y 5 mL de etanol. Descartar el indicador después de dos semanas.

7. SOLUCION BUFFER pH 10:

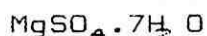
Disolver 70 g de NH_4Cl en 570 mL de NH_3 . Diluir a 1 Litro con agua.

8. SOLUCION 0.01 M SULFATO DE MAGNESIO:

Disolver 0.0243 g de sulfato de magnesio en 20 mL de agua destilada.

9. MgY EDTA:

Reactivos necesarios:



Solución Buffer pH 10

Indicador Negro de Eriocromo

EDTA 0.01M

Sulfato de Magnesio 0.01M

NaOH 3N

Disolver 0.3722 g de $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 100 mL de agua destilada. Agregar 0.2465 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Agregar 3 gotas de fenolftaleína, y suficiente NaOH para convertir la solución a levemente rosada. Si está bien hecha, se volverá violeta al agregar 2 mL de buffer pH 10 y 5

gotas de negro de eriocromo t. Al agregar una gota de 0.01 M EDTA, el color cambia a azul. Al agregar una gota de Sulfato de Magnesio 0.01 M la solución cambiará a rojo. Se puede variar la composición de la solución agregando 0.01 M EDTA y Sulfato de Magnesio 0.01 M hasta que cumpla el criterio.

C. Concentración de las soluciones utilizadas:

TABLA 5.1
DATOS PARA DETERMINAR DE LA CONCENTRACION
DE LAS SOLUCIONES USADAS

| Solución | Cantidad de titulante | Cantidad titulada | Diluciones Posteriores |
|----------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|
| HCl | 37.1 mL HCl | 0.2071 g Na_2CO_3 | 30 mL/1000 mL |
| NaOH | 36.4 mL NaOH | 34.7 mL HCl | 30 mL/1000 mL |
| EDTA | 1.9354 g EDTA/500 mL | --- | 200 mL/1000 mL |

Concentración de la solución de HCl:

$$0.2071 \text{ g } \text{Na}_2\text{CO}_3 * \frac{1 \text{ mol } \text{Na}_2\text{CO}_3}{105.986 \text{ g}} * \frac{2 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol } \text{Na}_2\text{CO}_3} * \frac{1}{37.1 \text{ mL HCl}}$$

$$* \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = \text{HCl } 0.10534 \text{ M}$$

$$\frac{0.10534 \text{ mol HCl}}{1 \text{ L}} * \frac{30 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = \text{HCl } 0.00316 \text{ M.}$$

Concentración de la solución de NaOH:

$$34.7 \text{ mL HCl} * \frac{0.10534 \text{ mol}}{1000 \text{ mL HCl}} * \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol HCl}} * \frac{1}{36.4 \text{ mL NaOH}}$$

$$* \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} * \frac{30 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = \text{NaOH } 0.00301 \text{ M.}$$

Concentración de la solución de EDTA:

$$1.9354 \text{ g} * \frac{1 \text{ mol EDTA}}{372.24 \text{ g}} * \frac{1}{500 \text{ mL}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} * \frac{200 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = \text{EDTA } 0.00208 \text{ M}$$

VII. RESULTADOS:

Para verificar los resultados a obtenerse con papel pH respecto a los de un pHímetro, se añadió sucesivamente bicarbonato de sodio a 100 mL de agua, tomando las lecturas de pH de ambos métodos entre cada adición de bicarbonato. Los resultados observados fueron los siguientes:

TABLA 6.1.
pH DEL pHIMETRO VRS. pH DEL PAPEL

| Peso de NaHCO ₃ (g) agregado a 100 mL de H ₂ O | Concentración en ppm de HCO ₃ ⁻ (Bicarbonatos) | pH según pHímetro | pH según papel | % de Similitud 100x(pH papel / pH pHímetro) |
|--|--|-------------------|----------------|---|
| 0 | 0 | 6.50 | 6.5 | 100 |
| 0.01 | 83.15 | 7.10 | 7.0 | 98.59 |
| 0.02 | 166.89 | 7.70 | 7.5 | 97.40 |
| 0.03 | 250.34 | 8.10 | 8.0 | 98.76 |
| 0.10 | 834.48 | 8.15 | 8.0 | 98.16 |
| 0.22 | 1835.85 | 8.25 | 8.0 | 96.97 |
| 0.42 | 3504.81 | 8.30 | 8.3 | 100 |
| 0.57 | 4756.53 | 8.40 | 8.3 | 98.81 |
| 3.23 | 26953.68 | 8.40 | 8.3 | 98.81 |

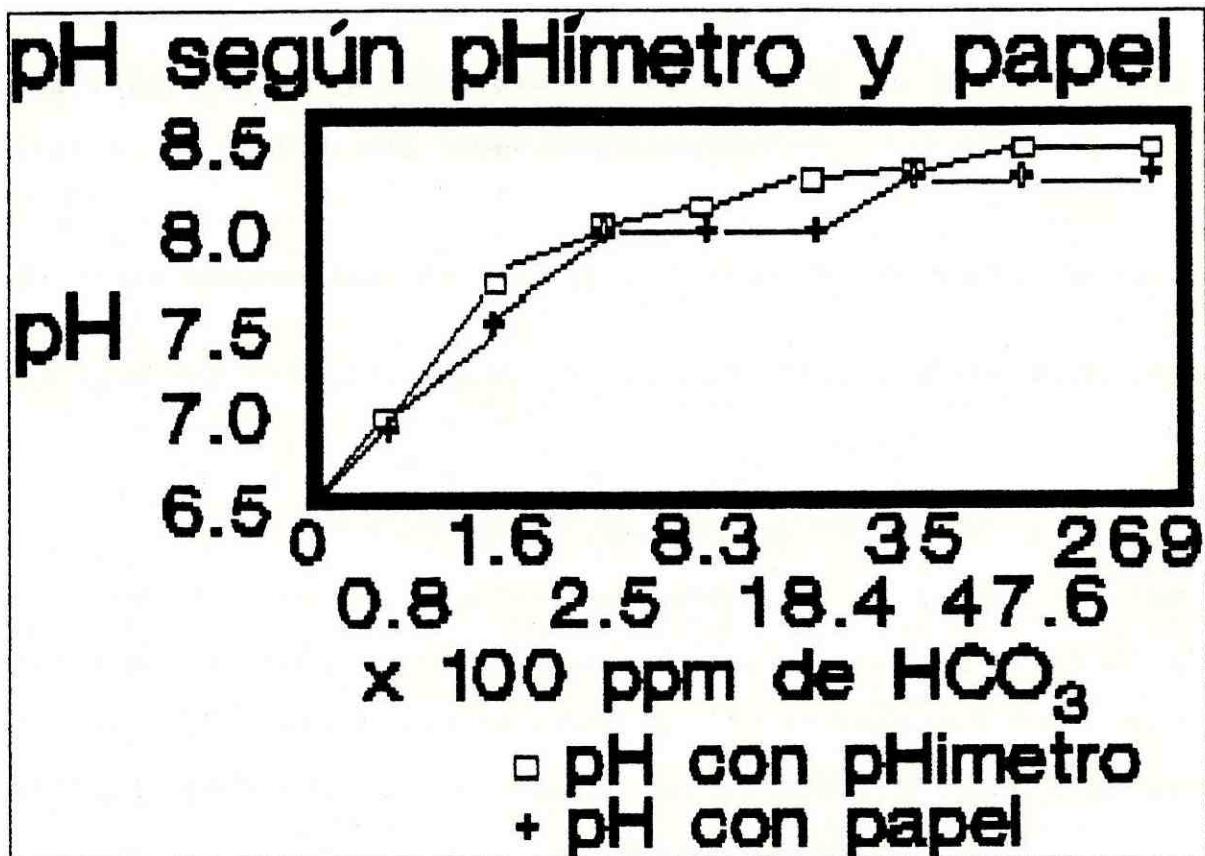


Figura 8. pH según pHímetro y papel.

A. Flujos recomendados por el fabricante: (Ver apéndice C)

El flujo recomendado de agua para tratar es:

$$\frac{2 \text{ gpm}}{\text{pie}^3} \times 0.07 \text{ pie}^3 \times \frac{1000 \text{ Litros}}{264.17 \text{ gal.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} = \frac{0.00883 \text{ L}}{\text{seg}}$$

El flujo recomendado del regenerante es:

$$\frac{0.5 \text{ a } 1 \text{ gpm}}{\text{pie}^3} \times 0.07 \text{ pie}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{264 \text{ gal.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} = \frac{\text{De } 0.00221 \text{ a } 0.00442 \text{ L}}{\text{seg}}$$

Para que la resina adquiera una capacidad de 27559 ganos/pié³, se debe regenerar con el equivalente de 25 Lb de

HCl al 30% por cada pié³ de resina: para el intercambiador en análisis, el rango posible va de 5303.6 mL de HCl 4% a 2121.44 mL de HCl 10%. (Ver Apéndice C).

El flujo recomendado de agua para lavado del regenerante es:

$$\frac{0.5 \text{ a } 1.5 \text{ gpm}}{\text{pié}^3} \times 0.07 \text{ pié}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{264 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = \underline{\text{De } 0.00221 \text{ a } 0.00662 \text{ L}} \text{ seg}$$

La cantidad de agua recomendada para el lavado de los residuos del regenerante que quedaron en la resina es de 25 a 75 gal/pié³ (de 6.63 L a 19.87 L) (Ver apéndice C). Con estas recomendaciones el lavado dura entre 2.5 horas y 16.67 minutos.

Para evaluar el funcionamiento del intercambiador catiónico analizado, se determinaron cuatro flujos diferentes de agua: Con los flujos recomendados de agua para tratar y agua para lavado, se determinaron las posiciones del grifo que permitieran la salida de flujos similares, marcando el grifo con pintura para poder reproducir estos flujos. Además, se determinaron otras dos posiciones del grifo: una para obtener el flujo máximo posible y otra para obtener un flujo intermedio. La siguiente tabla muestra los flujos de agua con que se trabajó:

TABLA 6.2.

FLUJOS DE AGUA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR

| Posición marcada en el grifo | Identificación del flujo | Tiempo en que llena probeta de 1000 mL | Flujos Obtenido (L/seg) |
|------------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|
| 1 | RECOMENDADO EN LAVADO | 3 min 42.82 seg | 0.00449 |
| 2 | RECOMENDADO EN TRATAMIENTO | 1 min 49.29 seg | 0.00915 |
| 3 | FLUJO INTERMEDIO | 35.45 seg | 0.02821 |
| 4 | FLUJO MAXIMO | 9.48 seg | 0.10549 |

B. Evaluación del funcionamiento del intercambiador:

Para evaluar el funcionamiento del intercambiador catiónico, se determinó la concentración de carbonatos, bicarbonatos y dureza por medio de titulaciones (Ver Capítulo VI), y el pH por medio de papel. De esta forma se analizó el agua al entrar al sistema y la ya tratada por el intercambiador, a los cuatro distintos flujos mencionados en la tabla 6.2.

Como sistema de control, se determinó la cantidad de titulante consumido por blancos del mismo tamaño que las muestras. El blanco utilizado en la determinación de carbonatos y bicarbonatos fue 50.0 mL de agua destilada y descarbonatada, y para la determinación de bicarbonatos 25.0 mL de agua destilada y descarbonatada; los titulantes fueron

HCl 0.00316 M y NaOH 0.00301 M. El blanco para la determinación de dureza fue 50.0 mL de agua destilada y desionizada, y el titulante utilizado fue EDTA 0.00208 M. La siguiente tabla muestra los datos del consumo de titulante por los blancos:

TABLA 6.3.
TITULANTE CONSUMIDO POR LOS BLANCOS:

| Blanco Titulado | mL de HCl 0.00316 M Consumido | mL de NaOH 0.00301 M Consumido | mL de EDTA 0.00208 M Consumido |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CARBONATOS + BICARBONATOS | 0.40 | 0.10 | ---- |
| BICARBONATOS | 40.61 | ---- | ---- |
| DUREZA | ---- | ---- | 0.30 |

Para facilitar los cálculos posteriores, el *titulante consumido por el blanco de "Carbonatos + Bicarbonatos"* debe estar expresado en mililitros de una sola solución, como el HCl 0.00316 M. Para ello hay que transformar el volumen de NaOH 0.00301 M utilizado a sus equivalentes en ácido clorhídrico, y restarlos al ácido necesario en la titulación:

$$\begin{aligned}
 &0.40 \text{ mL HCl} - (0.10 \text{ mL NaOH} \times 0.00301 \text{ mol}/1000 \text{ mL} \\
 &\quad \times 1 \text{ mol HCl}/1 \text{ mol NaOH} \times 1000 \text{ mL}/0.00316 \text{ mol HCl}) \\
 &= 0.30467 \text{ mL de HCl } 0.00316 \text{ M.}
 \end{aligned}$$

La determinación de bicarbonatos se realiza por un método indirecto: se agrega una cantidad conocida de NaOH en

exceso, y una parte del NaOH reacciona con todo el bicarbonato presente. Luego se titula la cantidad de NaOH que no reaccionó. Por diferencia se encuentra la cantidad de NaOH que reaccionó con todo el bicarbonato, transformándolo por equivalencias molares a la concentración de bicarbonatos. Para facilitar los cálculos posteriores, se determinará la cantidad de *Hidróxido de Sodio que reaccionó con los bicarbonatos del blanco:*

$$\begin{aligned}
 50 \text{ mL NaOH} & - (40.61 \text{ mL HCL} \times 0.00316 \text{ mol HCl}/1000 \text{ mL HCl} \\
 & \times 1 \text{ mol NaOH}/1 \text{ mol HCl} \times 1000 \text{ mL NaOH}/0.00301 \text{ mol NaOH}) \\
 & = 7.40046 \text{ mL NaOH } 0.00301 \text{ M}
 \end{aligned}$$

El EDTA consumido en la titulación del blanco (0.30 mL) es un dato que no necesita ser transformado para utilizarse fácilmente en los cálculos posteriores de determinación de dureza en muestras de agua.

1. Calidad del agua al entrar al intercambiador:

La siguiente tabla muestra los datos recopilados en las determinaciones de carbonatos, bicarbonatos, dureza y pH para el agua sin tratamiento de la Finca Panabaj:

TABLA 6.4.
DATOS OBTENIDOS EN PRUEBAS CON EL AGUA CRUDA:

| Experimento | mL de agua analizada | mL de HCl 0.00316 M Consumido | mL de NaOH Consumido | mL de EDTA 0.00208 M Consumido |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| BICARBONATOS | 25.0 | 26.06 | ---- | ---- |
| CARBONATOS + BICARBONATOS | 50.0 | 29.40 | ---- | ---- |
| DUREZA | 50.0 | ---- | ---- | 22.90 |
| pH: 7.5 | ---- | ---- | ---- | ---- |

A partir de estos datos, se calculó la concentración de carbonatos, bicarbonatos y dureza del agua sin tratar de la Finca Panabaj:

a. Concentración de bicarbonatos en el agua cruda:

El primer paso es calcular la cantidad de *NaOH* que reaccionó con los bicarbonatos del agua:

$$\begin{aligned}
 &50 \text{ mL NaOH} - (26.06 \text{ mL HCl} \times 0.00316 \text{ mol HCl}/1000 \text{ mL} \\
 &\quad \times 1 \text{ mol NaOH}/1 \text{ mol HCl} \times 1000 \text{ mL}/0.00301 \text{ mol NaOH}) \\
 &= 22.66328 \text{ mL NaOH } 0.00301 \text{ M.}
 \end{aligned}$$

Con este dato y, además, teniendo en cuenta el consumo de titulante por el blanco, calculamos la concentración de bicarbonatos en la muestra de agua cruda:

$$\begin{aligned}
 & (22.66328 - 7.40046) \text{ mL NaOH} \times 0.00301 \text{ mol NaOH}/1000 \text{ mL} \\
 & \times 1 \text{ mol HCO}_3^-/1 \text{ mol NaOH} \times 1/25.0 \text{ mL} \times 1000 \text{ mL/L} \\
 & = 0.00184 \text{ mol HCO}_3^-/\text{L} \text{ (112.2 ppm)}
 \end{aligned}$$

b. Concentración de carbonatos en el agua cruda:

El procedimiento seleccionado determina la cantidad de carbonatos y bicarbonatos presentes. Para encontrar la concentración de carbonatos, necesitamos conocer la *cantidad de moles de bicarbonato presentes* en los 50.0 mL de agua analizada. El resultado de concentración de bicarbonatos previamente determinado (0.00184 mol HCO₃⁻/L) es de utilidad para éste cálculo:

$$50.0 \text{ mL} \times 0.00184 \text{ mol HCO}_3^-/1000 \text{ mL} = 9.19606 \times 10^{-5} \text{ moles HCO}_3^-$$

Por estequiometría, sabemos que por cada mol reaccionado de HCl, reaccionan dos moles de CO₃²⁻, y por cada mol de HCl que reacciona, lo hace un mol de HCO₃⁻. Por ésto, los moles de ácido clorhídrico consumido son equivalentes a la suma de dos veces los moles de carbonatos más los moles de bicarbonatos. Colocándolo en forma de ecuación, y al tener en cuenta el HCl consumido por el blanco, podemos encontrar los moles de carbonatos presentes en 50.0 mL del agua cruda analizada:

$$(29.40 - 0.30467) \text{ mL HCl} \times \frac{0.00316 \text{ mol HCl}}{1000 \text{ mL}} = 2 \times \text{moles CO}_3^{2-} + \text{moles HCO}_3^-$$

Substituyendo en la ecuación anterior los moles de HCO_3^- previamente determinados (9.19606×10^{-5} moles de HCO_3^-), y despejando "moles de CO_3^{2-} " obtenemos *los moles de carbonatos presentes en 50 mL de agua cruda analizada:*

$$\text{moles } \text{CO}_3^{2-} = 0.000 \times 10^{-5} \text{ moles.}$$

Por lo tanto, la *concentración de carbonatos presentes en el agua cruda analizada es:*

$$1000 \text{ mL} \times \frac{0.000 \times 10^{-5} \text{ moles}}{50 \text{ mL}} = 0.00000 \text{ mol } \text{CO}_3^{2-}/\text{L} \text{ (0.0 ppm)}$$

c. Determinación de dureza en el agua cruda:

Tomando en cuenta el consumo de titulante para el blanco de dureza (0.30 mL) y el consumo en la muestra (22.90 mL), se puede determinar la *dureza en el agua cruda:*

$$\begin{aligned} & (22.90 - 0.30) \text{ mL EDTA} \times 0.00208 \text{ mol EDTA}/1000 \text{ mL} \\ & \times 1 \text{ mol Ca}/1 \text{ mol EDTA} \times 1 \text{ mol CaCO}_3/1 \text{ mol Ca} \times 1/50 \text{ mL} \\ & \times 1000 \text{ mL}/1\text{L} = 0.00094 \text{ mol CaCO}_3/\text{L} \text{ (94.1 ppm)} \end{aligned}$$

TABLA 6.5.

CALIDAD DEL AGUA CRUDA:

| Experimento | Resultados Obtenidos (5/Oct/92) | Resultados de Agrilab (25/Ago/92) |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| BICARBONATOS | 112.2 ppm | 115.9 ppm |
| CARBONATOS | 0.0 ppm | 0.0 ppm |
| DUREZA | 94.1 ppm | 143.0 ppm |
| pH | 7.5 | 7.99 |

2. Calidad del agua tratada:

TABLA 6.6.

DATOS OBTENIDOS EN PRUEBAS CON EL AGUA TRATADA:

| | Flujo Analizado (L/seg): 0 | 0.00449 | 0.00915 | 0.02821 | 0.10549 |
|---|--|---------|---------|---------|---------|
| | Tiempo Tratando Agua Con Cada Flujo (h): 6 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| DUREZA: mL de EDTA 0.00208 M consumidos | 0.3 | 0.3 | 3.0 | --- | --- |
| CARBONATOS + BICARBONATOS: mL de HCl 0.00316 M consumidos | 0.0 | 0.0 | 0.0 | --- | --- |
| BICARBONATOS: mL de HCl 0.00316 M consumidos | --- | --- | --- | --- | --- |
| pH: | 4.5 | 6.0 | 6.0 | --- | --- |
| DUREZA DESPUES DE 1er REGENERACION: mL de EDTA 0.00208 M consumidos | --- | --- | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| CARBONATOS + BICARBONATOS DESPUES DE 1er REGENERACION: mL de HCl 0.00316 M consumidos | --- | --- | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BICARBONATOS DESPUES DE 1er REGENERACION: mL de HCl 0.00316 M consumidos | --- | --- | --- | --- | --- |
| pH DESPUES DE 1er REGENERACION: | --- | --- | 6.0 | 6.0 | 6.0 |

Con la excepción de un dato, el EDTA consumido por el agua tratada por el intercambiador es igual al consumido por el blanco (0.3 mL), por lo que no es necesario hacer cálculos para concluir que no hay dureza presente.

El dato que no es 0.3 corresponde al momento antes de regenerar, *con un flujo de 0.00915 L/seg. y la cantidad de dureza* presente en esa muestra de agua *es:*

$$\begin{aligned}
 &(3.0 - 0.3) \text{ mL EDTA} \times 0.00208 \text{ mol EDTA/1000 mL} \\
 &\times 1 \text{ mol Ca/1 mol EDTA} \times 1 \text{ mol CaCO}_3 / 1 \text{ mol Ca} \times 1/50 \text{ mL} \\
 &\times 1000 \text{ mL/1L} = 0.00011 \text{ mol CaCO}_3 / \text{L} \quad (11.2 \text{ ppm})
 \end{aligned}$$

Se debe hacer notar que después de la regeneración, nuevamente se obtuvo un efluente sin dureza. En el momento antes de regenerar, el período útil de la resina ya había finalizado, por lo que el efluente empezó a salir con dureza.

El comportamiento con las determinaciones de "Carbonatos + Bicarbonatos" es aún mejor: el titulante consumido por todas las muestras es cero, mientras que para el blanco es de 0.30467 mL HCl 0.00316 M. Esto se debe a que el agua del efluente es ligeramente ácida, por lo que hidroliza cualquier carbonato y bicarbonato presente como contaminante en los reactivos.

No fue necesario determinar la cantidad de bicarbonatos,

porque si la suma de carbonatos + bicarbonatos es cero, es obvio que ninguno de los dos se encuentra presente.

La selección del flujo de tratamiento de agua óptimo no se puede basar en la calidad del efluente obtenido, ya que todas las calidades son igualmente buenas. Por lo tanto, se escogió el mayor flujo (0.10549 L/seg) para que el tratamiento de agua fuera lo más rápido posible.

Se evaluó la reproducibilidad de los resultados utilizando el *flujo óptimo (0.10549 l/seg)*, obteniéndose igualmente buenos resultados, según lo muestra la siguiente tabla:

TABLA 6.7.
REPRODUCIBILIDAD DE CONDICIONES OPTIMAS (FLUJO MAXIMO)

| | Corrida: | A | B | C | D | E |
|---|---------------------------|------|------|------|------|------|
| | Tiempo tratando agua (h): | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.03 |
| DUREZA: mL de EDTA 0.00208 M consumidos | | 0.3 | 0.3 | 14.0 | --- | --- |
| CARBONATOS + BICARBONATOS: mL de HCl 0.00316 M consumidos | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | --- | --- |
| BICARBONATOS: mL de HCl 0.00316 M consumidos | | --- | --- | --- | --- | --- |
| pH: | | 6.0 | 6.0 | 6.0 | --- | --- |
| DUREZA DESPUES DE 2da REGENERACION: mL de EDTA 0.00208 M consumidos | | --- | --- | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| CARBONATOS + BICARBONATOS DESPUES DE 2da REGENERACION: mL de HCl 0.00316 M consumidos | | --- | --- | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BICARBONATOS DESPUES DE 2da REGENERACION: mL de HCl 0.00316 M consumidos | | --- | --- | --- | --- | --- |
| pH DESPUES DE 2da REGENERACION: | | --- | --- | 6.0 | 6.0 | 6.0 |

Al igual que con los datos de la tabla 6.6, con excepción de la corrida C, es evidente que para todos los datos la concentración de las sustancias analizadas es cero, por consumir igual o menor cantidad que el blanco.

En la corrida C, el efluente muestra signos de dureza en el momento en que se hace necesario regenerar de nuevo. En ese momento, *la dureza es:*

$$\begin{aligned}
 &(3.0 - 0.3) \text{ mL EDTA} \times 0.00208 \text{ mol EDTA/1000 mL} \\
 &\times 1 \text{ mol Ca/1 mol EDTA} \times 1 \text{ mol CaCO}_3/1 \text{ mol Ca} \times 1/50 \text{ mL} \\
 &\times 1000 \text{ mL/1L} = 0.00057 \text{ mol CaCO}_3/\text{L} \quad (57.0 \text{ ppm})
 \end{aligned}$$

Después de cada regeneración, se lavaba con agua los residuos de regenerante hasta la estabilización del pH. Posteriormente, se colocaba el grifo en la posición del flujo a analizarse y se muestreaba agua. Inmediatamente se abría el grifo hasta el siguiente flujo, en donde permanecía 0.75 horas, tiempo que dilataban las pruebas realizadas en cada muestra.

El agua tratada entre cada regeneración se puede calcular a partir de los flujos y del tiempo en que funcionó el intercambiador en cada flujo:

Con el flujo de 0.00915 L/seg se trataron aproximadamente 0.5 L.

Con los flujos subsecuentes hasta antes de la segunda regeneración, la cantidad de agua tratada fue:

$$0.75 \text{ h} \times 3600 \text{ seg/h} \times [0.02821 \text{ L/seg} + (0.10549 \times 3) \text{ L/seg}] \\ = 930.64 \text{ L}$$

Por lo tanto, *la cantidad de agua tratada eficientemente entre cada regeneración es:*

$$930.64 \text{ L} + 0.5 \text{ L} = 931.14 \text{ L}$$

Con la resina en condiciones regeneradas, la calidad del agua obtenida al utilizar el flujo máximo se puede resumir en la siguiente tabla:

TABLA 6.8.

CALIDAD DEL AGUA TRATADA EN CONDICIONES OPTIMAS

| | <i>Flujo</i> <i>Corrida: 0.10549</i> <i>L/seg</i> | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> |
|--------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| BICARBONATOS (ppm) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CARBONATOS (ppm) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DUREZA (ppm) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |

C. Pruebas realizadas con el agua tratada:

Se diluyeron a sus concentraciones recomendadas tres químicos de uso común en fincas cafetaleras: Malathión, Látigo y Gramoxone. Los tres químicos en análisis tienen restricciones en el pH de la mezcla final agua-químico. La dilución se hizo con agua sin tratar y con agua tratada, anotándose el pH entre cada intervalo de adición. Los resultados obtenidos son los siguientes:

TABLA 6.9.
pH DEL MALATHION DILUIDO CON AGUA TRATADA Y SIN TRATAR

| Cantidad de Malathión Agregada a 200 mL de agua | pH Utilizando Agua Sin Tratar | pH Utilizando Agua Tratada |
|--|----------------------------------|-------------------------------|
| 0 gotas | 7.5 | 6.0 |
| 5 gotas | 7.0 | 5.5 |
| 10 gotas | 6.5 | 5.0 |
| 15 gotas | 6.5 | 4.5 |
| 20 gotas | 6.0 | 4.5 |
| 25 gotas | 6.0 | 4.0 |
| 30 gotas | 6.0 | 3.0 |
| 1.5 mL (+/- 40 gotas) | 6.0 | 3.0 |

TABLA 6.10.
pH DEL LATIGO DILUIDO CON AGUA TRATADA Y SIN TRATAR

| Cantidad de Látigo Agregada a 200 mL de agua | pH Utilizando Agua Sin Tratar | pH Utilizando Agua Tratada |
|---|----------------------------------|-------------------------------|
| 0 gotas | 7.5 | 6.0 |
| 10 gotas | 6.5 | 6.0 |
| 20 gotas | 6.0 | 5.5 |
| 30 gotas | 6.0 | 5.0 |
| 40 gotas | 6.0 | 5.0 |
| 2.0 mL (+/- 65 gotas) | 5.5 | 5.0 |

TABLA 6.11.
pH DEL GRAMOXONE DILUIDO CON AGUA TRATADA Y SIN TRATAR

| Cantidad de Gramoxone Agregada a 200 mL de agua | pH Utilizando Agua Sin Tratar | pH Utilizando Agua Tratada |
|--|----------------------------------|-------------------------------|
| 0 gotas | 7.5 | 6.0 |
| 5 gotas | 7.0 | 6.0 |
| 10 gotas | 7.0 | 5.5 |
| 15 gotas | 7.0 | 5.5 |
| 20 gotas | 7.0 | 5.5 |
| 35 gotas | 7.0 | 5.5 |
| 1.0 mL (+/- 40 gotas) | 7.0 | 5.5 |

D. Aspecto del intercambiador:

El aspecto final del descarbonatador-suavizador construido, durante las operaciones de tratamiento de agua, retrolavado para expandir la resina, regeneración y lavado del regenerante es el siguiente:



Figura 9. El intercambiador en tratamiento de agua, con flujo de arriba hacia abajo.

A pesar que el flujo de agua a tratar recomendado por el fabricante de la resina es de 0.00915 L/seg (equivalentes a 1 litro cada 1 minuto 49.29 segundos)(Ver apéndice C), se comprobó experimentalmente que se obtienen los mismos resultados utilizando el máximo flujo permitido por el grifo de donde se toma el agua, de 0.10549 L/seg (equivalente a 1 litro cada 9.48 segundos). De esta forma se logra llenar un tonel de 54 galones en 32 minutos con 17.80 segundos. El agua entra por arriba y sale completamente descarbonatada y suavizada en la parte de abajo.



Figura 10. Expansión de la resina del intercambiador, con flujo de abajo hacia arriba.

En las hojas técnicas de la resina utilizada (Ver apéndice C), no se recomienda algún flujo específico para la

expansión de la resina por medio del retrolavado. Para esta actividad se utilizó el máximo flujo posible (0.10549 L/seg) para descompactar más eficientemente la resina, y obtener la densidad de bulto baja en el menor tiempo posible. El retrolavado se practicó por 10 minutos.



Figura 11. El intercambiador regenerándose, con flujo en sentido inverso al tratamiento de agua.

Durante la regeneración, el regenerante atraviesa el intercambiador con la ayuda de la gravedad, y por estar apoyado sobre las patas superiores, fluye en sentido contrario que el flujo del agua a tratarse. Con esto se logra la máxima eficiencia posible en regeneración.

Se implementó una prensa para la manguera, con el objetivo de poder cerrar totalmente el flujo del ácido mientras se coloca el tanque regenerador en su posición normal de trabajo. Con la prensa totalmente abierta, se permitió el máximo flujo posible de regenerante, a través de la manguera libre, y el HCl al 10%, utilizado como regenerante, tardó 14 minutos con 47.44 segundos en pasar, equivalentes a 6 min 58.32 seg./litro (0.00239 L/seg). Según el Apéndice C, este flujo entra dentro del rango recomendado por el fabricante, de 0.00221 L/seg a 0.00442 L/seg.

También se determinó que la cantidad muerta de regenerante que permanece en el recipiente sin ser evacuada es de 250 mL, por lo que la cantidad de regenerante necesaria se incrementó en la misma proporción, pudiéndose utilizar el siguiente rango de condiciones para regenerar: de 2371.44 mL con HCl 10% a 5553.6 mL con HCl 4%.

Figura 12. Lavado del Regenerante. Flujo de arriba hacia abajo.



El flujo de lavado o rinse recomendado de 0.00221 L/seg a 0.00662 L/seg durante 16 a 150 min (de 6.63 L a 19.87 L de agua en total). Se obtuvo buenos resultados al utilizar 19.0 L de agua pero al flujo máximo (0.10549 L/seg), para apresurar el proceso. El rinse del regenerante se practicó hasta que el pH llegó a niveles estables. Se tomaron lecturas de pH cada minuto. Las dos primeras lecturas indicaron un pH de alrededor de 2. Se estabilizó el pH en 6 a partir del minuto 3.

E. Evaluación estadística:

1. Evaluación estadística de los valores del pH:

Se obtendrá un promedio con un rango de confianza de los valores de similitud entre los datos del pH logrados con el pHímetro y los observados con el papel:

Los datos, según la tabla 6.1 son:

TABLA 6.12.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL % DE SIMILITUD
ENTRE EL pH DEL pHIMETRO Y EL pH DEL PAPEL:

| Número del dato | % de Similitud (%) ₁ | (% de Similitud) ² (% ₁ ²) |
|-----------------|---------------------------------|--|
| 1 | 100.00 | 10000.0000 |
| 2 | 98.59 | 9719.9881 |
| 3 | 97.40 | 9486.7600 |
| 4 | 98.76 | 9753.5376 |
| 5 | 98.16 | 9635.3856 |
| 6 | 96.97 | 9403.1809 |
| 7 | 100.00 | 10000.0000 |
| 8 | 98.81 | 9763.4161 |
| 9 | 98.81 | 9763.4161 |
| SUMATORIA: | 887.50 | 87525.6844 |

La fórmula de la desviación standard (S) es:

$$S = \left\{ \left(\text{Sumatoria } \%_1^2 \right) - \left[\left(\text{Sumatoria } \%_1 \right)^2 / n \right] \right\} / (n - 1) \text{ }^{0.5}$$

Para los datos anteriores, la *desviación standard* es:

$$S = \left\{ \left[(87525.6844) - \frac{[(887.50)^2 / 9]}{9} \right] / (9 - 1) \right\}^{0.5}$$

$$= 1.020005515$$

Se puede obtener un promedio de los datos anteriores, con un rango de confianza de, por ejemplo, 95.0%. El 95% indica la probabilidad de que el rango contenga al valor teórico de 100%.

Para una muestra de $n = 9$ datos, si nombramos al promedio de los datos X , la t de student al 95% de confianza es $T = 1.860$, y el *promedio con su rango correspondiente al 95% de confianza* es:

$$X = 887.50 / 9 = 98.6111$$

$$X \pm \frac{T \times S}{(n)^{0.5}} = X \pm \frac{1.860 \times 1.020005515}{9^{0.5}} = 98.611111 \pm 0.63240 \%$$

Cuando el pH determinado con el papel es igual al del pHímetro, el porcentaje de similitud es 100%. Cuando existen diferencias entre ambas determinaciones, se debe a las limitaciones en la lectura de colores del papel; se tomará como ideal el 100% de similitud. Si T es el valor de la t de student a determinado límite de confianza, S es la desviación standard de los datos, n es el número de datos, X es el

promedio de los datos y si denotamos como t el valor de la t de student experimental para los datos analizados, podemos analizar, mediante la siguiente tabla, si es posible afirmar que las lecturas de pH del papel y las de pH del pHímetro se consideran iguales:

TABLA 6.13.
EXACTITUD DEL pH POR MEDIO DE PAPEL

| Propósito | Hipótesis | Supuestos | Estadístico de Prueba y Regla De Decisión |
|--|------------------------|---|---|
| Verificar si pH del pHímetro y pH del papel se consideran iguales. | pH pHímetro = pH papel | Muestreo Aleatorio Representativo; Distribución Normal. | $t = \frac{(\bar{X} - 100) \times \sqrt{n}}{S}$ Si el valor absoluto de t es mayor a T , se rechaza la hipótesis. |

Para un 95.0% de Confianza, $T = 1.860$
Substituyendo valores en la ecuación obtenemos:

$$t = \frac{(98.611111 - 100) \times \sqrt{9}}{1.020005515} = -4.084945234$$

Como el valor absoluto de t , 4.084945234 es mayor a T , se rechaza la hipótesis y se concluye que no es lo mismo determinar el pH con el pHímetro o determinarlo con el papel.

- Evaluación estadística de la reproducibilidad de las condiciones óptimas:

La reproducibilidad de las condiciones óptimas de funcionamiento, usando la t de student es:

TABLA 6.14.

ANALISIS ESTADISTICO DE LA
REPRODUCIBILIDAD DE LAS CONDICIONES OPTIMAS

| Número del dato | Nombre de la corrida | Concentración (C) de carbonatos o bicarbonatos o dureza (ppm) | C ² | pH | pH ² |
|-----------------|----------------------|---|----------------|----|-----------------|
| 1 | Flujo 0.10549 L/seg | 0 | 0 | 6 | 36 |
| 2 | A | 0 | 0 | 6 | 36 |
| 3 | B | 0 | 0 | 6 | 36 |
| 4 | C | 0 | 0 | 6 | 36 |
| 5 | D | 0 | 0 | 6 | 36 |
| 6 | E | 0 | 0 | 6 | 36 |
| SUMATORIA: | | 0 | 0 | 36 | 216 |

El valor de la desviación standard para las concentraciones es:

$$S = \left\{ \left(\text{Sumatoria } C_i^2 \right) - \left[\left(\text{Sumatoria } C_i \right)^2 / n \right] \right\} / (n - 1) \}^{0.5}$$

Substituyendo valores se obtiene:

$$S = \left\{ \left\{ (0) - \left[(0)^2 / 6 \right] \right\} / (6 - 1) \right\}^{0.5}$$

$$S = 0$$

Por lo tanto, *el promedio X de las concentraciones con su incertidumbre al 95% de confianza es:*

$$X = 0/6 = 0 \text{ ppm}$$

$$X \pm \frac{T \times S}{(n)^{0.5}} = X \pm \frac{2.015 \times 0}{6^{0.5}} = 0 \pm 0 \text{ ppm}$$

El valor de la desviación standard para el pH es:

$$S = \left\{ \left(\text{Sumatoria } pH_i^2 \right) - \left[\left(\text{Sumatoria } pH_i \right)^2 / n \right] \right\} / (n - 1)}^{0.5}$$

Substituyendo valores se obtiene:

$$S = \left\{ \left((216) - \left[(36)^2 / 6 \right] \right) \right\} / (6 - 1)}^{0.5}$$

$$S = 0$$

Por lo tanto, *el promedio X de los pH con su incertidumbre al 95% de confianza es:*

$$X = 6/6 = 6$$

$$X \pm \frac{T \times S}{(n)^{0.5}} = X \pm \frac{2.015 \times 0}{6^{0.5}} = 6 \pm 0$$

Las expresiones de los promedios de concentración y pH anteriores no son un rango, porque solamente abarcan un valor.

Como todos los puntos coinciden con el valor correspondiente determinado, se concluye que la reproducibilidad de las condiciones óptimas de operación del intercambiador es perfecta.

F. Evaluación financiera:

El costo de los materiales utilizados en el intercambiador catiónico son los siguientes:

| | |
|---|--------|
| 0.07 piés ³ de resina Amberlite IR-120 Plus.....Q | 75.00 |
| 31.5 pulg. de tubo de PVC blanco de 3 pulg. diámetro.....Q | 11.42 |
| 15 cm x 4 pulg de cedazo de Acero Inoxidable 60 Mesh (15 cm x Q15.78/100 cm).....Q | 2.38 |
| Trabajos en madera.....Q | 160.00 |
| 4 tubos galvanizados de 34 pulg. de largo por 3/4 pulg. de diámetro, con 2 pulg. de rosca en cada extremo.....Q | 114.44 |
| 16 tuercas y 16 roldanas para los tubos galvanizados.....Q | 80.00 |
| 6 tornillos inoxidables de 3.5 pulg. de largo por 1/8 pulg. de diámetro, con 12 roldanas y 6 mariposas de hierro.....Q | 12.90 |
| Sargento de 1 pulg.....Q | 15.00 |
| Trabajos de soldadura en sargento.....Q | 30.00 |
| 5.5 yardas de manguera transparente de PVC de 1/2 pulg. de diámetro.....Q | 49.06 |
| Pegamento para PVC Epoximil.....Q | 7.65 |
| 2 juegos de terminales con rosca metálica para adaptar mangueras de 1/2 pulg. de diámetro a grifos roscados.....Q | 15.32 |
| 2 juegos de terminales con rosca de PVC para adaptar mangueras de 1/2 pulg. de diámetro a grifos roscados.....Q | 22.90 |
| 5 adptadores de PVC para manguera de 1/2 pulg.....Q | 6.90 |
| 1 recipiente transparente de Polietileno 1.5 Galones de Capacidad.....Q | 7.26 |
| 13 abrazaderas de latón de 3/4 pulg. de diámetro.....Q | 32.50 |
| 2 coplas de 3 pulg. de diámetro de PVC.....Q | 31.72 |
| 2 reductores de 3 pulg. a 1 pulg. de diámetro de PVC.....Q | 30.34 |

| | |
|---|----------|
| 3 coplas de 1 pulg. de diámetro de PVC, con rosca en un extremo..... | Q 5.67 |
| 2 coplas de 1 pulg. de diámetro de PVC, con un extremo macho roscado..... | Q 4.30 |
| 2 tées de 1 pulg. de diámetro de PVC..... | Q 6.82 |
| 3 reductores de PVC de 1 a 1/2 pulg. de diámetro..... | Q 6.00 |
| 4 coplas de 1/2 pulg. de diámetro de PVC..... | Q 2.32 |
| 4 llaves de 1/2 pulg. de diámetro de PVC..... | Q 126.68 |
| 2 tapones de PVC para tubo de 1/2 pulg. de diámetro..... | Q 2.20 |
| 1 reductor de PVC de 3/4 a 1/2 pulg. de diámetro..... | Q 1.75 |
| 1 reductor de PVC de 1.25 a 3/4 pulg. de diámetro..... | Q 2.85 |
| 1 copla de PVC de 1.25 pulg. de diámetro..... | Q 2.25 |

El costo total del intercambiador diseñado es de Q 865.19

Según se determinó al analizar el período de vida del cedazo de acero inoxidable, éste dura 32.9 años entre cada reemplazo. También se determinó que el intercambiador se regenera 29.9 veces al año, por lo que los costos de operación por materiales son:

La cantidad de ácido clorhídrico al 32% utilizada en cada regeneración es:

$$2371.44 \text{ mL de HCl } 10\% \times \frac{10 \text{ mL HCl } 32\%}{32 \text{ mL HCl } 10\%} = 741.075 \text{ mL de HCl } 32\%$$

Se cotizó el precio del HCl en la Droguería Amkimic (10a Av. 3-21 Z.1), y el valor de 1 Gal. de HCl 21° Baumé (34%) es de Q11.90. En la Distribuidora Richard (1a Av. 18-13 zona 1), el valor de 1 Gal. de HCl al 32% es de Q10.50. Se escogió el producto de la Distribuidora Richard por ser más económico.

El costo del HCl por cada regeneración es:

$$741.075 \text{ mL HCl } 32\% \times \frac{Q \ 10.50}{1 \text{ Gal}} \times \frac{264.17 \text{ Gal}}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = Q \ 2.06$$

El costo del cedazo de acero inoxidable por cada regeneración es:

$$\frac{Q2.38}{32.9 \text{ años}} \times \frac{1 \text{ año}}{29.9 \text{ regeneraciones}} = Q \ 0.0024$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad, el agua que tratará entre cada regeneración será de 817.66 L. Por lo tanto, *el costo por litro de agua tratada debido a los materiales es:*

$$(Q \ 2.06 + Q \ 0.0024) / 817.66 \text{ L} = Q \ 0.0025 / \text{L de agua tratada}$$

Los costos de mano de obra son casi los mismos que si el intercambiador no estuviera funcionado: el trabajo de llenado del tonel con agua es igual, y el trabajo al regenerar con ácido es comparable a la adición del químico pH⁺ de la Química Stoller. Por esto sólo se compararán los costos operacionales debidos a los materiales utilizados.

El costo de operación con el químico anteriormente utilizado para suavizar y descarbonatar agua (pH⁺ de Química Stoller) es:

$$\frac{Q 8.00}{\text{Litro de pH}^+} \times \frac{1 \text{ Litro de pH}^+}{300 \text{ L}} = Q 0.0267 / \text{L de agua tratada}$$

Por lo tanto *el costo de operaciones se redujo en:*

$$\frac{Q 0.0267}{Q 0.0025} = 10.68 \text{ veces}$$

La *cantidad de dinero ahorrada al año* con utilizar este sistema de tratamiento de agua es:

$$\frac{(Q 0.0267 - Q 0.0025) \text{ de ahorro}}{\text{Litro tratado}} \times \frac{817.66 \text{ L tratados}}{\text{regeneración}}$$

$$\times \frac{29.9 \text{ regeneraciones}}{1 \text{ año}} = Q 591.64 / \text{año}$$

El tiempo necesario para recuperar la inversión del costo total de los materiales utilizados en construir el intercambiador es:

$$Q 865.19 \times \frac{1 \text{ año}}{Q 591.64} \times \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} = 17.5 \text{ meses}$$

VIII. DISCUSIONES:

Cuando el agua destinada para diluir químicos foliares tiene carbonatos o bicarbonatos disueltos, su pH es alcalino, y reacciona con los químicos a diluir formándose agua. Cuando el agua es dura, algunos químicos (ver Apéndice B) precipitan. El resultado en ambos casos es un desperdicio del químico.

Dentro de los métodos posibles para descarbonatar y suavizar agua, los que involucran la adición de químicos, como cal, carbonato de sodio y pH^+ de la Stoller, presentan la desventaja de que para ser agregados estequiométricamente se necesitan hacer determinaciones previas de la calidad del agua, porque en un río la calidad del agua no es constante, como se puede apreciar en la tabla 6.5 de resultados. Si se utilizan sin guardar una relación estequiométrica, pueden suceder dos casos: si se agrega menos químico que el necesario estequiométricamente, la calidad del agua obtenida tendrá aún carbonatos, bicarbonatos y dureza, con repercusiones negativas al utilizarlos en la dilución de químicos; si se agrega más que el necesario estequiométricamente se habrá desperdiciado la porción extra agregada, resultando antieconómico.

Dentro de los métodos para descarbonatar y suavizar agua que no necesitan la adición de químicos, se encuentran los de intercambio iónico: dependiendo del tipo de resina utilizada, se descarbonatará el agua total o parcialmente, y se suavizará el agua total o parcialmente. Solamente las resinas catiónicas sulfónicas descarbonatan y suavizan el agua totalmente, por lo que este método de tratamiento fue el elegido.

Para mejorar la eficiencia de regeneración de la resina, el flujo del regenerante debe ser en sentido inverso al flujo del agua tratada. Esto se debe a que, por haber estado más tiempo en contacto con agua sin ningún tratamiento, las capas superiores de resina se encuentran totalmente saturadas, mientras que las inferiores se encuentran sólo parcialmente saturadas. De esta forma, el regenerante, que se lleva los iones que saturan el intercambiador, debe encontrar una resina con concentración creciente del ion que debe acarrear, para evitar que esos iones se redepositen en las partes parcialmente saturadas de la resina.

Se escogieron métodos para evaluar la calidad del agua que se pudieran realizar en la finca, debido a que en el transcurso de efectuar muestras de agua en la finca y analizarlas en un laboratorio de la ciudad, las condiciones

de pH, bicarbonatos, carbonatos y dureza de carbonatos varían. Esto sucede porque con el calor, los bicarbonatos de calcio precipitan en forma de carbonatos de calcio, con lo que la dureza disminuye, y al variarse la cantidad de carbonatos y bicarbonatos disueltos en el agua varía también el pH.

En la determinación de dureza, se usó MgY para que el viraje de color en el punto final de la titulación fuera lo más claro posible, y así obtener resultados más exactos. Esto sucede porque el viraje que se obtiene con el indicador "Negro de Eriocromo T" en presencia de magnesio es marcado y fácil de detectar. La adición de MgY no afecta los resultados de la titulación porque es un compuesto con una cantidad equivalente de magnesio (Mg) y EDTA (Y), que se contrarrestan exactamente. Asimismo, se tiene que usar agua destilada y desionizada en el blanco y al lavar toda la cristalería, para evitar cualquier interferente. La calidad del agua utilizada en los indicadores agregados durante la determinación de dureza no afectó, porque se corrió un blanco que los incluía.

Al determinar dureza, todos los cationes pueden reaccionar con el EDTA, causando interferencias en los resultados obtenidos. Sin embargo, hay métodos para eliminar

los interferentes antes de realizar la titulación: al agregar buffer pH 10, se escogió el buffer de amoníaco porque hace precipitar a todos los cationes, menos a los divalentes. Aunque dentro del término "dureza" sólo se incluyan al calcio y al magnesio, los demás cationes divalentes, como el hierro, cobre, manganeso y zinc también presentan el inconveniente de hacer precipitar a las sales monovalentes con un extremo polar. Los otros cationes polivalentes no las hacen precipitar por impedimento estérico, es decir, por la falta de espacio: el catión polivalente no puede enlazarse con más de dos moléculas monovalentes con un extremo polar, dejando sus otras valencias al descubierto, que se combinan con en el agua. Por lo tanto, se determinó la cantidad de cationes divalentes presentes, que son los que causan problema de precipitar algunos químicos.

En la determinación de carbonatos y bicarbonatos, se utilizó agua descarbonatada como "sistema de control" o "blanco". Sin embargo, el blanco resultó con más bicarbonatos y carbonatos que algunas de las muestras tratadas por el intercambiador por la presencia de carbonatos en el agua utilizada para hacer indicadores, ya que al hacer estas soluciones indicadoras no se utilizó agua descarbonatada. A pesar de que en las muestras de agua tratadas por el intercambiador se utilizaron las mismas

soluciones indicadoras, por ser muestras ligeramente ácidas, neutralizaron cualquier posible presencia de bicarbonatos y carbonatos, por lo que el viraje de color se dio al instante de agregar el indicador.

La cantidad de resina del intercambiador se calculó para que pudiera tratar como mínimo el consumo de agua de un día. Para ésto se analizó el día de mayor consumo de agua para dilución de químicos de la finca Panabaj. Para que los cálculos resultaran lo más apegados a la realidad, se consideró que se regeneraría la resina con el mismo regenerante utilizado por el fabricante y reportado en la hoja técnica (ver apéndice C), que equivale a 2121.44 mL de HCl 10%, para obtener una capacidad de regeneración de 27.5 Kilogramos/pié³ de resina. Se evitó el uso de ácido sulfúrico para regenerar la resina por la formación de coloides de sulfato de calcio, que evitarían un buen contacto entre la resina y el fluido.

Con el análisis de agua de Agrilab (ver apéndice A) se calculó la cantidad de resina necesaria. Como una resina catiónica sulfónica intercambia todos los cationes del agua por hidrógenos, se sumó la concentración de cationes reportados en el examen de Agrilab y se multiplicó por un factor de seguridad de 1.5. Se consideró necesaria la

utilización de un factor por la posible precipitación de una porción de los cationes, debido al calor al transportar la muestra de la Finca a Agrilab (aproximadamente tres horas de viaje), la variabilidad de la calidad del agua de río y los cationes presentes pero no analizados.

Las dimensiones del intercambiador dependieron de la cantidad de resina necesaria. Los materiales escogidos para la construcción del intercambiador son básicamente PVC y Polietileno, ambos resistentes al agua y a los ácidos. A pesar de sufrir corrosión por ácidos, se utilizó un cedazo de acero inoxidable para retener la resina, debido a que un tamiz tamaño 60 mesh es fácilmente obtenible solamente en ese material. La vida útil del cedazo es de 32.9 años, y su costo es solamente Q 2.38, por lo que se justifica su uso.

El efluente del intercambiador es ácido porque intercambia todos los cationes del agua cruda por hidrógenos, resultando así una mezcla de ácidos cuya concentración es equivalente a la concentración de las sales del agua cruda con las que interactuó la resina.

Se notó que cuando la resina necesitaba ser regenerada, aparecía dureza en el agua tratada antes que aparecieran trazas de carbonatos y bicarbonatos. Esto se debió a que

cualquier ion con mayor afinidad por la resina que el calcio y magnesio (Ver Figura 1), tendría preferencia a interactuar con la resina, y en el momento en que la resina estaba casi saturada, se intercambiaria por hidrógenos aun después de aparecer en el efluente signos de dureza. Como resultado se formarían los ácidos respectivos, que reaccionaron con los carbonatos y bicarbonatos presentes, por lo que el efluente resultaba duro, pero descarbonatado.

A pesar de que las lecturas de pH varían entre el pHímetro y el papel pH (ver tabla 6.13), esta variación es muy pequeña, obteniendo resultados de más del 96.97% de similitud (Ver Figura 8 y Tabla 6.1). Se puede afirmar, a partir de los cálculos estadísticos de la tabla 6.14, que el pH del efluente tratado es constante y ligeramente ácido. También se puede afirmar que el intercambiador descarbonata y suaviza con 100% de eficiencia.

Como se puede apreciar en el apéndice C, los flujos para tratamiento de agua y lavado de regenerante recomendados por el fabricante son más pequeños que los utilizados en forma óptima experimentalmente. Esto se debe a que los flujos recomendados son expresados por pie³ de resina, y el intercambiador construido tiene solamente 0.07 piés³ de resina, cantidad muy por debajo de los intercambiadores

industriales pequeños de uso común. Por esto se considera que el volumen de resina utilizado, por ser tan pequeño, está fuera de la regla general de flujos presentada por el fabricante. De cualquier forma, se comprobó el buen funcionamiento del intercambiador con flujos fuera de los recomendados, tanto en la etapa de tratamiento como en la de lavado del regenerante.

Al diluir tres diferentes químicos, tanto con el agua tratada como con agua sin tratar, se observó que en las diluciones de Malathión y Látigo con agua cruda, el pH de la mezcla resultó ser más alcalino que el pH recomendado (ver tablas 6.9, 6.10 y apéndice B). Solamente al diluir el Gramoxone con agua sin tratamiento, se obtuvo un pH aceptable, que se encuentra exactamente en el límite entre óptimo y no recomendable (Ver tabla 6.11 y Apéndice B). Por el contrario, en los tres casos analizados, los pH obtenidos al utilizar agua tratada se encontraron exactamente en el nivel óptimo. Aun mejor, en todos los casos en que se diluyeron los químicos con agua tratada, se alcanzó un pH óptimo mucho antes de añadir la mitad de la cantidad recomendada de dilución del químico.

Los costos de los materiales utilizados en la construcción del intercambiador se recuperan con los ahorros

logrados al utilizarlo en sólo 17.5 meses calendario, lo que indica que el proyecto elaborado es rentable.

IX. CONCLUSIONES:

- A. El agua dura y alcalina es indeseable para diluir químicos, porque descompone una fracción de éstos. También es indeseable en la irrigación de plantas ornamentales para exportación, durante su fase de formación de nuevas raíces.
- B. El mejor método para descarbonatar y suavizar agua en una finca es un intercambiador catiónico con resina sulfonada.
- C. La regeneración en contracorriente es más eficiente que la regeneración en paralelo.
- D. Las determinaciones de pH, alcalinidad y dureza se deben hacer en el mismo lugar en donde se toma la muestra de agua.
- E. Los cationes divalentes disueltos en el agua pueden precipitar con las moléculas con dos extremos: uno monovalente y otro polar.
- F. La eficiencia de regeneración aumenta al utilizar poco regenerante, pero la capacidad de intercambio de la resina disminuye.

G. El efluente de un intercambiador catiónico es ácido en la misma proporción que la concentración de cationes del agua cruda.

H. Para obtener los mejores resultados se debe diluir los químicos agrícolas con agua sin cationes divalentes y descarbonatada.

I. La eficiencia lograda al descarbonatar, suavizar y eliminar cationes divalentes por medio de la resina catiónica sulfonada utilizada en el intercambiador construido es del 100%.

J. La inversión se recupera en aproximadamente 1.5 años (17.5 meses).

X. RECOMENDACIONES:

A. Se recomienda utilizar agua descarbonatada y sin cationes divalentes al diluir químicos agrícolas, y para irrigar plantas ornamentales de exportación, en su fase de formación de raíces.

B. Para suavizar y descarbonatar agua en fincas con agua dura y alcalina, el método recomendado es el intercambio catiónico con una resina sulfonada.

C. Las ventajas de utilizar un intercambiador catiónico son recomendables para todas las fincas agrícolas con agua dura y alcalina, y la conveniencia es aún mejor para las fincas con mayor consumo de agua para dilución de químicos, porque los ahorros son mayores y la recuperación de inversión es más rápida.

D. Se recomienda utilizar agua descarbonatada en la preparación de las soluciones indicadoras correspondientes a la determinación de carbonatos y bicarbonatos.

E. Es recomendable regenerar las resinas intercambiadoras en sentido contrario al flujo de agua a tratar.

F. Es recomendable hacer las determinaciones de dureza, carbonatos, bicarbonatos y pH en el mismo lugar de donde se toma la muestra del agua.

G. Se recomienda utilizar MgY en las determinaciones de dureza por titulación con EDTA, porque se obtienen buenos virajes de color en el punto final.

H. Es recomendable utilizar un tanque plástico para diluir los agroquímicos, para evitar la contaminación por óxido presente al usar recipientes de metal.

I. Cuando la disponibilidad en el mercado nacional lo permita, se recomienda el uso de resinas y materiales intercambiadores que no necesiten químicos para su regeneración, como los utilizados por la corporación IONPURE, en Estados Unidos.

XI. BIBLIOGRAFIA:

- 1.- Varios Autores. Water Treatment Handbook. Editorial John Wiley & Sons. New York. 5ta. Edición. 1979.
- 2.- Perry, R. Green, D. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw Hill Book Company, Inc. New York. Anniversary Edition. 1984.
- 3.- Skoog, D. West, D. Fundamentals of Analytical Chemistry. Saunders College Publishing. New York. 4a. Edición. 1982.
- 4.- Estrada, C. Manual Práctico de Pesticidas Aplicados al Cultivo del Café. Editorial Anacafé. Guatemala. 1er. Edición. 1981.
- 5.- Meister, E. Farm Chemical Handbook '75. Meister Publishing Co. Ohio. 1er. Edición. 1975.
- 6.- Kirk & Otmer. Enciclopedia de Tecnología Química. Editorial Utea. México. 1er. Edición en español. 1961.
- 7.- Mendenhall, W. Introducción a la Probabilidad y la Estadística. Editorial Wadsworth Internacional/Iberoamérica. Florida, EUA. Traducción al español de la 5ta. Edición en inglés. 1982.

8.- The Permutit Company. Water Conditioning Handbook.
Printed in USA by The Permutit Company. New York. 1er.
Edición. 1943.

9.- William J. Ryan, M. E. Water Treatment & Purification.
McGraw Hill Book Company, Inc. New York & London. 1er.
Edición, 4a. Impresión. 1937.

10.- Sheppard T. Powell. Acondicionamiento de Aguas para la
Industria. Editorial Limusa-Wiley, S.A. México. 1er.
Edición, 1er. Reimpresión en español. 1970.

11.- Pesticide 1/2 Life when mixed with spray solutions at
different pH levels. Boletín INDUCATE. Massachusetts.

12.- Hensley, J. New Zip in Activated Carbon.
Chemical Engineering. McGraw Hill. New York. Febrero 1990.

13.- Amberlite IR-120 Plus. Hoja Informativa de Rhom &
Haas. Enero de 1982.

14.- Purolite C-100. Matt-Son Newsletter. Boletín
Informativo de Matt-Son. Diciembre de 1989.

15.- Quimicas Stoller de Centroamerica S. A. Boletín Informativo. Guatemala.

16.- Products and Systems for Process Water. Boletín Informativo de IONPURE. Massachusetts.

17.- Standard Methods For the Examination of Water & Waste Water. Editoriales APHA, AWWA, WPCF. USA. 1985.

18.- Official Methods of Analysis. Published by the AOAC. USA. Centennial Edition. 1984.

APENDICE A

ANALISIS DEL AGUA DE LA FINCA PANABAJ REALIZADO POR AGRILAB

Guatemala. 25 . 8 . 92

REPORTE DE ANALISIS DE AGUA

NUESTRA REFERENCIA :A.1-07-29-01-02/1502
SU REFERENCIA :MUESTRA DE AGUA DE LA PILA
"FINCA PANABAJ"

pH 7.99
C.E. 0.1430 mmhos/cm
RAS 0.12

| ELEMENTO | ppm | NIVEL |
|----------|---------|-------|
| NH4 | 0.270 | A |
| NO3 | 1.550 | A |
| P | 0.000 | N |
| K | 0.280 | N |
| Ca | 34.240 | N |
| Mg | 2.200 | N |
| B | 0.100 | N |
| Cu | 0.000 | N |
| Fe | 0.010 | N |
| Mn | 0.000 | N |
| Zn | 0.040 | N |
| Na | 2.630 | N |
| CO3 | 0.000 | |
| HCO3 | 115.900 | E |

CALIDAD DEL AGUA EN FUNCION DEL pH:

EL pH ES ALTO Y ALCALINIZARA EL SUELO. ES NECESARIO CONTROLAR EL pH Y CONCENTRACION DE SALES DEL SUELO CADA 3 MESES PARA PODER APLICAR MEDIDAS CORRECTIVAS. EL AGUA ES DE CALIDAD SUBOPTIMA PARA IRRIGACION E INADECUADA PARA LA APLICACION DE PESTICIDAS (LA MAYORIA DE PESTICIDAS PIERDEN SU EFECTIVIDAD A UN pH MAYOR A 6.5). SI EL SUELO TIENE UN pH BAJO O SE ESTAN USANDO FERTILIZANTES CON EFECTO ACIDO. EL pH ALTO DEL AGUA PUEDE ESTAR SIENDO CONTRARRESTADO. SI ESTE NO ES EL CASO. EL AGUA PUEDE SER ACIDIFICADA.

CALIDAD DEL AGUA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE SALES:

LA CONCENTRACION DE SALES ES ADECUADA PARA LA IRRIGACION.

SI ALGUN ELEMENTO SE ENCUENTRA A NIVEL 'T'. EL AGUA ES INADECUADA PARA IRRIGACION. LA PRESENCIA DE ALGUN ELEMENTO A NIVEL 'E' IMPLICA QUE EL AGUA TIENE UNA CALIDAD SUBOPTIMA DE IRRIGACION.

CLAVE

N=NORMAL A=ALTO E=EXCESO T=TOXICO T*=TOXICO PARA HUMANOS Y ANIMALES

DUREZA 143 PPM CaCO3
CALIDAD DEL AGUA EN FUNCION DE LA DUREZA:
EL AGUA SE CONSIDERA DURA PARA IRRIGACION

LABORATORIO DE SUELOS Y PLANTAS

11 AVENIDA 36-40. ZONA 11 • GUATEMALA • TEL.: 768673 - 762630 • FAX 770678

APENDICE B

TABLAS DE ALGUNOS QUIMICOS HIDROSOLUBLES UTILIZADOS EN FINCAS CAFETALERAS

TABLA B.1
QUIMICOS AFECTADOS POR LA DUREZA DEL AGUA PARA DILUCION

| NOMBRE COMERCIAL Y ESTRUCTURA DEL QUIMICO | USO EN FINCAS CAFETALERAS |
|---|---|
| <p>1. ALLOXYDIM DE SODIO</p> <div style="text-align: center;"> </div> | <p>HERBICIDA PARA MONTE DE HOJAS ANCHAS</p> |
| <p>2. CIANATO DE POTASIO</p> <div style="text-align: center;"> </div> | <p>HERBICIDA SI ES APLICADO A LA HOJA; FERTILIZANTE SI ES APLICA- DO AL SUELO</p> |
| <p>3. BLAZER</p> <div style="text-align: center;"> </div> | <p>HERBICIDA SELECTIVO</p> |

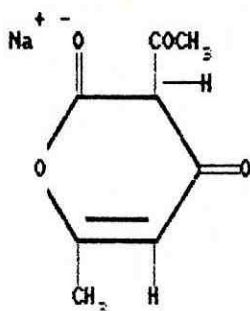
CONTINUACION DE LA TABLA B.1
 QUIMICOS AFECTADOS POR LA DUREZA DEL AGUA PARA DILUCION

NOMBRE COMERCIAL Y ESTRUCTURA DEL QUIMICO

USO EN FINCAS CAFETALERAS

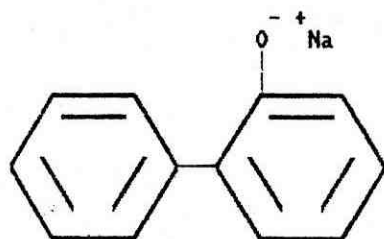
4. DEHIDROACETATO DE SODIO

FUNGICIDA



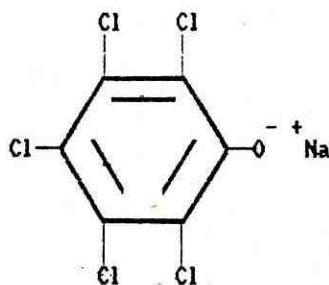
5. DOWICIDE A (ORTOFENILFENATO DE SODIO)

FUNGICIDA



6. PENTAFLOROFENATO DE SODIO

HERBICIDA DE CONTACTO



7. UAPAM (N-METILDITIOCARBAMATO DE SODIO, SMDC)

FUNGICIDA, NEMATICIDA Y
 HERBICIDA

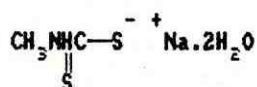
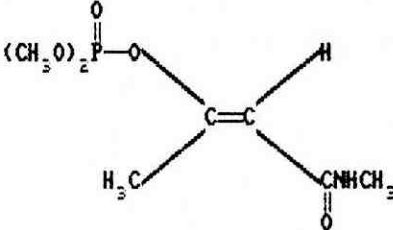
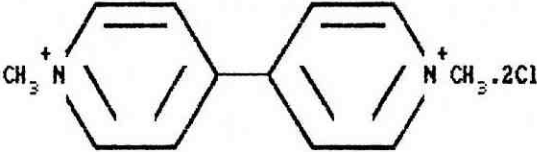
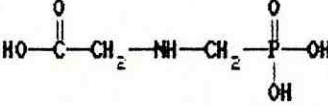
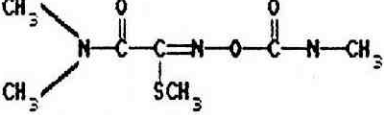
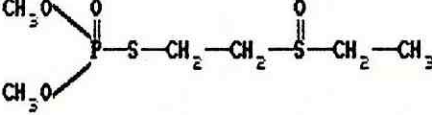
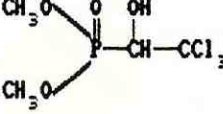
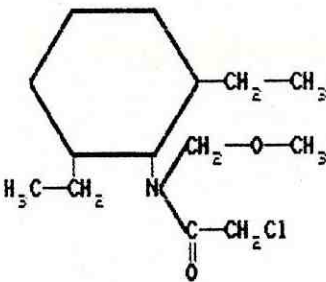


TABLA B.2
QUIMICOS AFECTADOS POR EL pH DEL AGUA DE DILUCION

| NOMBRE COMERCIAL Y ESTRUCTURA DEL QUIMICO | USO EN FINCAS CAFETALERAS | pH IDEAL DE LA SOLUCION FINAL |
|---|---------------------------|-------------------------------|
| 1. AZODRIN | INSECTICIDA | 5.0 |
|  | | |
| 2. GRAMOXONE (PARAQUAT) | HERBICIDA | MENOR QUE 7 |
|  | | |
| 3. ROUNDUP (LATIGO) | HERBICIDA | 5.0 |
|  | | |
| 4. UYDATE | NEMATICIDA | MENOR QUE 5 |
|  | | |
| 5. METASYSTOX R | INSECTICIDA SISTEMICO | 5.0 |
|  | | |
| 6. NEGUUVON | INSECTICIDA | 5.0 |
|  | | |

CONTINUACION DE LA TABLA B.2
QUIMICOS AFECTADOS POR EL pH DEL AGUA DE DILUCION

| NOMBRE COMERCIAL Y ESTRUCTURA DEL QUIMICO | USO EN FINCAS CAFETALERAS | pH IDEAL DE LA SOLUCION FINAL |
|---|---------------------------|-------------------------------|
| <p>7. LANNATE</p> $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3 - \text{C} = \text{N} - \text{O} - \text{C} - \text{NH} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{S} - \text{CH}_3 \end{array}$ | INSECTICIDA | 6.0 |
| <p>8. LASSO</p>  | HERBICIDA (EMULSION) | MENOR QUE 7 |
| <p>9. MALATHION</p> $\begin{array}{c} \text{S} \\ \parallel \\ (\text{CH}_3\text{O})_2\text{P} - \text{S} - \text{CH} - \text{C} - \text{OC}_2\text{H}_5 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{OC}_2\text{H}_5 \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$ | INSECTICIDA (EMULSION) | MENOR QUE 5 |
| <p>10. DITHANE</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CS} - \text{S} - \text{Na} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CS} - \text{S} - \text{Na} \end{array}$ | FUNGICIDA | 5.0 |
| <p>11. AMBUSH</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3\text{S} - \text{C} = \text{N} - \text{O} - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ | INSECTICIDA | DE 6 A 4 |

CONTINUACION DEL APENDICE C

CONTINUACION DE LA HOJA TECNICA
DE LA RESINA ROHM AND HAAS
AMBERLITE IR-120 PLUS

PHYSICAL CHARACTERISTICS

PHYSICAL FORM—Hard, attrition resistant, light yellow, 16-50 mesh (U.S. Standard Screens), fully hydrated spherical particles.

SHIPPING WEIGHT—53 lbs./ft³ (848 g/l)—sodium form
—50 lbs./ft³ (800 g/l)—hydrogen form

MOISTURE CONTENT—45%*

EFFECTIVE SIZE—0.50 mm*

UNIFORMITY COEFFICIENT—1.6*

DENSITY—51 lbs./ft³ (816 g/l)

VOID VOLUME—35 to 40%
*Approximate

SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

(Sodium or Hydrogen Cycle)
pH 1.0 to 14.0
Maximum Temperature 250°F (121°C)
Minimum Bed Depth 18 to 24 inches
Backwash Flow Rate See detailed information
Service Flow Rate 2 gpm/ft² (16.0 l/hr/l)

HYDROGEN CYCLE OPERATION

The recommended regeneration conditions for hydrogen cycle operation of Amberlite IR-120 Plus are listed below:

REGENERANT CONCENTRATION*—4 to 10% HCl or 1 to 5% H₂SO₄

REGENERANT FLOW RATE—0.5 to 1.0 gpm/ft² (4.0 to 8.0 l/hr/l)

RINSE FLOW RATE—Initially same as regenerant flow rate then can be increased to 1.5 gpm/ft² (12.0 l/hr/l)

RINSE WATER REQUIREMENTS—25 to 75 gal/ft² (3.4 to 10.1 l/l)

REGENERATION—The tables below show the relationship between capacity and levels of sulfuric and hydrochloric acid for regeneration. Sulfuric acid concentration used after NaCl exhaustion was 10%. After CaCl₂ exhaustion, regeneration using 2% sulfuric acid was employed to avoid calcium sulfate precipitation. A 10% solution of hydrochloric acid was used in both NaCl and CaCl₂ exhaustion studies.

*See Safe Handling Information Section.

ACID REGENERATION

| Exhausting Solution (ppm as CaCl ₂) | Regeneration Level (lbs. of 20% H ₂ SO ₄ or HCl/ft ² of resin) | Capacity (lb./ft ² of resin) | Capacity (kg./ft ² of resin) | g CaCl ₂ /ft ² |
|---|---|---|---|--------------------------------------|
| 500 ppm NaCl | 5.0 | 80 | 19.0 | 43.5 |
| | 10.0 | 160 | 25.0 | 57.3 |
| 500 ppm CaCl ₂ | 5.0 | 80 | 12.5 | 28.6 |
| | 10.0 | 160 | 17.0 | 38.9 |

| Exhausting Solution (ppm as CaCl ₂) | Regeneration Level (lbs. of 20% H ₂ SO ₄ or HCl/ft ² of resin) | Capacity (lb./ft ² of resin) | Capacity (kg./ft ² of resin) | g CaCl ₂ /ft ² |
|---|---|---|---|--------------------------------------|
| 500 ppm CaCl ₂ | 5 | 80 | 11.0 | 25.2 |
| | 15 | 240 | 22.5 | 51.5 |
| | 25 | 400 | 27.5 | 63.0 |

SODIUM CYCLE OPERATION

Amberlite IR-120 Plus will provide excellent performance in both cold sodium cycle softeners and in hot process systems. The recommended regeneration conditions for sodium cycle operation are listed below:

REGENERANT CONCENTRATION*—10% NaCl

REGENERANT FLOW RATE—1 gpm/ft² (8.0 l/hr/l)

RINSE FLOW RATE—1 gpm/ft² (8.0 l/hr/l) initially then 1.5 gpm/ft² (12.0 l/hr/l)

RINSE WATER REQUIREMENTS—25 to 75 gal/ft² (3.4 to 10.1 l/l)

REGENERATION—The relationship between regeneration level and capacity is summarized in the table below. Data were obtained using 500 ppm. (as CaCO₃) calcium chloride solution. Capacities have been adjusted downward to typify performance of material meeting minimum production specifications.

| Regeneration Level (lbs. NaCl/ft ² resin) | g NaCl/ft ² resin | Capacity (lb./ft ² of resin) | Capacity (kg./ft ² of resin) | Regeneration Efficiency (lbs. NaCl/ltr. removed) | g NaCl/g CaCl ₂ removed |
|--|------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
| 5.0 | 80 | 17.8 | 40.8 | 0.26 | 1.96 |
| 15.0 | 240 | 29.3 | 67.1 | 0.51 | 3.57 |
| 25.0 | 400 | 34.0 | 77.9 | 0.74 | 5.13 |

*See Safe Handling Information Section.

APPLICATIONS

SOFTENING—The durability and high capacity of Amberlite IR-120 Plus permits its use for industrial softening of water regardless of its hardness content. Its good resistance to breakdown offers minimum generation of fines and therefore longer operation at the designed pressure drop than standard gel type cation exchange resin.

DEIONIZATION—The use of Amberlite IR-120 Plus with strongly basic anion exchange resins, such as Amberlite IRA-400 or Amberlite IRA-402, in two bed or Monobed ion exchange resin deionization equipment will provide water of excellent quality for boiler feed or other industrial purposes.

CHEMICAL PROCESSING—The good physical strength of Amberlite IR-120 Plus makes it an excellent resin choice for chemical process applications.

SAFE HANDLING INFORMATION: A Material Safety Data Sheet is available for Amberlite IR-120 Plus. To obtain a copy contact your Rohm and Haas representative.

CAUTION: 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.

AMBERLITE and MUMFORD are trademarks of Rohm and Haas Company, or of its subsidiaries or affiliates. The Company's policy is to register its trademarks where products designated thereby are marketed by the Company, its subsidiaries or affiliates.

These suggestions and data are based on information we believe to be reliable. They are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. We recommend that the prospective user determine the suitability of our materials and suggestions before adopting them on a commercial scale. The situation of specific patents in this publication should not be construed 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.